

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова»**

УДК 620.17:658.56



На правах рукописи

Кузнецов Павел Леонидович

**МЕТОДИКА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ОКСИДНО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ
С ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель,
д.т.н., профессор,
В.В. Муравьев

Ижевск

2022

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА I. ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ | 11 |
| 1.1 Проблемы современного конденсаторостроения | 11 |
| 1.2 Базовая технология производства танталовых конденсаторов | 13 |
| 1.3 Физико-химические процессы, протекающие в танталовых конденсаторах | 19 |
| 1.4 Контроль качества конденсаторов с использованием различных методов | 26 |
| Выводы по главе I | 29 |
| ГЛАВА II ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНДЕНСАТОРОВ | 30 |
| 2.1 Дефекты производства при изготовлении конденсаторов и методы их поиска | 30 |
| 2.2 Подход к обеспечению качества при производстве электролитических конденсаторов и конденсаторов с ДЭС | 32 |
| 2.3 Электрические свойства конденсаторов | 35 |
| 2.4 Основные электрические характеристики электролитических конденсаторов и методы их контроля | 39 |
| 2.5 Проблемы контроля качества оксидно-полупроводниковых конденсаторов при использовании режима «Inrush-test» | 49 |
| 2.6 Приборы для контроля качества конденсаторов | 53 |
| Выводы по главе II | 58 |
| ГЛАВА III ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОКСИДНО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ | 59 |
| 3.1 Анализ характерных зависимостей импеданса и ЭПС электролитических конденсаторов от частоты | 59 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.2 | Исследование эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени | 63 |
| 3.3 | Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени | 69 |
| 3.4 | Устройство разбраковки электролитических конденсаторов по параметру эквивалентное последовательное сопротивление | 76 |
| | Выводы по главе III | 83 |
| | ГЛАВА IV КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРЕСС-ТЕСТА | 85 |
| 4.1 | Разработка методики СТРЕСС-ТЕСТ | 85 |
| 4.2 | Разработка установки разбраковки конденсаторов с применением методики СТРЕСС-ТЭСТ | 99 |
| 4.3 | Применение метода СТРЕСС-ТЕСТ при анализе качества танталовых электролитических конденсаторов | 100 |
| 4.4 | Применение метода СТРЕСС-ТЭСТ при анализе качества оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов | 109 |
| 4.5 | Контроль качества электролитических конденсаторов различной конструкции с использованием метода СТРЕСС-ТЕСТ | 111 |
| | Выводы по главе IV | 121 |
| | ОБЩИЕ ВЫВОДЫ | 122 |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 124 |
| | СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ | 125 |
| | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 126 |
| | ПРИЛОЖЕНИЯ | 147 |

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что конденсаторы являются неизменным элементом любых электронных схем, от простых до самых сложных.

На сегодняшний день, электролитические конденсаторы, являются сложнейшими высокотехнологичными изделиями. Качество современных конденсаторов, как и любых электронных компонентов, в первую очередь зависит от качества их изготовления (строгого соблюдения технологического процесса и использованных материалов).

Для изготовления современных конденсаторов немаловажным является вопрос контроля параметров, установления новых критериев и применение новых видов испытаний для получения на выходе высоко-научно-технологических изделий с набором определенных индивидуальных характеристик к которым, к тому же, постоянно со стороны потребителя, возрастают требования, при их использовании в различных сферах и областях промышленности.

На сегодняшний день применяемые методы контроля качества конденсаторов не удовлетворяют потребителей, так как методы, применяемые в технологическом процессе, были разработаны в 70-90 г.г. XX века. К таким методам можно отнести – испытание на перенапряжение (перенапряжение ограничивается коэффициентом 1,1 или 1,15 от номинального напряжения, что в настоящее время существенно ниже требуемого); ускоренная оценка долговечности (длительной безотказности), требующая проведения испытаний в течение 500 - 40 000 час в зависимости от типов изделий; отсутствие при контроле многих оксидно-электролитических конденсаторов некоторых важных параметров, например, таких как эквивалентное последовательное сопротивление.

Так как существующие методики оценки качества оксидно-электролитических конденсаторов в рамках их изготовления не достаточны для выявления скрытых дефектов, либо требуют длительного времени оценки, то возникла необходимость в разработке принципиально нового метода оценки качества.

Таким образом, тематика диссертации, связанная с разработкой метода и средств контроля электрических характеристик оксидно-электролитических конденсаторов с использованием повышенной нагрузки, актуальна.

Цель работы.

Цель данной работы – разработка методик и устройств для контроля электрических параметров при испытаниях оксидно-электролитических конденсаторов с приложением циклической повышенной нагрузки, позволяющих повысить качество конденсаторов до стадии эксплуатации.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Исследовать емкость, полное сопротивление, эквивалентное последовательное сопротивление и другие параметры оксидно-электролитических конденсаторов в широком частотном диапазоне в производственном цикле и оценить влияние их изменений на отказы конденсаторов.

2. На основании проведенных исследований обосновать возможность прогноза измеряемых параметров за границы поля допуска и разработать устройство для их контроля в производственном цикле до стадии эксплуатации.

3. Разработать методику и автоматизированную установку для ускоренных испытаний оксидно-электролитических конденсаторов до стадии эксплуатации, основанных на контроле эквивалентного последовательного сопротивления с приложением циклической повышенной нагрузки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основании проведенных исследований электрических параметров оксидно-электролитических конденсаторов различных типов в широком частотном диапазоне впервые установлено, что наиболее информативным параметром при оценке ресурса является эквивалентное последовательное сопротивление, позволяющее обнаружить отказ конденсатора, начиная с 2000 час эксплуатации, тогда как отказ по параметру емкость обнаруживается много позже 3000 час эксплуатации (п.1 паспорта).

2. Проведенные исследования электрических параметров алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов, танталовых объемно-пористых

конденсаторов, конденсаторов с двойным электрическим слоем с обоснованным объемом выборки в технологическом процессе доказали возможность прогноза момента выхода эквивалентного последовательного сопротивления за границы поля допуска (момента появления брака), что легло в основу устройства для контроля параметров конденсаторов в производственном цикле до стадии эксплуатации.

3. На основе проведенных исследований научно обоснованы параметры процесса испытаний (коэффициент повышения нагрузки, число циклов, время испытаний) и сформулированы требования к методике и установке для контроля и ускоренных испытаний оксидно-электролитических конденсаторов СТРЕСС-ТЕСТ, основанные на циклическом приложении к конденсатору повышенного напряжения с коэффициентом 1,8 от номинального напряжения, соответствующего напряжению при формировании оксидного слоя на танталовом аноде, и позволяющие заблаговременно выявлять некачественные конденсаторы при дефектах в структуре оксидного слоя (п.3 паспорта).

Теоретическая и практическая значимость:

Для теории:

1. Предложен подход к исследованию электрических параметров конденсаторов на основе анализа схем их замещения и физико-химических процессов, протекающих в них.

2. Доказано, что наиболее важным параметром для исследования электролитических конденсаторов является эквивалентное последовательное сопротивление, которое ранее не контролировалось при производстве электролитических конденсаторов.

3. Разработанная методика СТРЕСС-ТЕСТ, основанная на кратковременном приложении повышенной нагрузки (коэффициент 1,8 от номинального напряжения, соответствующий напряжению при формировании оксидного слоя на танталовом аноде), позволяет проводить оценку качества оксидно-электрических конденсаторов, дает представление об изменениях критичных электрических параметров и позволяет производить ускоренную оценку надежности

конденсаторов на основании полученного характера изменения эквивалентного последовательного сопротивления. Результаты испытаний при использовании методики СТРЕСС-ТЕСТ позволяют проводить оценку качества оксидно-электрических конденсаторов, а так же заблаговременно выявлять бракованные изделия.

Для практики:

1. Предложены к использованию методика СТРЕСС-ТЕСТ и установка для контроля и испытаний оксидно-электролитических конденсаторов по параметру эквивалентное последовательное сопротивление в производстве АО «Элеконд», позволяющие снизить появления бракованных изделий в стадии эксплуатации и сократить время испытаний с 2,7 года до 1 часа.

2. Результаты исследования электрической характеристики оксидно-электролитических конденсаторов – эквивалентного последовательного сопротивления – в производственном цикле применены в качестве лабораторной работы по предмету «Метрология, стандартизация и сертификация», при подготовке бакалавров по направлению 12.03.01 Приборостроение в образовательном процессе ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», внедрены учебный процесс подготовки бакалавров по направлениям 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» в виде лекционных занятий по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация», а так же в курсовом проектировании и при подготовке к выпускным квалификационным работам в образовательном процессе Сарапульский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова».

3. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по практическому использованию методики контроля качества оксидно-электролитических конденсаторов СТРЕСС-ТЕСТ в АО «Элеконд». Применение данной методики возможно для всех типов алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов, танталовых объемно-пористых конденсаторов, выпускаемых АО «Элеконд».

Достоверность результатов и выводов подтверждается проведением анализа научно-исследовательских источников информации, проведение статистических обработок данных исследования, применением апробированных методик для оценки результатов исследования, применением современного оборудования, использованием в ходе проведения экспериментов поверенных приборов, верификацией в ходе проведенных экспериментов.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач были применены следующие методы: статистический анализ, измерение, аналитический (системный и сравнительный анализ), формализация. Численные расчеты и обработка экспериментальных данных выполнены на базе вычислительной техники с помощью программного обеспечения, такого как: Microsoft Excel, Octave и др. Для измерения электрических величин экспериментальных исследований использовались поверенные приборы, для испытаний и разработки методики - аттестованное оборудование, поверенные приборы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований электрических параметров танталовых объемно-пористых конденсаторов, алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов, а также конденсаторов с двойным электрическим слоем при проведении испытаний на длительную безотказность доказали, что наиболее важным, обеспечивающего выявление бракованных изделий на ранней стадии, является контроль эквивалентного последовательного сопротивления (п.1 паспорта).

2. Результаты проведенных исследований параметра эквивалентного последовательного сопротивления для алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов, танталовых объемно-пористых конденсаторов и конденсаторов с двойным электрическим слоем, а также результаты прогнозирования момента выхода конденсаторов с границы поля рассеивания за границы поля допуска, с использованием разработанного устройства обеспечили снижение отказов и повышение качества конденсаторов (п.3 паспорта).

3. Разработанная методика СТРЕСС-ТЕСТ оценки качества оксидно-электролитических танталовых конденсаторов, основанная на циклическом приложении к конденсатору повышенного напряжения с коэффициентом 1,8 от номинального напряжения (соответствующего напряжению при формировании оксидного слоя на танталовом аноде) и установка для его проведения позволили заблаговременно выявлять некачественные конденсаторы при дефектах в структуре оксидного слоя и сократить время испытаний с 2,7 года до 1 часа (п.3 паспорта).

Достоверность и обоснованность подтверждается проведением всестороннего анализа выполненных ранее научно-исследовательских работ по литературным источникам, статистической обработкой данных исследования, применением апробированных методик для оценки результатов исследования, применением современного оборудования, использованием в ходе проведения экспериментов поверенных приборов, верификацией в ходе проведенных экспериментов.

Личный вклад автора заключается:

- в постановке задач исследований;
- непосредственном участии в получении данных и научных экспериментах;
- личное участие в апробации результатов исследования;
- в интерпретации и обобщении полученных результатов исследований;
- в выборе методов обработки результатов.

Выбор направлений исследований, методов для их проведения, а так же форм представления результатов и формирование структуры и содержания работы, формулирование основных положений выполнено совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства. VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 50-летию Приборостроительного факультета, Ижевск, 15-17 ноября 2011 года; Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке, II Всероссийская

научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, г. Ижевск, 23-25 апреля 2013 года; Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. XI-ая Международная научно-практическая конференция, г. Курск, 19-21 марта 2014 года; Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации, XII-ая Международная научно-практической конференция, г. Курск, 19-20 марта 2015 года; Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства. XII Международная научно-техническая конференция, г. Ижевск, 23–25 ноября 2016 года; 9-я научно-техническая конференции «Энергия белых ночей-2018». Метрология. Учет и контроль качества электрической энергии. Измерения в интеллектуальных сетях, г. Санкт-Петербург, 4- 8 июня 2018 года; Актуальные проблемы науки и техники, I Межвуз. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященная 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в г. Сарапуле, г. Сарапул, 21-23 мая 2020 г.; I Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы науки и техники», г. Сарапул, 20.05.2021 г.

Соответствие диссертации паспорту специальности. П.1. «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.». П.3 «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

Публикации. Результаты диссертации изложены в 16 публикациях, в том числе 6 статьях (одна из них включена в базу WoS) в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

ГЛАВА I. ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНДЕНСАТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ

1.1 Проблемы современного конденсаторостроения

Конденсаторостроение – важная отрасль современного приборостроения. Конденсаторы - элемент, без которого не обходится ни один прибор или устройство. Поэтому их качество напрямую связано с качеством всего устройства.

Проблемы развития современного конденсаторостроения описаны различными авторами [1-9]. По работам можно выделить следующие острые моменты:

1. Необходимо развивать конденсаторостроение по пути уменьшения массогабаритных характеристик с сохранением полученных емкостных характеристик. Для этого требуется создание материалов и технологий, которые позволят реализовать данную проблему.

2. Улучшение электрических характеристик электролитических танталовых конденсаторов (снижение тангенса угла потерь, снижение полного сопротивления, снижение токов утечки и повышение емкости изделий).

Решением данной проблемы видится так же в использовании современных материалов, таких как: танталовые порошки с нано структурными характеристиками (повышенными значениями удельных зарядов), применением новых рабочих электролитов. Еще одним направлением в развитии данной проблемы видится создание конденсаторов с плоскоцилиндрическим анодом. Плоскоцилиндрический анод позволяет создавать конденсаторы с повышенными значениями емкости и пониженными значениями сопротивления.

3. Развивать направление по созданию конденсаторов с полимерными материалами. Полимерные материалы – это будущее развития конденсаторостроения, так как они позволяют создавать само залечивающиеся изделия. Но для этого требуется создание базовой технологии по созданию и использованию полимерных материалов.

4. Необходимость в конструкции конденсаторов для поверхностного монтажа. Конструкция для поверхностного монтажа позволяет автоматизировать процесс изготовления печатных плат разработчикам РЭА.

Наибольшее распространение среди изготовителей РЭА получили конденсаторы оксидно-электролитические алюминиевые с жидким рабочим электролитом на основе различных кислот [10]. Их преимущества – небольшая стоимость при отличных емкостных характеристиках, обширная область применения.

Электролитические алюминиевые конденсаторы могут быть использованы в широком диапазоне частот – от нескольких десятков герц до нескольких килогерц, что делает их применение универсальным.

Существует вероятность изготовления электролитических алюминиевых конденсаторов с полимерными материалами [11], что в свою очередь приведет к увеличению срока эксплуатации [12] и улучшению электрических характеристик.

В источнике [13] показано, что в условиях широкого диапазона рабочего напряжения электролитические алюминиевые конденсаторы могут обладать высокой надежностью, при условии если соблюдается температурный диапазон эксплуатации. В таком случае отказы – параметрические, т.е. происходит снижение емкости и увеличение других электрических параметров. Наиболее заметен данный процесс у конденсаторов с большими габаритами.

Фирма-производитель конденсаторов «Kemet» разработала электролитические конденсаторы с твердым органическим диэлектриком и проводящим полимерным катодом, которые отличаются очень низкой величиной эффективного последовательного сопротивления и высокой стабильностью емкости на высоких частотах. В [14] рассмотрены разновидности и особенности ключевых серий полимерных конденсаторов для современной электроники. В [15-45] рассматриваются перспективное направление в развитии конденсаторостроения – развитие суперконденсаторов (ионисторов) или, как их еще называют, конденсаторы с ДЭС, их методы оценки и возможности применения, исследований в области создания конденсаторов с ДЭС достаточно объемные, развитие

электроники в данном направлении движется быстрыми темпами, но область применения данных конденсаторов - узкая, например, отсутствует возможность работы в космической технике за счет негерметичной конструкции.

Иностранцами исследователями так же немало внимания уделяется проблемам надежности, уменьшению массо-габаритных характеристик конденсаторов и другим проблемам, что можно наблюдать в [46-58].

1.2 Базовая технология производства танталовых конденсаторов

Танталовые конденсаторы изготавливаются из порошка чистого металла - тантала [59,60]. Типичный размер частиц для высокого напряжения порошок – 10 мкм. Тщательно выбирая порошок, который используется для производства каждой емкости/напряжения, необходимо контролировать поверхность порошка. Порошки с большим размером частиц используются для производства высоковольтных конденсаторов. Это необходимо потому, что, когда проходит рост диэлектрика – а он растет на поверхности танталового порошка, примерно на одну треть толщины и в порошке на глубину примерно на две трети, так что, если взять порошок с маленькими размерами частиц, каждая частица будет изолирована.

Поскольку емкость пропорциональна площади поверхности, значит, чем больше площадь поверхности, тем больше значения окончательной емкости. За последние десять лет заряд порошка CV (емкость/напряжение - заряд), который является мерой объемной эффективности порошка, возросла в рамках совместных программ развития между AVX и поставщиками порошков [61]. Этот рост заряда порошка был вызван изменением формы частиц – от сферических к хлопьям, а в последние годы и к коралловому типу структуры.

Применение танталовых порошков с наночастицами – современное направление конденсаторостроения. В работах [62-64] приведено использование современных танталовых порошков с наноструктурой.

Технологический цикл изготовления, как правило, состоит из операций:

1. Прессование.

Порошок смешивается с подходящим связующим веществом (пластификатором), для того чтобы эти частицы прилипают друг к другу во время формирования анодной таблетки, и для того чтобы порошок легко передавался в пресс-автомате. Затем порошок сжимаются под высоким давлением вокруг Танталовой проволоки, чтобы сделать танталовую «пулю». Термин «пуля» используется в промышленности танталовых конденсаторов для обозначения элемента танталового анода. Соединение с танталовой проволокой необходимо для соединения анода с конденсатором.

Удаление связующего вещества происходит под вакуумом при температуре выше 150°C в течение нескольких минут.

В работах [65-70] много внимания уделено вопросу применения танталовых порошков, влияния их характеристик, методов получения на получение высококачественных анодов для конденсаторов

2. Спекание.

Далее происходит спекание при высокой температуре (обычно 1500°C - 2000°C в зависимости от заряда танталового порошка) под вакуумом. Происходит объединение отдельных частиц в губчатую структуру. Эта структура имеет высокую механическую прочность и плотность, создавая большую внутреннюю поверхность. Если анодов спекаются слишком долго или при слишком высокой температуре, частицы сильно сливаются, и таким образом окончательная емкость анода будет низкой. Аналогично, если аноды спекаются в течение короткого времени или при низкой температуре, емкость будет слишком высокой. В работах [71,72] уделено внимание вопросу изготовления анодов, влияние степени сцепления анодного вывода с танталовой «пулей» и других характеристик

«Мокрое тестирование» - тестирование для контроля качества анодов, проводится по каждому агломерату. Чтобы проиллюстрировать, насколько внутренние поверхности конденсаторов влияют на значение емкости, возьмем, к примеру, конденсатор с номинальным напряжением 25В и емкостью 22 мкФ.

Общеизвестно, емкость конденсатора вычисляется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}, \quad (1.1)$$

где ϵ – диэлектрическая константа для пентаоксида тантала (≈ 27);

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная для вакуума (8.855×10^{-12} Ф/м);

A – площадь поверхности диэлектрика, м²;

d – толщина диэлектрика, м.

Тогда как толщина диэлектрика вычисляется:

$$d = v \cdot U \cdot d_0, \quad (1.2)$$

где v – характерная скорость образования диэлектрика;

U – напряжение;

d_0 – оцененная толщина диэлектрика.

Получаем:

$$d = 4 \times 25 \times 1.7 \times 10^{-9} = 0,17 \text{ мм.}$$

Подставим полученную величину в уравнение 1.1, проведем вычисление:

Площадь поверхности:

$$A = \frac{C \cdot d}{\epsilon \cdot \epsilon_0}, \quad (1.3)$$

$$A = (22 \times 10^{-6} \times 0.17 \times 10^{-6}) / (27 \times 8.855 \times 10^{-12}) = 0.0156 \text{ м}^2.$$

Процесс спекания также помогает выгнать большинство примесей из порошка на поверхность.

Для проведения дальнейших технологических операций танталовые пули привариваются к несущей металлической полосе (блехе или рейке). «Стрингером» называется несущая рейка с приваренными на нее анодами.

3. Формирование диэлектрика.

Следующий этап – создание диэлектрика (пятиоксида тантала). Происходит это путем электрохимического анодирования (формовка). Аноды погружены в очень слабый раствор кислоты, например серной, при повышенной температуре, например 85 °С, при воздействии тока и напряжения происходит контролируемое формирование пятиоксида тантала. Тантал – это вентильный металл, поэтому аморфный слой пятиоксида тантала способен образовывать однородную, тесно связанную между собой структуру по всей поверхности тантала.

Толщина диэлектрика контролируется подаваемым напряжением в процессе формовки. Вначале подается постоянный ток, пока требуемое напряжение не будет достигнуто. Далее подается постоянное напряжение, чтобы обеспечить необходимую толщину диэлектрика на всей поверхности танталового анода. На рисунке 1.1 представлено типичное поведение тока и напряжения во время формирования диэлектрика. Данным профилем пользуются изготовители танталовых конденсаторов.

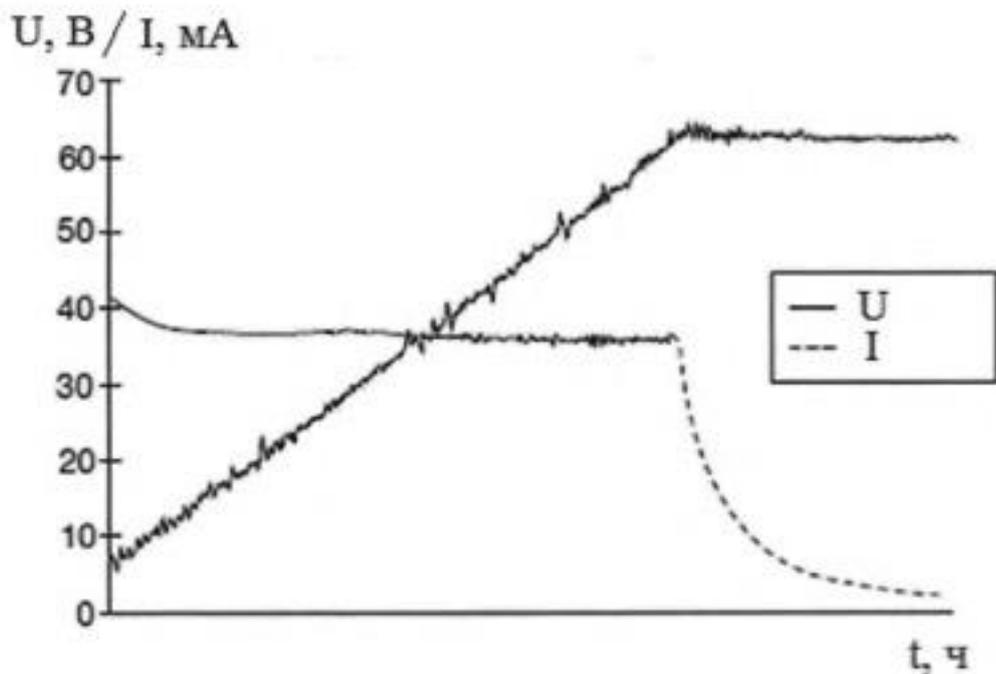


Рисунок 1.1 – Типичный профиль формовки

Химические формулы, показывающие процесс формовки:



Оксид формируется на поверхности тантала, но он так же растет в металл. Для каждой единицы оксида – треть вырастает на поверхности и две трети растет внутрь. Внутренним диэлектриком является примесный состав, который равномерно распределен по аноду. Примесный состав дает характеристику току утечки в конденсаторе; для заданной толщины диэлектрика их статистическое

распределение дает характеристику в квадрате, так как конденсатор, имеющий величину емкости, превышающий в два раза величину емкости конденсатора с таким же номинальным напряжением, как правило, имеет два раза больше ток утечки. Это происходит потому, что пятиокись растет как в аноде, так и на его поверхности, эти примеси могут быть частично изолированы, как это показано на рисунке 1.2 – если напряжение формовки приложено. Существует предел того, насколько можно увеличивать напряжение формовки, поскольку емкость начинает снижаться по мере того как происходит утолщение диэлектрика.

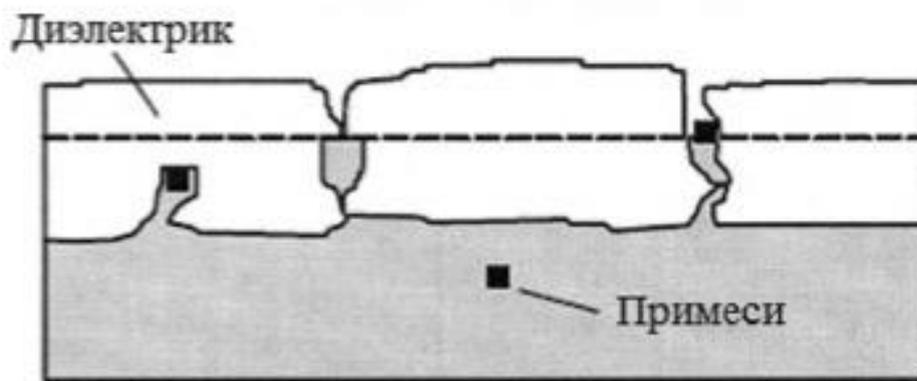


Рисунок 1.2 – Изоляция примесей в диэлектрическом слое

Формовочное напряжение может быть проверено визуально, путем осмотра цвета анода. Это происходит потому, что разная толщина диэлектрика создает различную структуру, когда свет на нее падает, создается эффект масляной пленки на воде. Например, светло-зеленый цвет может означать формовочное напряжение в диапазоне от 100 до 104 вольт, и светло-фиолетовый цвет – в диапазоне от 72 до 76 вольт.

Кроме того, при формировании диэлектрика (оксидировании) производится еще один полупроводниковый продукт, расположенный между желаемым пентаксидом тантала и танталом. Для его удаления после оксидирования, когда достигается около 90% окончательного формовочного напряжения, стрингеры с анодами помещаются в печь при температуре около 350 °С до 400 °С. Этот полупроводниковый регион делает конденсаторы полярными устройствами.

Напряжение оксидирования необходимо брать с запасом по отношению к рабочему напряжению конденсатора. Необходимо соблюдение баланса по толщине диэлектрика при оксидировании, так как с увеличением толщины оксидного слоя происходит снижение ёмкости конденсатора, но в тоже время уменьшение толщины оксидного слоя приводит к уменьшению надежности изделия.

Как правило, толщину оксидной пленки $d_{ок}$ определяют по следующей формуле:

$$d_{ок} = k \cdot U_{\phi}, \quad (1.4)$$

где k – постоянный множитель, зависящий от природы тантала, но не зависит от состава формовочного электролита,

U_{ϕ} – напряжение формовки.

В работе [73] приводится исследование условий оксидирования высокочастотных танталовых анодов из порошков со структурой из нанокристаллов, так как применение танталовых порошков с наночастицами это перспективное направление.

В работе [74] автором изучено и исследовано влияние пористости анода, режимов оксидирования и других эффектов на качество танталовых конденсаторов с жидким электролитом.

4. Подформовка.

Стрингеры погружаются в ванну с кислотой (в зависимости от типа изделия), и подается напряжение, равное около половины исходного формовочного напряжения. Этот процесс позволяет удалять примеси из областей анода с повышенным током утечки и наращивать в этих местах диэлектрик.

5. Рабочие электролиты

Рабочий электролит – один из главных компонентов любого электролитического конденсатора. Они разнообразны в своем составе, но, как правило содержат в своей основе различные кислоты.

По консистенции электролиты бывают:

- жидкими;
- с повышенной вязкостью;
- гелеобразные (в жидкий электролит с добавляют гелеобразующий материал).

Для уменьшения тангенса угла потери у конденсатора необходимо создание рабочего электролита с малым удельным сопротивлением. Рабочий электролит не должен содержать в себе примесей, так как примеси ведут к увеличению удельного сопротивления.

Для надежной работы конденсатора рабочий электролит так же не должен обладать повышенным газообразованием при работе при повышенной температуре среды, так как выделяемые при работе газы могут привести к разрушению конденсатора.

5. Сборка.

В подготовленный корпус конденсатора с катодным выводом наливается рабочий электролит, как правило, на основе серной кислоты, и вставляется оксидированный анод. Далее устанавливается изолятор, происходит сварка изолятора с корпусом, далее зиговка корпуса и микроплазменная сварка для запайки трубочки изолятора. Следующий шаг – приварка анодного вывода. Оценка комплексного контроля качества приварки выводов танталовых объемно-пористых конденсаторов приведена в [75]

Далее проходит тестирование танталовых конденсаторов на качество герметизации, сборки и получение заданных электрических характеристик. Влияние дефектов на выход годных при производстве герметичных танталовых объемно-пористых конденсаторов с жидким электролитом приведено в [76].

1.3 Физико-химические процессы, протекающие в танталовых конденсаторах

Очень часто конденсатор представляется самым простым элементом электрической схемы, однако это не так, и типовая эквивалентная схема реального конденсатора имеет вид RLC-цепи, представленной на рисунке 1.3.

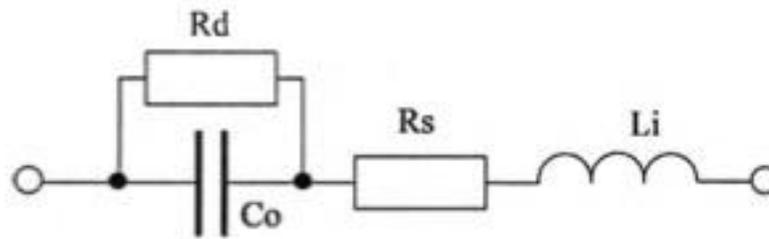


Рисунок 1.3 – Эквивалентная последовательная схема замещения реального конденсатора.

Если подключить в цепь переменного тока конденсатор, происходит чередование процессов заряда конденсатора и разряда.

Величина реактивного сопротивления X_c конденсатора зависит от частоты и с ее увеличением уменьшается:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C'} \quad (1.5)$$

где C – емкость конденсатора, мкФ;

ω – циклическая частота, Гц;

f – частота, подаваемая на конденсатор, Гц

Рост частоты, на которой используется конденсатор, приводит к тому, что конденсатор начинает легче пропускать ток, на высоких частотах практически отсутствует сопротивление току.

Конденсаторы, которые включены в цепь переменного тока или которые работают в импульсном режиме, на высоких частотах начинают обладать индуктивностью (обкладок и выводов).

Энергия преобразуемая в тепло в изоляции конденсатора, подводится от источника питания, поэтому ток в конденсаторе опережает по фазе напряжение на его выводах на угол $|\varphi|$, меньший $\pi/2$. Угол, дополняющий $|\varphi|$ до $\pi/2$, обозначается как δ и называется углом диэлектрических потерь.

Описать напряжение и ток на конденсаторе можно типовой векторной диаграммой (рисунок 1.4).

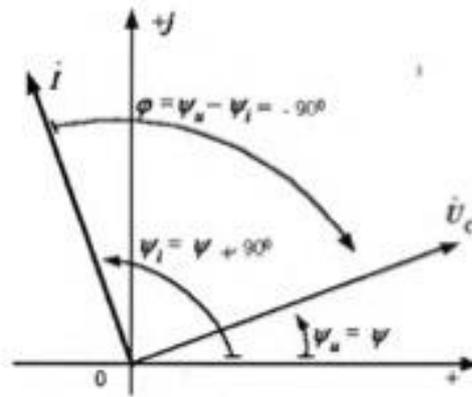


Рисунок 1.4 – Векторная диаграмма напряжения и тока в конденсаторе

На частоте, приближенной к резонансу, полное сопротивление конденсатора стремится к минимальным значениям. Полное сопротивление конденсатора становится минимальным на резонансной частоте (угол $\varphi \rightarrow 0$).

Общеизвестно, частота резонанса конденсатора находится по формуле:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.6)$$

где L – индуктивность конденсатора, Гн.

C – емкость конденсатора, мкФ;

Общеизвестно, что подключенный в цепь конденсатор, рассеивает энергию.

Но конденсатор так же обладает и потерями, которые суммируются из потерь:

- в диэлектрике;
- в проводниках (это обкладки, выводы, корпус).

Данные потери энергии характеризуются следующим физическим явлением: происходит движение ионов в процессе электропроводности, далее ионы смещаются в процессе ионно-релаксационной и междуслойной поляризации. Уже в процессе дипольно-релаксационной и дипольно-радикальной поляризации происходит ориентация групп-радикалов и диполей.

Для электролитических танталовых конденсаторов, сопротивление обкладок определяется сопротивлением промежуточной среды (анодной поверхности), пропитанной электролитом.

Известен эффект поляризации в конденсаторе – ограниченное смещение связанных зарядов диэлектрика в электрическом поле (рисунок 1.5).

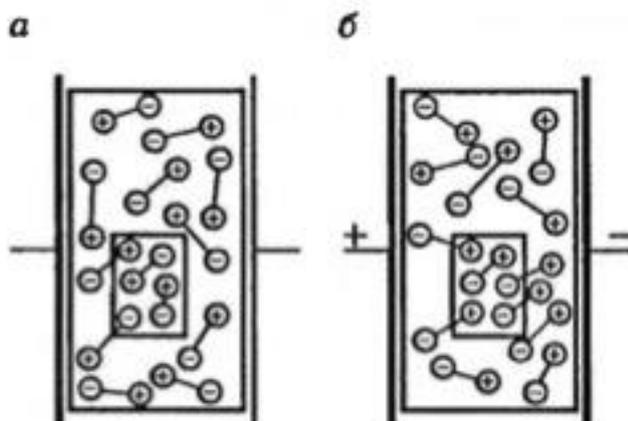


Рисунок 1.5 – Типовая поляризация в конденсаторе
а) без подачи напряжения б) с подачей напряжения

Так как происходит поляризация, то появляются и потери в диэлектрике, связанные с этим эффектом. Он зависит от материала и толщины слоя диэлектрика Ta_2O_5 .

Пятиокись тантала Ta_2O_5 или пентаоксид тантала – это основа любого танталового электролитического конденсатора, как жидкостного, так и твердотельного. То есть пятиокись тантала это слой диэлектрика, который отделяет анод (спечённый танталовый цилиндр) от катода (электролит). Данное соединение стабильно, может не разрушаться при высоких температурах, устойчиво к агрессивным средам – кислотам. Ta_2O_5 обладает высоким удельным сопротивлением – порядка $7,5 \text{ ТОм} \cdot \text{см}$.

Рабочим электролитом в танталовых электролитических конденсаторах с жидким или гелеобразным электролитом как правило является серная кислота (H_2SO_4). Возможно применение и других типов кислот, подходящих по параметрам. Применение электролита с 38% H_2SO_4 позволяет создавать конденсаторы с рабочей температурой до минус $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельное сопротивление такого электролита составляет $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

При выборе рабочего напряжения следует учитывать [77]:

- длительность воздействия электрической нагрузки. Она ведет к необратимым изменениям электрических параметров и характеристик конденсаторов, так как происходит старение как оксидной пленки – пентаоксида тантала, так и различных соединений (анодной таблетки с выводом, вывода анода с выводом корпуса и др.). Степень влияния пентаоксида тантала на параметры конденсаторов и надежность определяется конструкцией конденсатора;

- при постоянном напряжении, подаваемом на электролитический танталовый конденсатор происходят электрохимические процессы, разрушающие, к примеру, состав рабочего электролита с выделением газов. Эти процессы могут усиливаться при воздействии влажности воздуха, превышающей номинальные значения, и высокая температуры среды. Надежность конденсаторов с твердым электролитом выше чем надежность конденсаторов с жидким электролитом, что объясняется отсутствием газов;

- при воздействии переменного напряжения, применение конденсаторов танталовых электролитических при импульсных режимах происходят процессы ионизационные – они возникают внутри диэлектрика или снаружи, преимущественно там, где есть возможность соприкосновения с газами. Явление зачастую происходит у высоковольтных конденсаторов (160 В – 200 В и выше). Ионизация как процесс разрушает органику, а так же диэлектрические соединения, такие как пятиокись тантала. Такое явление происходит за счет бомбардировки их возникающими ионами и электронами или того же окисла азота, водорода или озона. Превышение переменной составляющей синусоидального напряжения [78] приводит к нарушению равновесия тепла внутри конденсатора, которое так же приводит к разрушению диэлектрического слоя. Объяснимо это тем, что с повышением температуры повышается и проводимость диэлектрика.

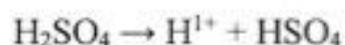
Зависимость емкости жидкостных танталовых конденсаторов от частоты заметно на частотах выше 100 Гц, все потому, что в составе есть жидкий электролит. Сопротивление электролита напрямую зависит от частоты, и с ее ростом, увеличивается и сопротивление электролита.

Особое внимание стоит уделять такому электрическому параметру конденсаторов как ЭПС [79]. В 70-80е годы XX века данный параметр не был достаточно исследован, так как считалось, что достаточно контролировать полное сопротивление. ЭПС характеризует потери как в диэлектрике, так и переходных покрытиях конденсаторов. Так же ЭПС непосредственно связан и с рабочим электролитом. Если рассматривать обычные типы танталовых электролитических конденсаторов то ЭПС в них незначительно при низких частотах, но в области высоких частот (100 кГц и более) значение ЭПС играет большую роль (в том числе и в снижении емкости).

При естественном старении танталового конденсатора происходит и естественный процесс роста ЭПС, но это происходит в течение длительного времени (от 10 лет и более). Но главной причиной роста ЭПС внутри танталового конденсатора является перегрев. Перегрев происходит, как правило, при неправильном использовании конденсатора (превышение температуры, превышение напряжения как постоянного, так и переменной составляющей, нарушение импульсного режима). Так как произошел разогрев, изменился и состав электролита и его сопротивление. Это так же приводит к еще более усиленному разогреву конденсатора. И при наступлении критического значения – происходит отказ конденсатора.

Работу танталовых жидкостных конденсаторов при высоких температурах можно описать следующим образом:

- происходит процесс электролиза. Электролиз вызывает выделение водорода из серной кислоты. Постепенное наводораживание внутри герметичного конденсатора приводит к разгерметизации. Данная ситуация практически не возможна у уплотнённой конструкции – водород имеет место выхода. Химическая формула, показывающая процесс выделения водорода:



- в процессе эксплуатации происходят химические и электрохимические реакции, которые могут вывести конденсатор из строя, так как такие процессы приводят к разрушению, как оксидного слоя, так и к коррозии других соединений.

С ростом коррозии в свою очередь увеличивается и ЭПС конденсатора, в дальнейшем данный процесс запускает следующие химические и электрохимические реакции, физические процессы (разогрев областей) – вследствие чего происходит увеличение электрических параметров конденсаторов (тангенс угла потерь, ток утечки и др.) и снижение емкости конденсаторов. А при крайнем случае – значительной реакции - и отказ конденсатора, вплоть до разрыва.

Проанализировав цепи, в которых часто происходят отказы конденсаторов [80], можно сделать следующий вывод – использование конденсаторов происходит при высоких частотах. Рассматривая современные источники питания можно сделать заключение - мощные импульсные источники питания работают в диапазоне десятка кГц, а маломощные импульсные – сотен кГц.

Тангенс угла потерь находим по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot R, \quad (1.7)$$

где R – сопротивление конденсатора, примерно равное ЭПС

f – частота, Гц;

C – емкость конденсатора.

Преобразуя формулу 1.7 делаем вывод:

$$R_{\text{экв}} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (1.8)$$

- при работе на высоких частотах, из-за возникающих дополнительных потерь происходит нагрев электролита и, соответственно, повышение давления в конденсаторе.

Но, рассматривая формулу 1.7, можно сказать:

- потери прямо пропорциональны не только от частоты, но и от ЭПС.

- чем выше ЭПС, тем выше и тангенс потерь.

Получаем рекомендацию [81] - при выборе конденсатора с низким ЭПС для работы в таких импульсных источниках питания можно добиться и увеличение срока эксплуатации конденсатора. Это происходит за счет снижения температуры электролита при работе на максимально допустимой температуре.

1.4 Контроль качества конденсаторов с использованием различных методов

Контролю качества оксидно-электролитических конденсаторов уделяется не мало внимания. Ведутся разработки новых методик оценок качества. Например, в работах [82-84] приведен новый метод оценки качества применяемых материалов, влияющих на качество конденсаторов. Для этого был использован метод теплового воздействия (воздействием повышенной температуры среды без приложения электрической нагрузки). Метод неплохой, но требует время на проведение исследования (до 80 дней), что в условиях производства весьма ощутимо.

В работе [85] приведена разработка устройства разбраковки чип-конденсаторов по току утечки, заключающаяся в следующем: «...На конденсаторы подается напряжение поляризации от встроенного регулируемого источника питания. В цепи каждого конденсатора имеется датчик тока – прецизионный резистор. Напряжение с датчика тока подается на компаратор, который сравнивает измеренное значение с опорным напряжением. Затем выходной сигнал с компаратора подается на регистр для хранения информации после окончания цикла измерения. Если ток утечки у всех 40 конденсаторов не превышает установленного граничного значения до истечения времени выдержки, то цикл измерения заканчивается досрочно, не дожидаясь окончания установленного времени выдержки».

Данное устройство разработано для танталовых чип-конденсаторов и не применимо для других типов – например, танталовых объемно-пористых с жидким электролитом, алюминиевых оксидных конденсаторов.

При производстве электролитических конденсаторов используется метод 510 по ГОСТ 28885-90 контроля качества перенапряжением. Метод заключается в следующем:

1. Происходит подача на конденсатор постоянного напряжения равного $1,15 \cdot U_{ном}$ для конденсаторов с $U_{ном} \leq 315$ В.

2. Напряжение подается циклично. Цикл испытания состоит из заряда и разряда конденсатор. Заряд — подача напряжения на (30 ± 2) с. Разряд — отключение на 5 мин (30 ± 10) с.

3. Сопротивление цепей заряда и разряда составляет $1 \text{ кОм} + 100 \text{ Ом}$.

Данный метод в настоящее время актуален, но устарел (современные конденсаторы «формуется» при большем значении напряжения) и не обеспечивает должную отбраковку конденсаторов (выявление дефектов оксидного слоя).

В [86] приведен новый метод оценки бумажно-масляных конденсаторов для выявления дефектов в изоляции, не выявленных ранее при испытаниях из-за недостаточного уровня напряженности электрического поля, состоящий в том что:

1. Испытание проводится повышенным напряжением. Установленный уровень испытательных напряжений соответствует пробивным напряжениям изоляции, тогда как уровень заводских испытательных напряжений составляет $(0,75-0,9) \cdot U_{исп}$.

2. Используется напряжение промышленной частоты 50 Гц.

3. Время приложения испытательного напряжения - до 1 минуты.

Метод позволяет отбраковать сосредоточенные грубые дефекты.

Данный метод тоже применяет повышенное напряжение для оценки качества конденсаторов. Но в то же время разработанный метод подходит только для оценки бумажно-масляных конденсаторов.

В [87] проведена оценка еще одного метода оценки танталовых объемно-пористых конденсаторов с помощью повышенного напряжения: «... была предложена методика отбраковочных испытаний таких конденсаторов. Отбраковочные испытания включают электро- и термотренировку. Электротренировка проводится при $U=1,2U_{ном}$. Термотренировка проводится одновременно с электротренировкой при $T=70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность тренировки составляет 100 часов. Методика была апробирована на конденсаторах К52-11». Данная методика не позволила отбраковать танталовые объемно-пористые конденсаторы.

В [88] проводился анализ токов заряда и утечки при испытаниях танталовых конденсаторов. Сделан вывод, что отказы конденсаторов, которые случаются при

включении цепи питания, чаще всего связаны с наличием именно дефектов в граничных областях диэлектрического слоя. Импульсные испытания позволяют имитировать реальные условия эксплуатации, что в свою очередь позволит найти данные дефекты. Реализацию данного метода автор видит в контроле импульса тока. Метод отбраковывает конденсаторы с аномальной формой тока утечки после заряда.

Данная работа тоже подтверждает тот факт, что существующие методики оценки качества электролитических конденсаторов не позволяют отбраковывать неблагонадежные конденсаторы.

В [89] приведен метод выявления внутренних дефектов танталовых конденсаторов. Метод заключается в следующем:

1. От источника постоянного напряжения с необходимым значением испытательного напряжения, равного номинальному напряжению конденсатора, происходит зарядка конденсатора с минимальным значением ЭПС. Емкость конденсатора в 20 раз больше емкости тестируемого конденсатора.

2. Посредством включения полевого транзистора через ограничительные резисторы 0,68 Ом и 0,1 Ом производится зарядка тестируемого конденсатора.

3. При испытании проводят контроль эпюры напряжения на резисторе 0,1 Ом.

Данный метод позволяет отбраковывать неблагонадежные конденсаторы, которые способны вызвать лавинообразный эффект отказа в случае наличия внутренних дефектов изделий. Данный метод позволяет отбраковать дефекты с самовосстановлением, которые маскируются под надежные изделия.

Подобная методика описывается и в зарубежных работах [90-93]. О дефектах изготовления танталовых конденсаторов и методах их выявления упоминается в [94].

В работе [95] было уделено внимание такой важной теме как сохраняемость танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов. Автором была разработана методика ускоренной оценки сохраняемости конденсаторов, которая позволяет проводить оценку надежности (сохраняемости) конденсаторов с вновь примененными материалами. Методика заключается в воздействии повышенной

температуры без приложения электрической нагрузки (напряжения). Методика не позволяет проводить оценку наработки конденсаторов.

Но все вышеописанные методики, так или иначе не позволяют выявлять бракованные оксидно-электролитические конденсаторы до стадии эксплуатации.

Выводы по главе I

1. Конденсаторостроение – важная отрасль современной экономики. Необходимо уделять внимание проблемам конденсаторостроения, таким как: применение новых современных материалов, в том числе полимерных, совершенствование массо-габаритных характеристик, применение новых методов контроля качества.

2. Применение новых материалов для создания танталовых электролитических конденсаторов позволит обеспечивать требуемые характеристики, качество и надежность.

3. Существующие методики оценки качества оксидно-электролитических конденсаторов в рамках их изготовления не достаточны для выявления скрытых дефектов, необходима разработка принципиально нового метода оценки качества.

На основании анализа литературы были поставлены задачи:

1. Исследовать емкость, полное сопротивление, эквивалентное последовательное сопротивление и другие параметры оксидно-электролитических конденсаторов в широком частотном диапазоне в производственном цикле и оценить влияние их изменений на отказы конденсаторов.

2. На основании проведенных исследований обосновать возможность прогноза измеряемых параметров за границы поля допуска и разработать устройство для их контроля в производственном цикле до стадии эксплуатации.

3. Разработать методику и автоматизированную установку для ускоренных испытаний оксидно-электролитических конденсаторов до стадии эксплуатации, основанных на контроле эквивалентного последовательного сопротивления с приложением циклической повышенной нагрузки.

ГЛАВА II ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНДЕНСАТОРОВ

2.1 Дефекты производства при изготовлении конденсаторов и методы их поиска

При производстве электролитических конденсаторов применяются различные виды контроля, в том числе:

- входной контроль — проверка качества сырья и вспомогательных материалов, поступающих в производство. Постоянный анализ качества поставляемого сырья и материалов позволяет влиять на производство предприятий-поставщиков, добиваясь повышения качества.

- межоперационный контроль охватывает весь технологический процесс. Этот контроль иногда называют технологическим, или текущим. Цель межоперационного контроля — проверка соблюдения технологических режимов, правил хранения и упаковки продукции между операциями.

- выходной (приемочный) контроль — контроль качества готовой продукции. Цель выходного контроля — установление соответствия качества готовых изделий требованиям стандартов или технических условий, выявление возможных дефектов. Если все условия выполнены, поставка продукции разрешается.

Исходя из вышесказанного, основные дефекты при производстве электролитических конденсаторов можно разделить на несколько групп:

- дефекты, зависящие от качества материалов, используемых при производстве;

- дефекты, образующиеся при несоблюдении технологического процесса производства, в том числе и умышленно;

- дефекты, образовавшиеся при контроле параметров (измерения на пробой, испытания, и методы разрушающего контроля).

Таким образом:

К основным видам дефектов, зависящим от качества материалов, относятся:

- недостаточная емкость (не допускается использование не соответствующего материала при проверке на входном контроле);

- высокие токи утечек (не допускается использование не соответствующего материала при проверке на входном контроле).

К основным видам дефектов, образующимся при несоблюдении технологического процесса производства, можно отнести:

- не соблюдение технической гигиены (исключается периодическими контролями запыленности технических помещений и контролем использования средств личной гигиены при проведении летучих и сквозных проверок);

- не соблюдение технологических параметров указанных в технологической документации (исключается проведением летучих (внезапных) и сквозных (проводимых по графикам) проверок).

К основным видам дефектов, возникающих при контроле параметров, относится:

- недостаточная емкость («малоем»);
- уход емкости при перепадах температуры;
- дефекты внешнего вида;
- высокий ток утечки;
- механические повреждения;
- не качественный материал, из которого изготавливается конденсатор;
- нарушение техпроцесса.

Контролю качества производства конденсаторов, дефектам производства, посвящены статьи [96-104]. В [105,106] немало внимания уделено такому производственному фактору (дефекту) как статическое электричество. Именно оно может сыграть решающую роль в создании качественного танталового конденсатора. Если не обращать внимание на данный вопрос, то на выходе можно получить бракованную продукцию.

В [107] приведены основные этапы производства конденсаторов, рассмотрены возможные причины их отказов (дефекты) и методы устранения.

2.2 Подход к обеспечению качества при производстве электролитических конденсаторов и конденсаторов с ДЭС

При производстве электролитических конденсаторов и конденсаторов с ДЭС, необходимо рассматривать различный ряд факторов – таких как: субъективные и объективные факторы (рисунок 2.1) [108].

Субъективные факторы производства – это факторы влияния человека на выпускаемую продукцию, в том числе на процесс ее разработки и производства.

Объективные факторы – внешние воздействующие факторы и внутренние факторы.

В первую очередь, рассмотрим ошибки производства, как наиболее часто встречающиеся, при условии, что в ходе разработки, конструкторско-технологической проработке и постановке на производство было минимальное количество ошибок.



Рисунок 2.1 – Классификация факторов, влияющих на работоспособность электролитических конденсаторов и конденсаторов с ДЭС

Основные характеристики технологических процессов – точность и устойчивость. При выполнении технологических операций, даже при хорошо отлаженном и устоявшемся технологическом процессе, невозможно получить абсолютную повторяемость параметров изделий. Это связано с рядом причин:

- износ оборудования;
- неоднородность свойств материалов;
- погрешность средств контроля;
- человеческий фактор.

Эти причины приводят к появлению производственных погрешностей – отклонению параметров конденсаторов от номинальных данных, указанных в технической документации на них (рисунок 2.2).

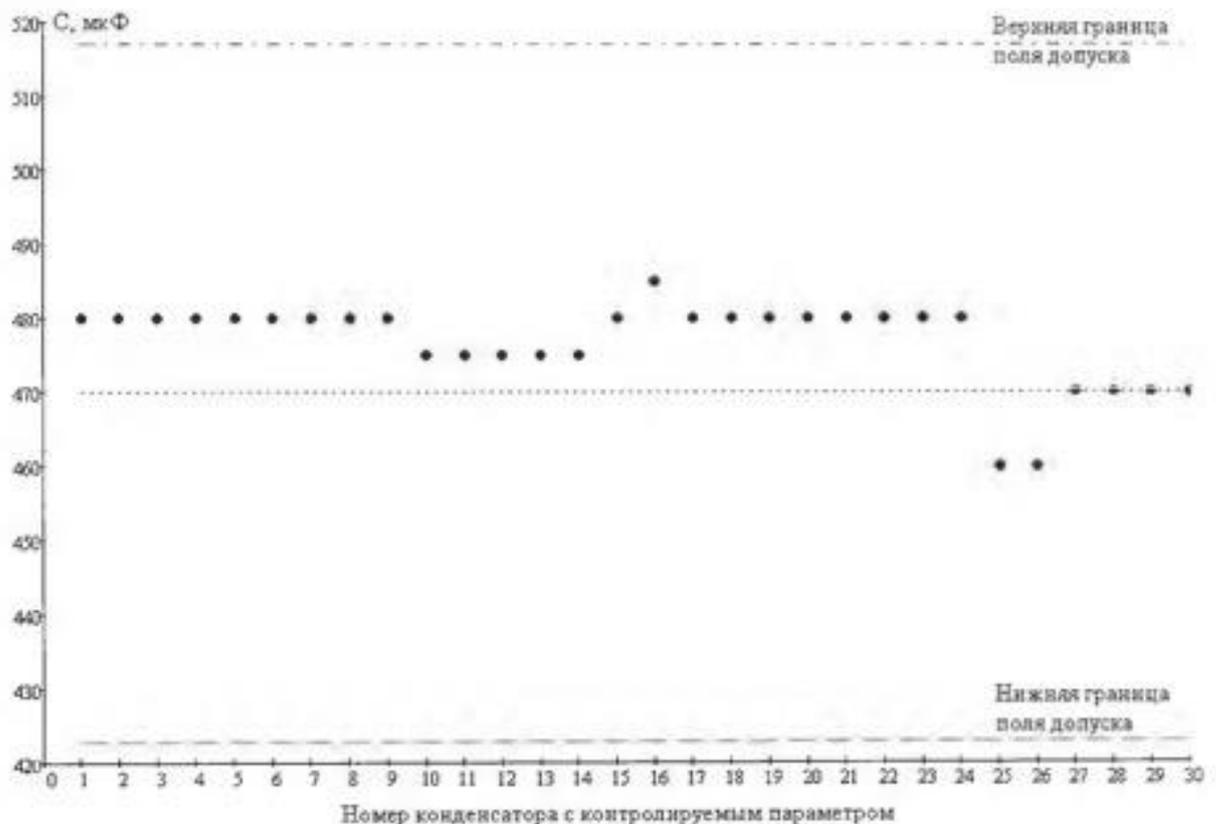


Рисунок 2.2 – Распределение контролируемой емкости конденсаторов серии К52-.. номиналом 63 В x 470 мкФ

В технологической документации погрешности задаются абсолютными значениями Δ и относительными значениями δ . Величина 2Δ (2δ) – поле допуска, в

которое и должны укладываться значения параметров выпускаемых конденсаторов.

Технологические операции представляют собой сложную систему, включающую различное технологическое оборудование, которое вносит дополнительные погрешности при проведении контроля выходных параметров.

Если число независимых входных параметров технологического оборудования не меняется со временем, то все входные параметры по своему влиянию на общую погрешность являются величинами одного порядка, и выходной параметр этой технологической операции будет подчиняться нормальному закону распределения Гаусса:

$$\Phi(y) = \frac{\exp\left[-\frac{(y-M)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right]}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \quad (2.1)$$

где $\Phi(y)$ – плотность распределения;

M – математическое ожидание этого распределения;

y – выходной параметр;

σ – среднеквадратичное отклонение.

Нормальное распределение обладает свойством, которым пользуются в контроле технологических операций. В области всей кривой распределения (рисунок 2.3) помещается 100% всех значений выходного параметра, а в границах $\pm 3\sigma$ (в поле рассеяния 6σ) укладывается 99,73% всех значений. .

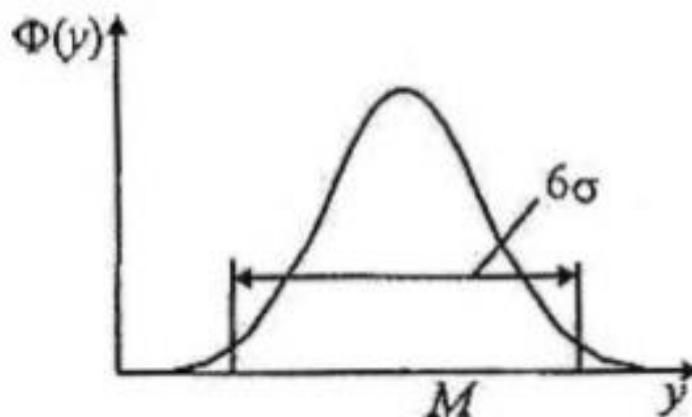


Рисунок 2.3– Кривая распределения значений выходного параметра

Помимо ошибок производства, происходят ошибки и на этапах проектирования новых изделий, т.е. решение проблем обеспечения высокого качества конденсаторов и конденсаторов с ДЭС невозможно добиться путем проведения единичных мероприятий, при заикливание на одной из стадий обеспечения качества конденсаторов, даже при контроле ключевых параметров. Нужно учитывать, что качество конденсаторов и конденсаторов с ДЭС очень сильно зависит от качества сырья, конструкционных материалов, внедрения высоких наукоемких технологий и методов организации производства.

2.3 Электрические свойства конденсаторов

Любой конденсатор можно представить [109] в виде пассивного двухполюсника (рисунок 2.4). Ток и напряжение на входе любого пассивного двухполюсника связаны законом Ома:

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \quad (2.2)$$

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I} \quad (2.3)$$

где \underline{Z} и \underline{Y} – входные комплексные сопротивления и проводимость двухполюсника.

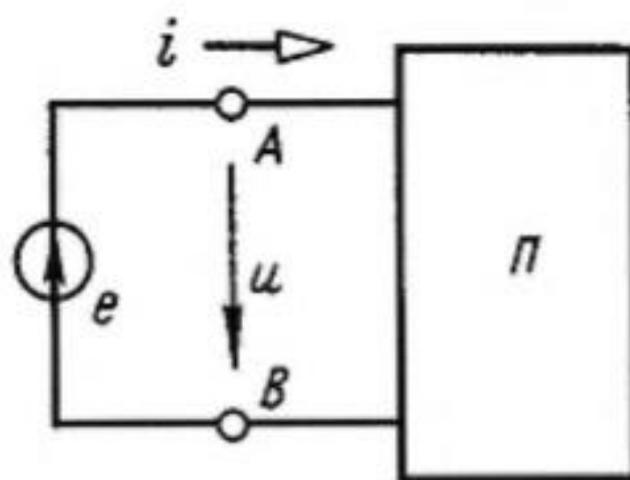


Рисунок 2.4 – Типичное представление последовательно включенного конденсатора в виде пассивного двухполюсника

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{r + jx} = \frac{r - jx}{r^2 + x^2} = \frac{r}{z^2} - j \cdot \frac{x}{z^2} = g - j \cdot b, \text{ где} \quad (2.4)$$

$$\text{т.о. } g = \frac{r}{z^2} \quad (2.5)$$

$$b = \frac{x}{z^2} \quad (2.6)$$

и наоборот:

$$r = g \cdot z^2 = \frac{g}{y^2} \quad (2.7)$$

$$x = b \cdot z^2 = \frac{b}{y^2} \quad (\text{рисунок 2.5}) \quad (2.8)$$

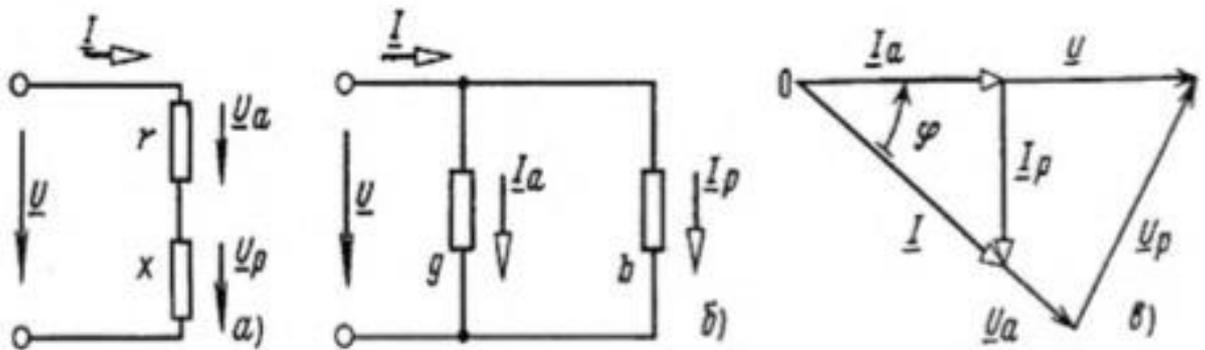


Рисунок 2.5 – Эквивалентные схемы пассивных двухполосников:

а – последовательная эквивалентная схема;

б – параллельная эквивалентная схема;

в – распределение векторов токов и напряжений

Из полученных соотношений, можно сделать вывод, что b и x всегда имеют одинаковый знак. Для последовательной RLC-цепи получаем:

$$r = \frac{g}{g^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C\right)^2} \quad (2.9)$$

$$x = \frac{\left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C\right)}{g^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C\right)^2} \quad (2.10)$$

Эквивалентную последовательную схему замещения реального конденсатора так же можно рассматривать в качестве последовательного колебательного контура (рисунок 2.6).

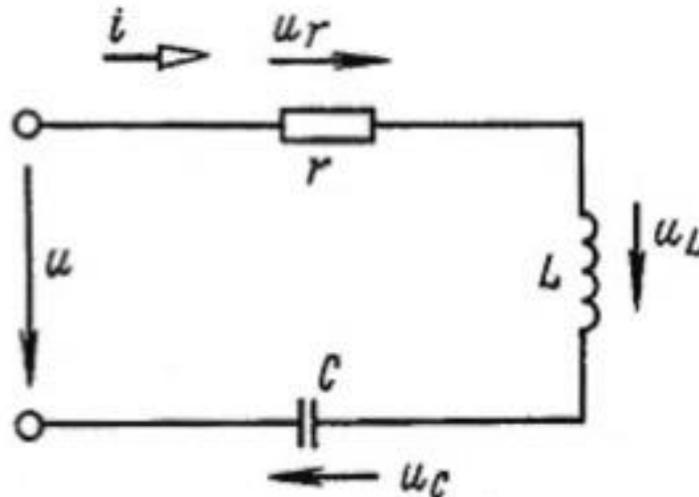


Рисунок 2.6 – Представление последовательной схемы замещения реального конденсатора в качестве последовательного колебательного контура.

Ток для RLC-цепи определяется:

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t + \psi_i) \quad (2.11)$$

На основе второго закона Кирхгофа имеем:

$$u_r + u_L + u_C = U, \quad (2.12)$$

$$\text{где } u_r = r \cdot i = r \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_i) \quad (2.13)$$

$$u_L = \frac{L di}{dt} = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi_i) = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_i + \frac{\pi}{2}) \quad (2.14)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{I_m}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi_i) = \frac{I_m}{\omega \cdot C} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_i - \frac{\pi}{2}) \quad (2.15)$$

Постоянная интегрирования в выражении для u_C , принята равной нулю, т.к. в установившемся режиме, напряжение на участке цепи синусоидальное.

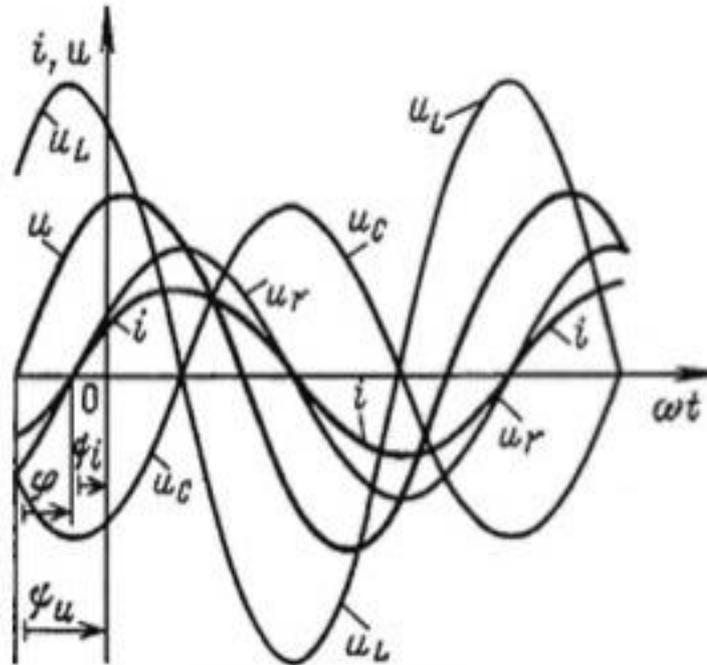


Рисунок 2.7 – Смещение тока и напряжения при последовательном соединении резистивного, индуктивного и емкостного элементов

Из полученных выражений для u_r , u_L и u_C видно, что напряжение на сопротивлении совпадает по фазе с током, напряжение на индуктивности опережает ток по фазе на угол $\pi/2$, а напряжение на емкостном элементе отстает по фазе от тока на угол $\pi/2$ (рисунок 2.8).

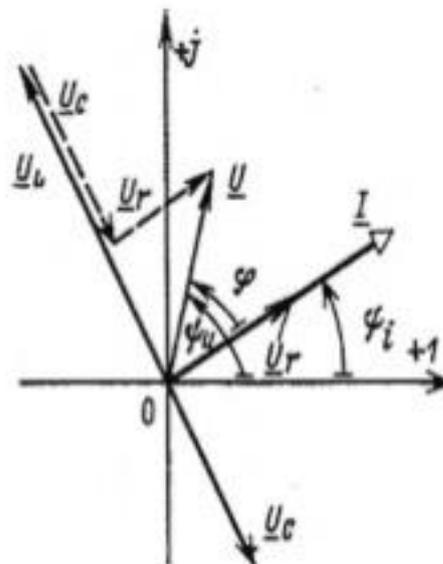


Рисунок 2.8 – Представление второго закона Кирхгофа для RLC-цепи в векторной форме

2.4 Основные электрические характеристики электролитических конденсаторов и методы их контроля

К основным (контролируемым) характеристикам конденсаторов относят [110]:

1. Емкость C (мкФ) – способность конденсатора к накоплению электрического заряда для последующей отдачи.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2.16)$$

где Q – заряд конденсатора, Кл;

U – напряжение на конденсаторе, В.

При производстве конденсаторов для контроля емкости используется метод 501 ГОСТ 28885-90. Допускается использовать любой метод измерений – мостовой, резонансный, сравнения напряжения и токов и другие. Как правило, если в технических условиях на конденсаторы или технологической документации не указано иное, измерения проводят на частоте 50 Гц. Измерение емкости конденсатора, как правило, необходимо проводить при подаче переменного синусоидального напряжения, значение которого не должно превышать 5 В или иных значений, указанных в НТД.

2. Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ (%). Он характеризует потери в конденсаторе при синусоидальном напряжении определенной частоты.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{Q}, \quad (2.17)$$

где P – активная мощность;

Q – реактивная мощность

При производстве конденсаторов для контроля тангенса угла потерь используется метод 502 ГОСТ 28885-90.

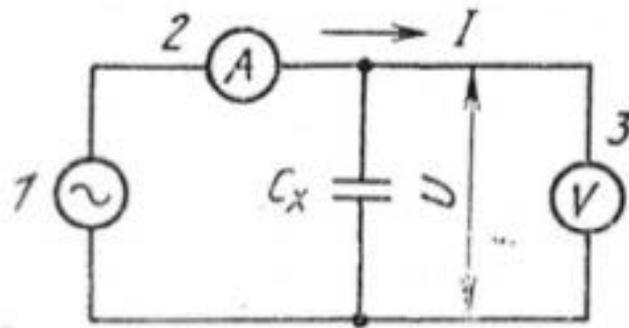
3. Ток утечки I_{yT} (мкА) – это ток проводимости. Контролируется при постоянном напряжении.

При производстве конденсаторов для контроля тока утечки используется метод 504 ГОСТ 28885-90. Время измерения тока утечки для оксидно-электролитических конденсаторов составляет 5 мин \pm 10 с.

4. Полное сопротивление Z (Ом).

При производстве конденсаторов для контроля полного сопротивления используется метод 509 согласно ГОСТ 28885-90.

Полное электрическое сопротивление, как правило, измеряют методом вольтметра-амперметра по следующей схеме (рисунок 2.9).



1 – источник измерительного напряжения,

2 – амперметр,

3 – вольтметр,

C_x – измеряемый конденсатор

Рисунок 2.9 – Схема измерения полного сопротивления

Полное электрическое сопротивление (Z) в Омах определяют по формуле:

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (2.18)$$

где U – измеренное значение на конденсаторе, В;

I – измеренное значение тока через конденсатор, А.

Частота измерительного напряжения для оксидно-электролитических конденсаторов составляет 10 кГц.

5. ЭПС конденсаторов $R_{\text{экв}}$ (Ом).

У электролитических конденсаторов оно, главным образом, связано с сопротивлением материала, контактирующего с отрицательно заряженной стороной диэлектрика.

По многим причинам реакцию танталового электролитического конденсатора на изменчивый сигнал можно смоделировать последовательной комбинацией емкости, сопротивления и индуктивности. Значения емкости и сопротивления

зависят в определенной степени от частоты сигнала. Однако при любой отдельной частоте значение характеристики можно отнести к ЭПС и емкости или индуктивности (ЭПИ). Эквивалентная последовательная индуктивность частично связана с телом/анодом конденсатора и частично с выводами: значение ЭПИ выводов пропорционально длине вывода конденсатора после монтажа в цепь. Если длина вывода мала, действие индуктивности можно игнорировать при частотах ниже 100 КГц.

О емкости можно говорить там и тогда, когда 2 проводника разделены изолятором. В случае танталового конденсатора анодом является тантал, обычно в виде пористого тела из спеченного порошка; у фольгового конденсатора анодом является гладкая или травленая тонкая полоска фольги. Изолятором служит тонкий оксидный слой поверхности анода, толщина слоя пропорциональная номинальному напряжению конденсатора. Вторым проводником в жидкостном танталовом конденсаторе является электролит, который заполняет пространство между анодом и корпусом конденсатора с нанесенной и оксидированной танталовой суспензией. У фольговых конденсаторов вторым проводником аналогично является электролит, которым пропитана тонкая бумажная прокладка.

Для связи секции с выводами применяются другие материалы. Например, в твердотельном конденсаторе двуокись марганца покрывают слоем углерода. Затем слоем металла, таким, как серебро. Слой металла затем соединяют с отрицательным выводом или корпусом пайкой. У фольговых конденсаторов вторая полоса танталовой фольги намотана в секцию вместе с анодной фольгой и пропитанной электролитом бумажной прокладкой, что обеспечивает электролитический контакт с электролитом. Соединение с положительным выводом обеспечивают пайкой никелевой или стальной проволоки с танталовой проволокой, прикрепленной к аноду.

ЭПС, главным образом, представляет собой сопротивление соприкасающихся материалов плюс потери изолятора (оксид тантала). При низких частотах потери изолятора наиболее значительны, но, поскольку их величина снижается с

увеличением частоты, в конечном итоге они становятся незначительными по сравнению с сопротивлением соприкасающихся материалов.

Типичная взаимосвязь ЭПС и частоты показана на рисунке 2.10. Доля потерь изолятора в ЭПС, обычно составляет $500/fc - 1500/fc$ при комнатной температуре, где f – частота в герцах, c – емкость в микрофарадах.

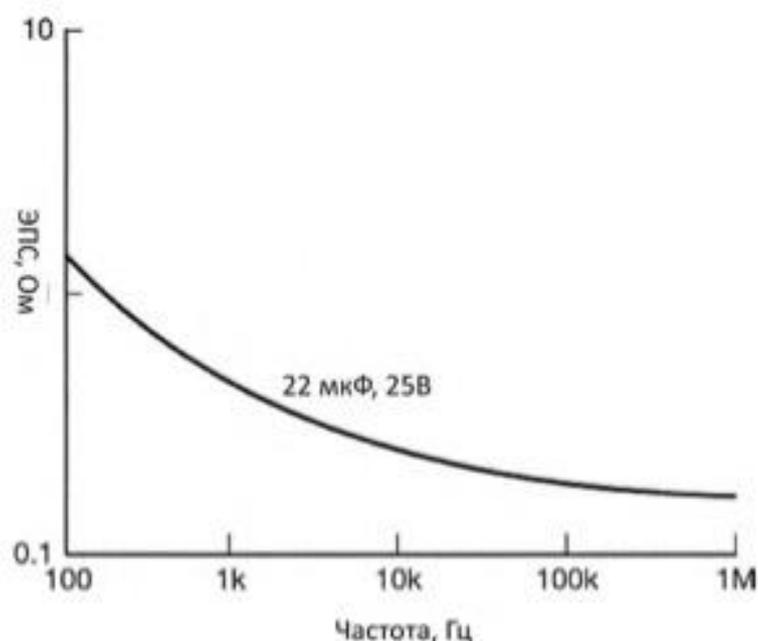


Рисунок 2.10 – Типичная зависимость ЭПС и частоты.

Потери изолятора в незначительной степени зависят от температуры, они возрастают примерно вдвое с изменением температуры от комнатной до 125°C. Большая часть оставшейся величины ЭПС оксидно-электролитического танталового конденсатора – это сопротивление электролита, соприкасающейся с катодной поверхностью нанесенной оксидированной суспензией тантала. В фольговом конденсаторе – это сопротивление электролита при его взаимодействии с катодной фольгой.

Проведем анализ параметра ЭПС на примере танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов с твердым электролитом.

Анализ сопротивления двуокиси марганца говорит о его комплексном составе, поскольку как удельное сопротивление, так и геометрические размеры конденсатора зависят от технологии производства. Опубликованные значения удельного сопротивления двуокиси марганца для материала, полученного при

пиролизе нитратного раствора, как в твердотельных конденсаторах, отмечаются по меньшей мере коэффициентом 10^4 . Частично это объясняется отклонением от стехиометрии и размером отдельного кристаллита. В отношении конденсатора все это осложняется еще и разницей пористости анода, размерах пор и заполненности пор двуокисью марганца.

Хотя потери изолятора большей частью постоянны у конденсаторов одной серии, почти всегда разница в значениях ЭПС связана с двуокисью марганца. Фирмы – изготовители прилагают большие усилия, чтобы добиться неизменно низкого сопротивления.

Часть сопротивления двуокиси марганца связана с внешней поверхностью пористого анода и может считаться истинным последовательным сопротивлением. Оставшаяся часть сопротивления, связанная с пористостью анода, возрастает с приближением к центру анода.

Это явление можно представить на схеме с распределенными параметрами сопротивления/ емкости на рисунке 2.11.

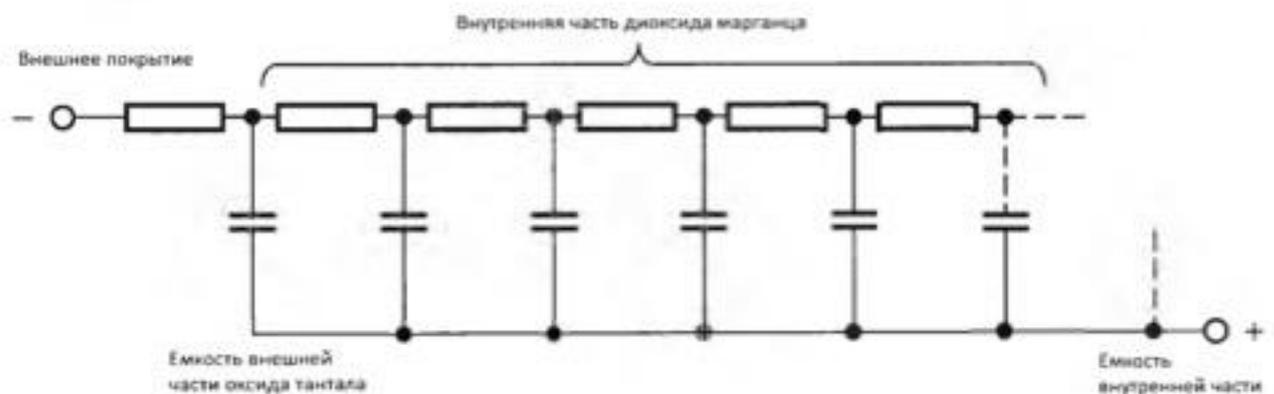


Рисунок 2.11 – Схема с распределенными параметрами сопротивления двуокиси марганца и емкости оксида Ta

По этой схеме эквивалентная последовательная емкость и сопротивление уменьшаются с увеличением частоты (рисунок 2.12). Частота, на которой происходит максимальное снижение емкости, зависит от значения емкости на единицу объема и от соответствующего внутреннего сопротивления. При более низких частотах с увеличением емкости на единицу объема увеличивается и

упомянутый эффект до тех пор, пока не будут приняты меры для снижения внутреннего сопротивления. Схожий, хотя и не столь явный эффект характерен для ямок травления фольгового конденсатора.

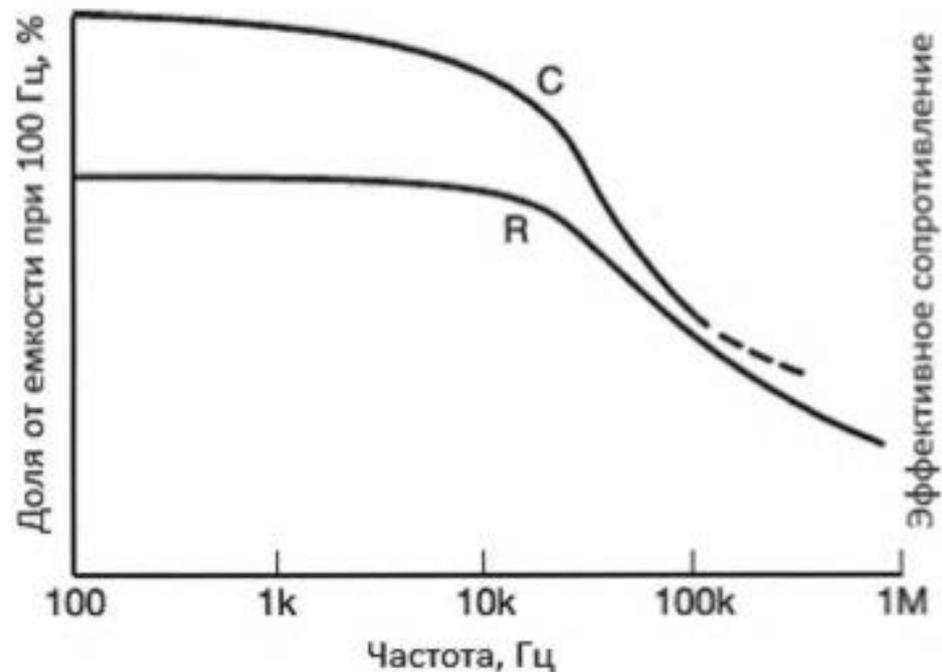


Рисунок 2.12 – График зависимости по схеме на рисунке 2.11

Удельное сопротивление двуокиси марганца снижается с увеличением температуры; оно почти наполовину меньше при повышении температуры до 85°C и увеличивается при падении температуры до минус 55°C. В некоторой степени это нейтрализует зависимость потерь изолятора от температуры.

При очень низких частотах (ниже 1Гц) следует принять во внимание еще два механизма потерь, а именно, ток утечки и потери в диэлектрике.

Как видно из рисунка 2.13 ток утечки конденсаторов эквивалентен параллельному сопротивлению. При любой частоте оно может быть представлено, как последовательное сопротивление по формуле:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R \cdot P}{(2\pi \cdot f \cdot C_p \cdot R_p) \cdot 2 + 1} \quad (2.19)$$

где C_p – эквивалентная параллельная емкость в фарадах;

R_p – параллельное сопротивление;

$$R_p = \frac{U}{I'} \quad (2.20)$$

U – прикладываемое постоянное напряжение, В;

I' – ток утечки, А.

Значение C_p приблизительно соответствует значению эквивалентной последовательной емкости при 120 Гц. Доля параллельного сопротивления в ЭПС приблизительно выводится формулой:

$$C_p = \frac{10^5 \cdot X}{4 \cdot C_{120} \cdot f^2}, \quad (2.21)$$

где f – частота измерения (120 Гц),

а X получено по формуле:

$$X = I_{yT} \cdot U \quad (2.22)$$

Например, при токе утечки $0,001 \text{ мкА/мкФ} \cdot U$ для конденсатора с емкостью 10 мкФ при частоте 1 Гц доля параллельного сопротивления в ЭПС составляет 2,5 Ом.

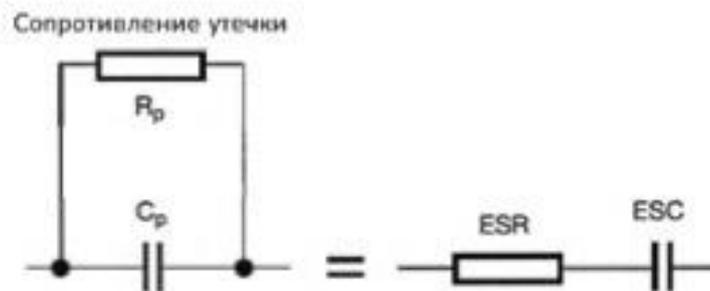


Рисунок 2.13 – При любой частоте действие тока утечки ЭПС

При 120 Гц доля параллельного сопротивления в ЭПС будет абсолютно ничтожна – 0,00017 Ом. При низких частотах также следует считаться с еще одним механизмом – диэлектрическими потерями, которые можно представить как совокупную емкость элементов, соединенных с главным конденсатором через элементы с очень высоким последовательным сопротивлением (рисунок 2.14).

Хотя диэлектрические потери крайне важны при определенном применении конденсатора из-за заряда, которым обладают дополнительные емкостные элементы, влияние главного конденсатора на величину ЭПС относительно мало.

Каждый отдельно взятый дополнительный емкостный элемент обладает очень высоким последовательным сопротивлением и это объясняет высокие значения временных постоянных перемещений заряда, присущих для процесса диэлектрических потерь. Однако, в совокупности доля емкостных элементов в ЭПС незначительна.

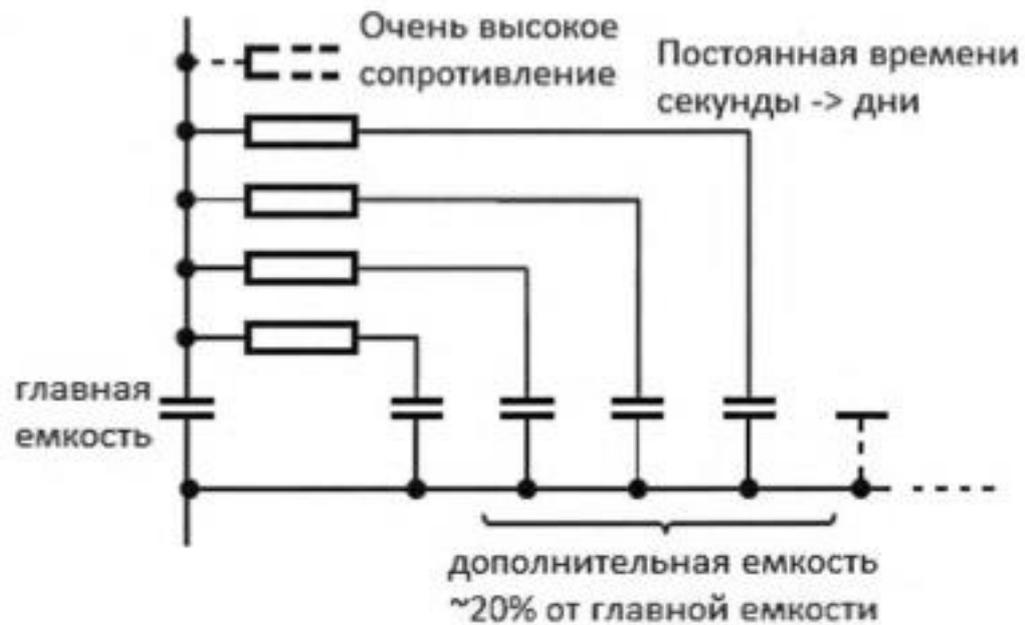


Рисунок 2.14 – Диэлектрические потери

Резистивное (тепловое) влияние, производимое ЭПС, может влиять на работу конденсатора несколькими путями. Во-первых, из-за потерь I^2R , в конденсаторе регенерируется энергия. Температура, которую приобретает компонент, зависит от баланса между потерей энергии и интенсивностью рассеяния энергии с внешней поверхности. Установив максимальную разницу температур между конденсатором и окружающей средой, можно определить номинальный ток пульсации.

Во-вторых, резистивный элемент увеличивает полное сопротивление до значения выше емкостного сопротивления. Это снижает эффективность использования конденсатора в целях фильтрации и развязки.

В-третьих, сдвиг фаз у кривых напряжения и тока составляет приблизительно 90° . Это может вызвать искажение в цепях с подобной формой кривой. Наконец,

интенсивность, с которой конденсатор сохраняет или отдает заряд энергии, контролируется составляющей емкости и ЭПС – "постоянной времени".

Для получения низкого ЭПС у твердотельного танталового конденсатора следует привести в соответствие и тщательно проконтролировать плотность анода, отношение ширины анода к высоте и процедуру осаждения на аноде двуокиси марганца. За многие годы цену на эти конденсаторы удалось снизить благодаря снижению содержания тантала с применением высококачественных порошков с высоким значением отношения площади поверхности к весу.

Если такие качественные порошки использовались бы с той же плотностью прессования, что и раньше, ЭПС было бы значительно выше. Во избежание этого, плотность анода снизили, а порошок поставляют в виде смеси крупно – и мелкозернистого порошка. Вряд ли современные технологии могут обеспечить значительное снижение уровня ЭПС, поэтому в цепях со строгим ограничением по максимальному значению ЭПС следует особый выбор порошка.

2 электрода со сверхпроводимостью, разделенные вакуумом, обладают емкостью практически без потерь. Однако, подобная система не имеет практического применения из-за слишком низкой емкости на единицу объема. Чтобы увеличить величину емкости на единицу объема, следует заменить вакуум изолирующим материалом с большей диэлектрической проницаемостью. Она зависит от выравнивания зарядов электронов, атомов или молекул в электрическом поле. Подобное выравнивание связано с движением частиц в вязкой среде и, следовательно, приводит к потерям при трении. Самый удобный способ выразить эти потери – это ЭПС конденсатора (либо смежные характеристики – коэффициент рассеяния). Замена сверхпроводников нормальными электродными материалами приводит к тепловым потерям другого характера. Это относится к любой конструкции электронного конденсатора; независимо от типа диэлектрика.

Общепринятый способ предусмотреть коэффициенты потерь электролитического конденсатора – это свести их к вычисленному значению ЭПС. Это значение получают путем измерения либо емкости плюс $\text{tg } \delta$ либо полного сопротивления плюс фазовый угол.

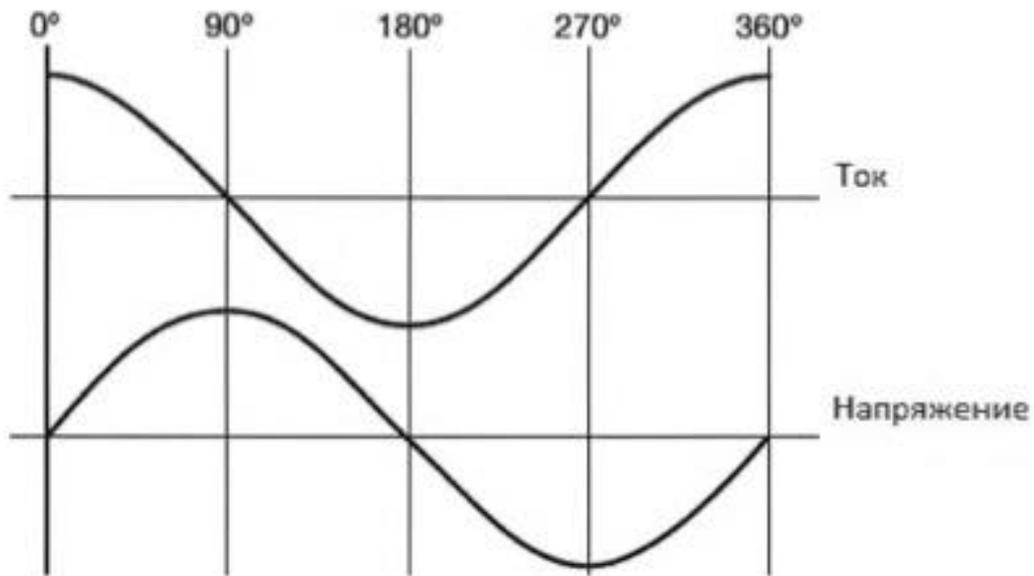


Рисунок 2.15 – Кривые тока и напряжения для идеального конденсатора

Чтобы понять связь между этими характеристиками, рассмотрим вначале связь между кривыми тока и напряжения, когда на конденсатор подают переменный сигнал синусоидальной формы. У идеального конденсатора кривая тока отражает кривую напряжения на 90° . (рисунок 2.15). На практике фазовый угол \varnothing любого конденсатора будет меньше 90° , т.е. его величина будет лежать между величинами фазовых углов идеального конденсатора и идеального резистора. Разница между фазовым углом и 90° есть угол δ . Косинус \varnothing – коэффициент мощности: при низких значениях, до 0,2, он почти идентичен $\text{tg} \delta$, который легко измерить. 100- кратное значение $\text{tg} \delta$ – это коэффициент рассеяния, выраженный в процентах.

Уравнения, касающиеся этих характеристик:

$$\varnothing = 90^\circ - \delta \quad (2.23)$$

$$\text{коэффициент мощности} = \cos \varnothing$$

$$\text{коэффициент рассеяния} = 100 \text{ tg } \delta$$

$$\text{tg } \delta = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot R, \quad (2.24)$$

где C и R – емкость и ЭПС

$$\text{tg } \delta = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} \quad (2.25)$$

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi + 1}} \quad (2.26)$$

Использование характеристик «коэффициент мощности», «коэффициент рассеяния» и $\operatorname{tg} \delta$ для танталовых конденсаторов обычно ограничивается частотами, при которых индуктивность не важна. Сопротивление в широком диапазоне частот характеризуется полным сопротивлением и, если необходимо, фазовым углом. Полное сопротивление Z связано с емкостью индуктивностью формулой:

$$Z = R + \frac{1}{j2\pi \cdot f \cdot C} + j2\pi \cdot f \cdot L = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(2\pi \cdot f \cdot C)^2} + (2\pi \cdot f \cdot L)^2} \quad (2.27)$$

ЭПС можно найти через значение импеданса и разности фаз:

$$R = Z \cdot \cos \varphi \quad (2.28)$$

При производстве конденсаторов оксидно-электролитических алюминиевых серии К50-..., объемно-пористых танталовых К52-..., оксидно-полупроводниковых К53-.. стандартной конструкции (в стальном корпусе), как правило, ЭПС не контролируется. При необходимости контроль ЭПС осуществляется методом согласно раздела 5.8 ГОСТ Р МЭК 60384-1-2003.

При производстве конденсаторов с ДЭС К58-... ЭПС контролируется на постоянном токе [111].

2.5 Проблемы контроля качества оксидно-полупроводниковых конденсаторов при использовании режима «Inrush-test»

Принцип Inrush теста [112] или, как его еще называют, импульсного тестирования заключается в подаче напряжения, равного номинальному, в виде пакета импульсов (от 1 до 5) на испытуемый конденсатор. При этом длительность подаваемых импульсов такова, что время заряда испытуемого конденсатора составляет 5 мс, а время разряда 20 мс (рисунок 2.16). Испытания производятся по схеме, приведенной на рисунке 2.20.

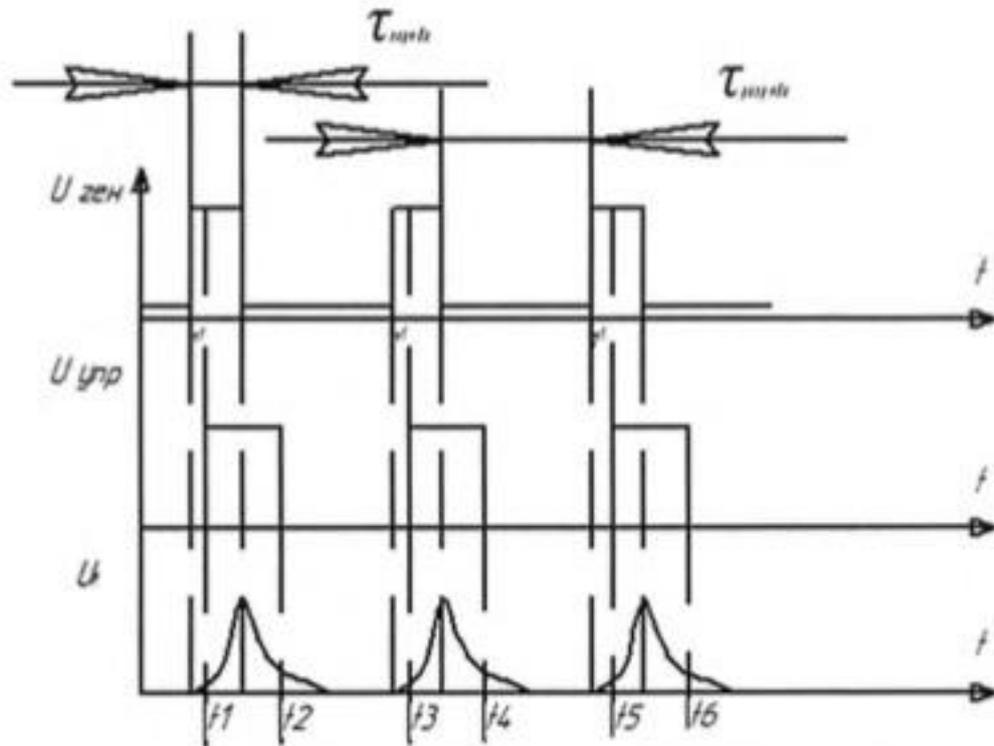


Рисунок 2.16 – Временные диаграммы проведения inrush теста.

В моменты времени $t_1, t_3, t_5 \dots$ $U_R \leq U_{упр.сравнения}$ – тогда конденсатор считается годным, в случае невыполнения этого условия конденсатор является непрошедшим тест.

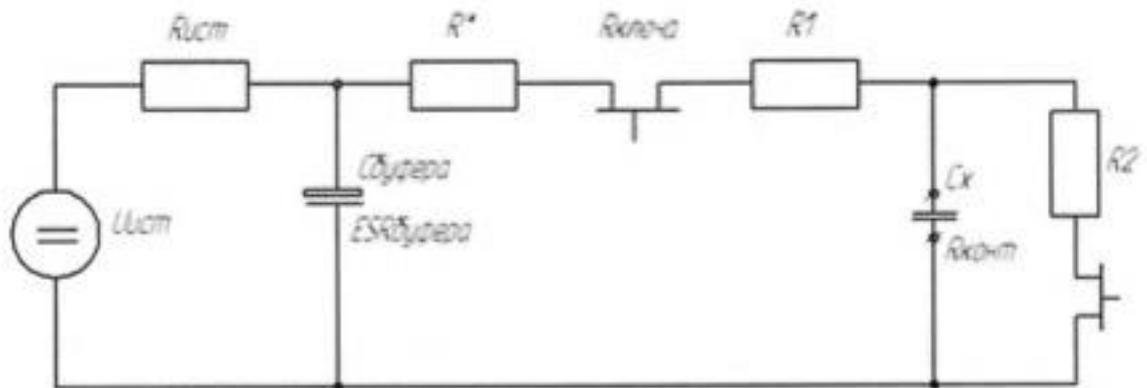


Рисунок 2.17 – Схема проведения inrush-test.

C_x – испытуемый конденсатор

$C_{буфера}$ – накопительные конденсаторы емкостью 500000 мкФ

ЭПС буфера – ЭПС накопительных конденсаторов < 20 мОм

R_1 – сопротивление источника

R_3 – сопротивление заряда

- R4 – сопротивление полевого транзистора (ключа) в открытом положении
 R5* - сопротивление реле + сопротивление дорожек платы + сопротивление проводов
 R6 – ЭПС испытываемого конденсатора
 R7 – сопротивление контактов
 R8 – разрядное сопротивление и сопротивление транзистора (ключа) для разряда конденсатора
 T1 – транзистор (ключ) для заряда испытываемого конденсатора
 T2 – транзистор (ключ) для разряда испытываемого конденсатора

$U_{ист} = U_{тестирования}$

$R^* = R_{реле} + R_{печатного\ монтажа} + R_{проводов} \approx 20\text{ мОм}$

$R2 + R3 + R4 + R5^* + R_{контакт} < 0,5\text{ Ом}$

Условия проведения испытаний:

1. Измерение параметров конденсаторов: $T_{окр} = 20^{\circ}\text{C}$; $I_{ут}$ за 1 мин.
2. Inrush-test: $t_{зар} = t_{разр} = 0,5\text{с}$; каждый конденсатор проходит 5 циклов зарядки/разрядки; сопротивление в разрядной цепи каждого конденсатора не более 0,35 Ом; выдержка при -55°C не менее 30 мин; выдержка при 85°C (с учетом переноса конденсаторов из камеры в камеру) не более 5 мин.

Основной проблемой при проведении Inrush-test является влияние пульсирующего тока. Теплоту, образованную пульсацией, можно вычислить по формуле I^2R , где I – действующее значение тока при заданной частоте, а R – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора при той же частоте. Для эквивалентного последовательного сопротивления следует брать наихудшее ожидаемое значение для данного габарита и температуры (обычно основывается на значении, вычисленном из предельного значения фактора рассеяния (тангенса угла диэлектрических потерь) на частотах 100..120 Гц и предельных значений полного сопротивления при повышенных частотах).

Теплота, генерируемая током утечки, по величине равна произведению силы тока на прилагаемое напряжение. При вычислении принимается, что это

максимальное предельное значение тока утечки при номинальном напряжении. В случаях, когда напряжение возрастает до импульсного напряжения, выделяется большее количество теплоты, оно зависит от длительности импульса. Выделение теплоты увеличивается с увеличением температуры, поскольку ток утечки может возрасти в 10 раз при возрастании температуры от комнатной до + 85°C. При температуре выше + 85°C необходимо снизить допустимое напряжение, т.к. с возрастанием температуры увеличивается ток утечки. Теплота, выделяемая при увеличении тока утечки, компенсирует снижение напряжения при температуре + 85°C.

При высоких частотах большая часть теплоты образуется, во внешних слоях анода. Поскольку теплота рассеивается вовне от анода, самая высокая температура по принципу равновесия будет в центре анода, даже при высокой частоте.

В целом, чем выше температура окружающей среды, тем ниже допустимый температурный дифференциал. Температурный дифференциал представляет собой разность разности температур между анодом и поверхностью корпуса и разности температур между корпусом и окружающим воздухом. Последнюю величину измерить гораздо проще, поэтому обычно устанавливают конструктивно максимальное значение этой разницы и допускают, что разница температур между анодом и поверхностью корпуса настолько мала, что ею можно пренебречь.

Вопросам проведения Inrush теста посвящены работы [113-125]. В них проводилось полное исследование Inrush теста, коммутационных элементов, особенности испытания танталовых конденсаторов большими значениями токов.

Но очень важно проводить оценку влияния импульсного тестирования на танталовый конденсатор, о чем и говорит автор [126] «...Механические напряжения, развиваемые при протекании зарядных токов, будут распределены неравномерно в объеме конденсатора вследствие его пористой структуры. Поэтому наибольшие механические напряжения будут сосредоточены в локальных областях. В этих областях будет наблюдаться аномально большая плотность тока, что будет приводить к перегреву этих областей и дальнейшему развитию пробоя...».

Inrush тест применим к конденсаторам танталовым, чип-исполнения с твердым (марганцевым) электролитом и не применим для танталовых конденсаторов с жидким электролитом (данный тип конденсаторов хорошо «проглаживает» импульсы напряжения).

2.6 Приборы для контроля качества конденсаторов

Все приборы, использованные для контроля параметров и проведения исследований прошли поверку или аттестацию.

1. При измерении параметров электролитических конденсаторов был использован измеритель иммитанса E7-20 (рисунок 2.18). Он предназначен для измерения электрических параметров конденсаторов при синусоидальном напряжении. Основой измерения данного прибора является параллельная или последовательная двухэлементная схема замещения.



Рисунок 2.18 – Внешний вид измерителя иммитанса E7-20

Т а б л и ц а 2.1 – Условия применения измерителя иммитанса Е7-20

| Условия, которых применен прибор | Характеристики прибора | Значения характеристик |
|----------------------------------|---------------------------------|--|
| Нормальные | температура окружающего воздуха | $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ |
| | относительная влажность воздуха | от 30 % до 80 %; |
| | атмосферное давление | от 84 до 106 кПа (от 630 до 795 мм рт.ст). |

Прибор позволяет проводить контроль емкости (от 0,001 пФ до 1 Ф) и ЭПС (от 0,01 мОм до 1 Гом). Остальные характеристики приведены в соответствующих паспортах. Прибор проходит своевременную поверку.

2. Для измерения электрических параметров конденсаторов с ДЭС использовался потенциостат-гальваностат Р-20Х8 (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Внешний вид потенциостата-гальваностата Р-20Х8

Потенциостаты-гальваностаты типа Р предназначены для воспроизведения напряжения и силы постоянного тока на рабочих электродах электрохимической ячейки в процессе электрохимических исследований.

Пределы допускаемой приведенной погрешности воспроизведения силы постоянного тока составляет: $\pm 0,5\%$ (для диапазонов от минус 2 до 2 А; от минус

200 до 200 мкА); $\pm 0,1\%$ (для остальных диапазонов); пределы допускаемой приведенной погрешности воспроизведения напряжения постоянного тока составляет $\pm 0,1\%$

Прибор имеет аттестат аккредитации ФГУП «ВНИИМС» по проведению испытаний средств измерений в целях утверждения типа №30004-13 от 26.07.2013 г.

3. Приборы, использованные при проведении СТРЕСС-ТЕСТА:

3.1 Источник питания SM 66-AR-110 (рисунок 2.20) – предназначен для воспроизведения постоянного напряжения и силы постоянного тока.



Рисунок 2.20 – Источник питания SM 66-AR-110

Прибор проходит своевременную поверку.

3.2. Термометр сопротивления платиновый вибропрочный ТСПВ-1.1

Термометры сопротивления платиновые вибропрочные ТСПВ предназначены для измерений температуры в диапазоне от минус 80°C до 500°C .

Принцип действия термометров платиновых вибропрочных ТСПВ (рисунок 2.21) заключается в использовании температурной зависимости электрического сопротивления платины. Термометры сопротивления платиновые вибропрочные ТСПВ состоят из чувствительного элемента (ЧЭ), защитного корпуса из нержавеющей стали и четырехжильного кабеля. ЧЭ представляет собой платиновый резистор с двумя выводами, к каждому из которых привариваются (припаиваются) по два высокотемпературных удлиняющих провода. К удлиняющим проводам припаивается кабель, служащий для подключения термометра к электроизмерительной аппаратуре. Свободное

пространство внутри защитного корпуса заполнено порошком оксида алюминия. Кабель закреплён и уплотнён герметично в верхнем конце защитного корпуса. Термометр может быть оснащён рукояткой.



Рисунок 2.21 – Термометры сопротивления платиновые вибропрочные ТСПВ

В термометре модификации ТСПВ-1.1 используется платина с температурным коэффициентом сопротивления не менее 0,00384. Термометры сопротивления платиновые вибропрочные ТСПВ градуируются индивидуально с применением процедур и приёмов описания связи температуры с относительным сопротивлением чистой платины, установленных в температурной шкале МПШ-90.

Основные характеристики ТСПВ-1.1 приведены в таблице 2.2.

Т а б л и ц а 2.2 – Характеристики ТСПВ-1.1

| Характеристика | Значение |
|---|-----------|
| Диапазон измеряемых температур, °С | -80...200 |
| Абсолютная доверительная погрешность при доверительной вероятности 95 %, °С | ± 0,1 |

Поверка осуществляется по методике, изложенной в документе «Термометр сопротивления платиновый вибропрочный ТСПВ. Методика поверки» МП РТ 1715-2012, утвержденной ГЦИ СИ ФБУ «Ростест– Москва» в 2012 г.

3.3. Измеритель-регулятор температуры 2ТРМ1-Щ2.У.РР.

Терморегулятор 2ТРМ1 (рисунок 2.22) использован для поддержания заданной температуры



Рисунок 2.22 – Терморегулятор 2ТРМ1

Терморегулятор 2ТРМ1-Щ2.У.РР зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений. Проходит своевременную поверку.

4. Приборы, использованные для контроля внешнего вида анодов электролитических конденсаторов

Для контроля внешнего вида анодов танталовых объемно-пористых конденсаторов был использован микроскоп инструментальный ИМЦЛ 150х50Б (рисунок 2.23), который позволяет проводить увеличение изображения до 10 крат.



Рисунок 2.23 – Микроскоп инструментальный ИМЦЛ 150х50Б

Микроскоп проходит своевременную поверку.

Выводы по главе II

1. Качество конденсаторов и конденсаторов с ДЭС оценивается по их электрическим характеристикам. Электрические характеристики конденсаторов и конденсаторов с ДЭС контролируются соответствующими методиками.

2. Для контроля электрических характеристик применяются методы согласно ГОСТ, либо аттестованные методики измерений. Для измерения электрических характеристик изделий применяются поверенные приборы и аттестованное оборудование.

3. Существующие методы оценки качества (такие как применяемый Inrush тест) не обеспечивают должный контроль качества конденсаторов, так как скрытые дефекты, в том числе самовосстанавливающиеся не всегда выявляются на стадии изготовления.

4. Приборная база для проведения исследований и экспериментов имеет сведения о поверке.

ГЛАВА III ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОКСИДНО- ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

3.1. Анализ характерных зависимостей импеданса и ЭПС электролитических конденсаторов от частоты

Одним из важнейших направлений в обеспечении коммутации источников питания, микропроцессоров и цифровых схем является достижение умеренного шума при работе на повышенных частотах. Чтобы реализовать это, требуются компоненты с низким ЭПС, высокой емкостью и высокой надежностью [127].

Ни один конденсатор невозможно представить без паразитных элементов. Материал, используемый в качестве обкладок конденсаторов не является сверхпроводником (идеальным проводником), в связи с чем неминуемо происходит потеря мощности, связанная с поведением диэлектрика, соединяющегося с электрическим полем между пластинами. Ток в пластинах и за их пределами должен проходить по траектории, определенной размерными свойствами конденсаторных пластин, траектории ограничены, и ток должен заполнять эти траектории. Ограничение допустимого движения тока определяет эффективную последовательную индуктивность конденсатора.

Значение ЭПС определяется тремя переменными:

$$R_{\text{экс}} = R_0 + R_d + R_e(T), \quad (3.1)$$

где:

R_0 - константа, определяемая сопротивлением пленки и внутренних соединений.

R_d – составляющая, зависящая от частоты:

$$R_d = \frac{D_{\text{ox}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, \quad (3.2)$$

где D_{ox} – фактор диэлектрических потери диэлектрика;

f – частота;

C – ёмкость.

Появление потерь, зависящих от частоты, обусловлено наличием тонкого слоя диэлектрика между обкладками.

Потери, зависящие от температуры, определяются типом применяемого электролита. Для оценки данной составляющей сопротивления можно применить выражение:

$$R_e(T) = R_e(25^\circ\text{C}) \cdot 2^{-\left[\frac{T-25}{A}\right]^B} \quad (3.3)$$

где для электролитов на базе этиленгликоля принимают $A=40$, $B=0,6$.

Паразитные элементы каждого типа конденсатора определяются материалами и сборкой материалов в конструкции. Изменения этих материалов способствует изменениям паразитных элементов конденсатора.

В электролитических конденсаторах серии К52-..., производства АО «Элеконд», обе пластины не образуют прямого контакта с диэлектриком. Контакт анодной пластины является прямым, так как конструкция предполагает, что берется основной металл, являясь основой, на котором термохимическим способом образуют оксидный слой, являющийся диэлектриком (рисунок 3.1).

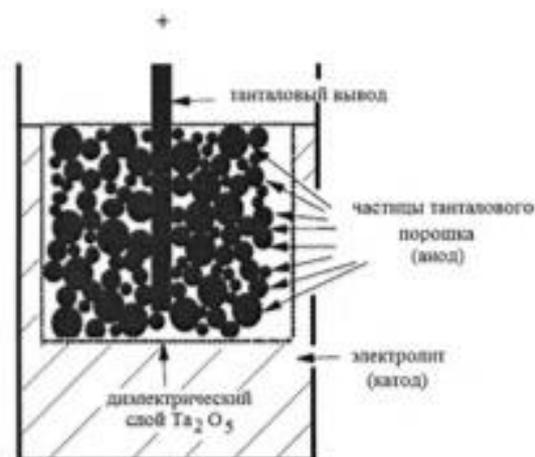
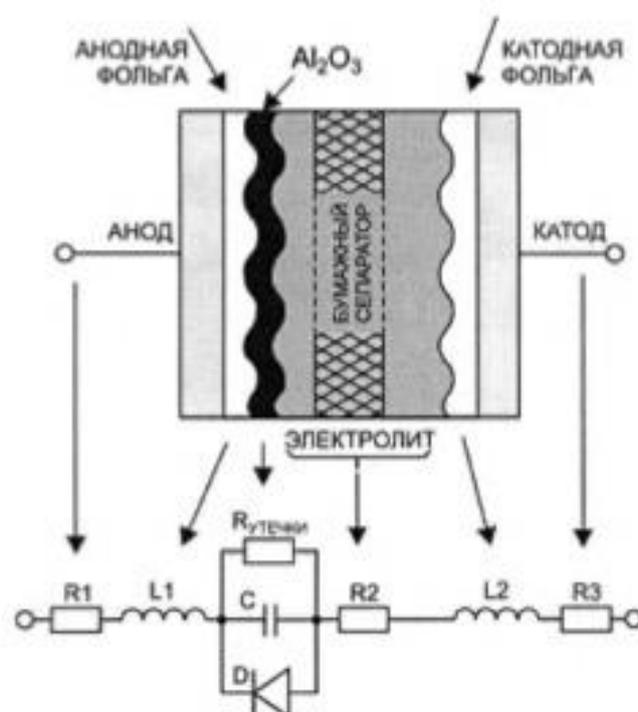


Рисунок 3.1 – Структурное строение объемно-пористых танталовых конденсаторов

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы (рисунок 3.2) состоят из двух проводящих электричество обкладок, разделенных слоем диэлектрика. Один из электродов, называемый анодом, сделан из алюминиевой

фольги с увеличенной эффективной площадью поверхности и покрыт диэлектрическим слоем оксида алюминия (Al_2O_3).

В отличие от других конденсаторов в оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторах вторым электродом, называемым катодом, служит проводящая жидкость, называемая электролитом. Вторая алюминиевая фольга, называемая катодной фольгой, служит контактной поверхностью для проходящего через электролит тока.



R_1, R_3 – сопротивление выводов анода и катода конденсатора;

R_2 – сопротивление электролита;

L_1, L_2 – индуктивность намотки анодной и катодной фольги;

$R_{утечки}$ – сопротивление утечки через дефекты диэлектрического слоя (оксида алюминия Al_2O_3);

C – емкость слоя оксида алюминия Al_2O_3 ;

D – эквивалентный диод, образованный слоем оксида алюминия Al_2O_3 , нанесенного на алюминиевую фольгу

Рисунок 3.2 – Строение оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов

Сравнительный анализ характера изменения параметров полного сопротивления Z и ЭПС от частоты конденсаторов с различной технологией изготовления и структурой приведены на рисунке 3.3 (на рисунке указана $f_{рез}$ алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов, танталовых объемно-пористых конденсаторов равная примерно 30 кГц).

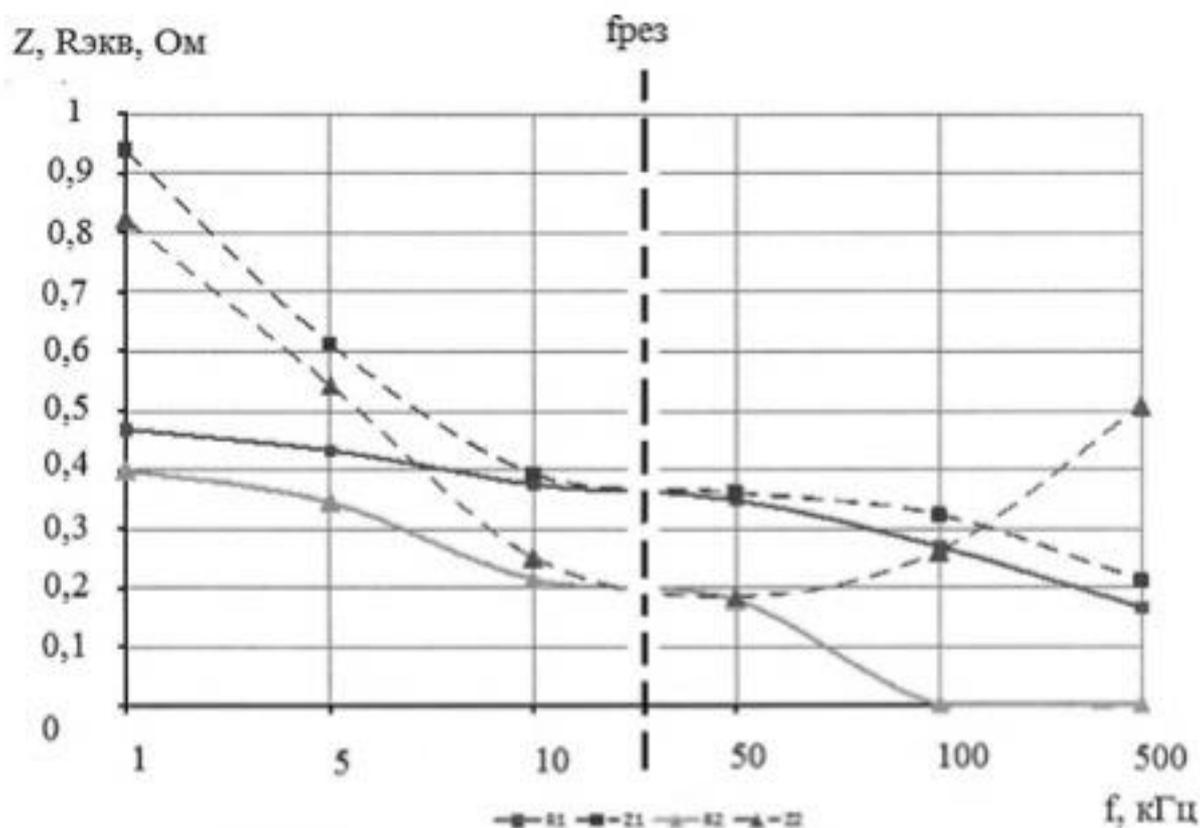


Рисунок 3.3 – Характер изменения параметров Z и ЭПС от частоты для конденсаторов с различной технологией изготовления и структурой

R_1, Z_1 – ЭПС и полное сопротивление алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов;

R_2, Z_2 – ЭПС и полное сопротивление танталовых объемно-пористых конденсаторов

Из представленных на рисунке 3.6 зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдается нехарактерное уменьшение индуктивной составляющей $Z1$ алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов на частотах выше резонансной, что связано с применением при изготовлении безиндуктивной намотки.

2. На частотах свыше 50 кГц наблюдается резкий рост импеданса объемно-пористых конденсаторов $Z2$, что связано с влиянием индуктивной составляющей (влияние выводов и других элементов конструкции).

3. Изменение $R1$ и $R2$ практически идентичны на частотах до 50 кГц, а на частотах свыше 50 кГц у объемно-пористых конденсаторов происходит резкое падение значения ЭПС, что связано с особенностями конструкции конденсаторов.

Поэтому наиболее важным является исследование параметра ЭПС конденсаторов.

3.2 Исследования эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени

К основным [128] эксплуатационным характеристикам объемно-пористых конденсаторов [129, 130] относят:

- емкость C ;
- тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$;
- ток утечки $I_{\text{ут}}$.

К неосновным эксплуатационным характеристикам объемно-пористых конденсаторов можно отнести ЭПС. Рыночный спрос на конденсаторы с высокой емкостью и низким ЭПС обусловлен промышленной тенденцией к цепям сниженного напряжения, функционирующих на высокой частоте, с повышенными требованиями токовых характеристик, поэтому из неосновного параметра ЭПС постепенно становится основным.

Целью данной работы являлось проведение оценки работоспособности объемно-пористых конденсаторов при испытании на длительную безотказность.

В качестве образцов для проведения исследований были взяты объемно-пористые конденсаторы серии K52-..., произведенные АО «Элеконд»:

- номинал 63 В X 470 мкФ – 30 шт (выборка 1);
- номинал 63 В X 470 мкФ – 60 шт (выборка 2);
- номинал 63 В X 150 мкФ – 20 шт (выборка 3);
- номинал 63 В X 220 мкФ – 10 шт (выборка 4).

Согласно ГОСТ РВ 20.57.414-97 объем выборок достаточен для проведения испытаний на длительную безотказность.

Методика исследований включала следующие операции:

1. Проведение измерения начальных значений параметров конденсаторов при температуре 20 °С.

2. Испытание конденсаторов проводилось при напряжении, равном номинальному $U_{исп} = 63$ В. Температура испытаний – максимальная температура среды, при которой допускается работа конденсаторов $T_{исп} = 85$ °С.

3. Продолжительность испытаний – 3 000 ч.

4. Контрольные точки – 1000 ч; 2000 ч; 3000 ч. Проведение измерения значений параметров конденсаторов в контрольных точках проводилось при температуре 20 °С.

Для анализа взяты следующие эксплуатационные характеристики конденсаторов:

- емкость конденсаторов C (мкФ) на частоте 50 Гц;
- ЭПС (Ом) на частоте 100 кГц.

В ходе проведения эксперимента, были получены значения емкости C и ЭПС. Результаты проведенного исследования представлены на рисунках 3.4-3.11.

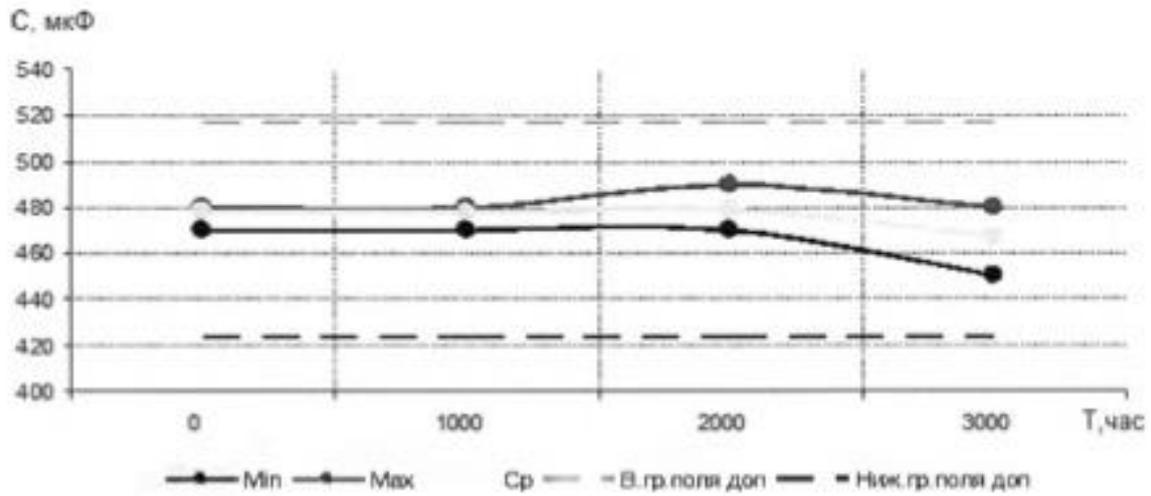
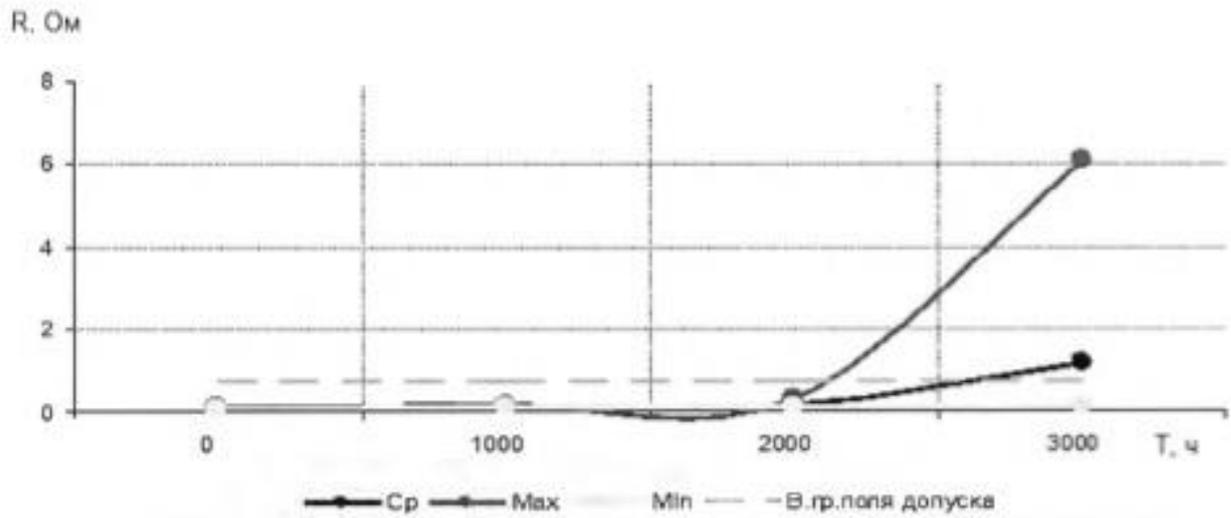
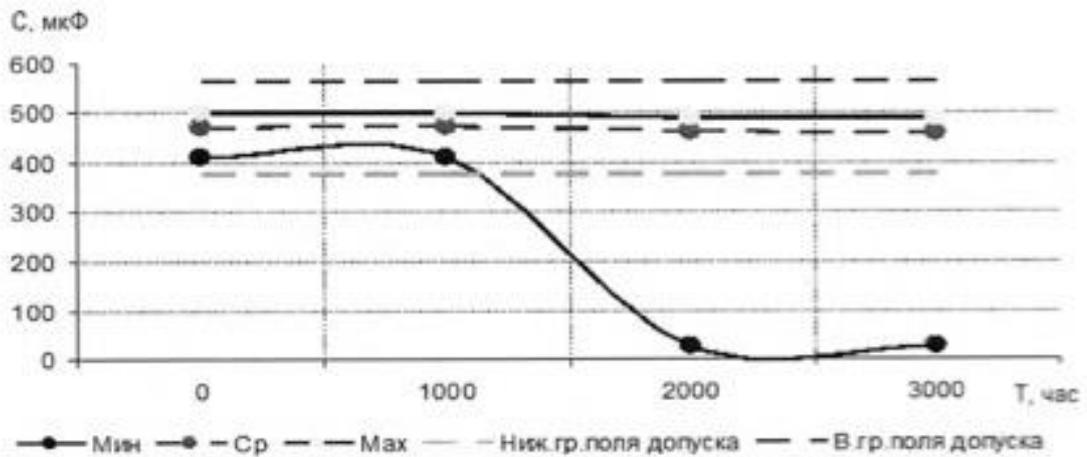
Рисунок 3.4 – Распределение C , мкФ (выборка 1)

Рисунок 3.5 – Распределение ЭПС, Ом конденсаторов (выборка 1).

Рисунок 3.6 – Распределение C , мкФ (выборка 2).

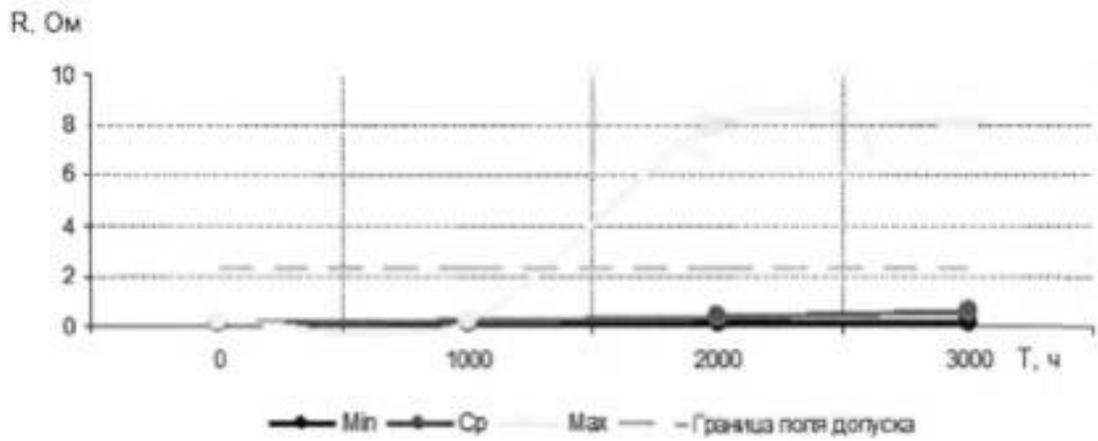


Рисунок 3.7 – Распределение ЭПС, Ом конденсаторов (выборка 2).

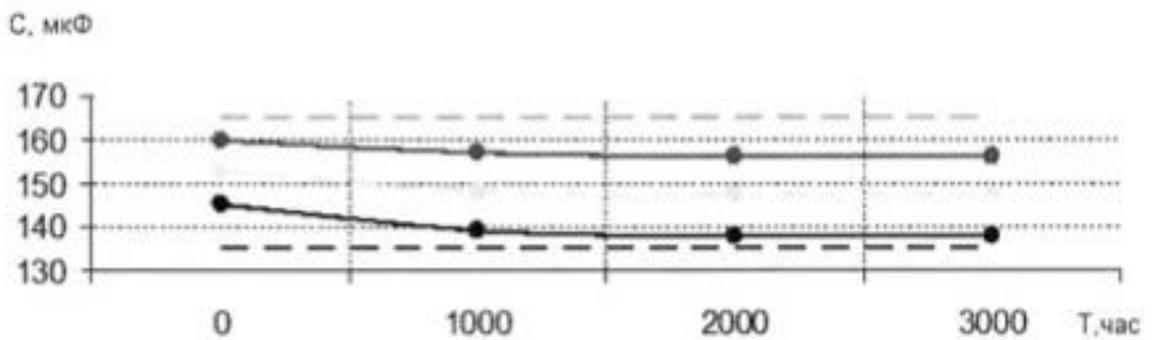


Рисунок 3.8 – Распределение C, мкФ (выборка 3).

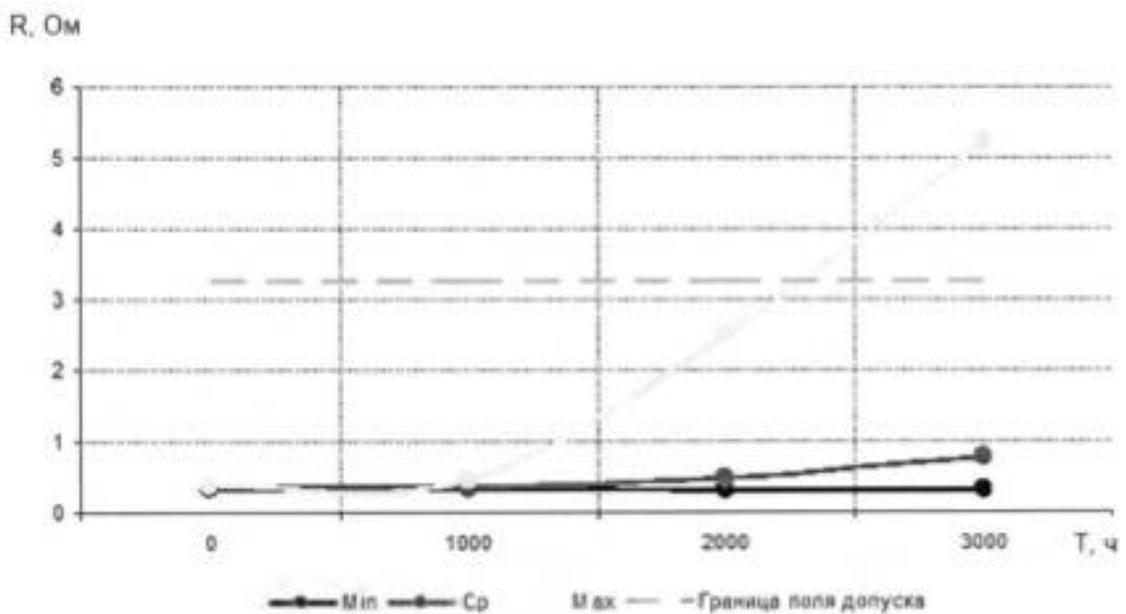


Рисунок 3.9 – Распределение ЭПС, Ом конденсаторов (выборка 3).

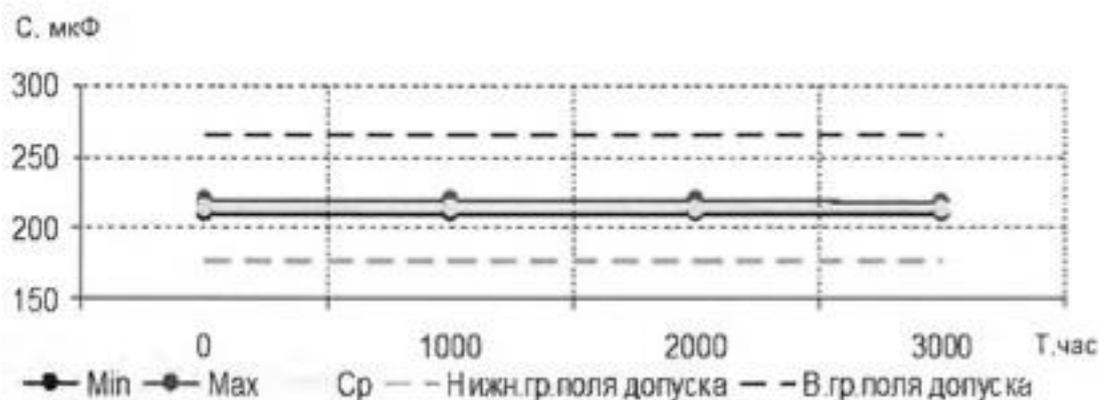
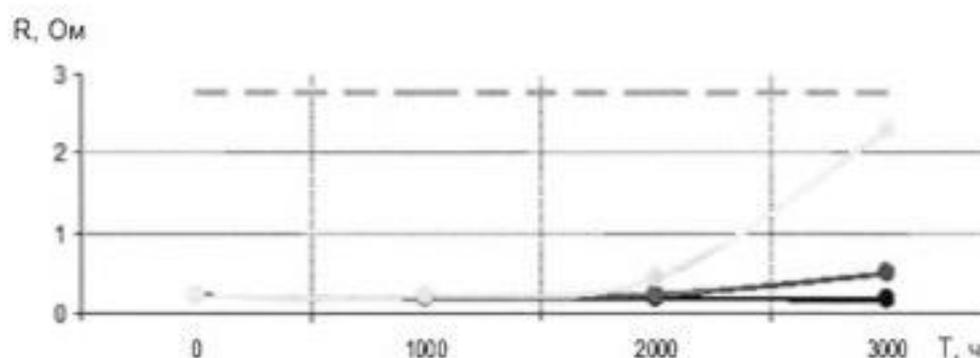
Рисунок 3.10 – Распределение C , мкФ (выборка 4)

Рисунок 3.11 – Распределение ЭПС, Ом конденсаторов (выборка 4)

По полученным временным функциям емкости исследуемых конденсаторов видно, что за все время эксперимента в подавляющем большинстве не произошло выхода границы поля рассеивания емкости за границы поля допуска.

Выборка 1. Из зависимости видно, что за все время эксперимента не произошло выхода границы поля рассеивания емкости за границы поля допуска. К 2000 ч эксплуатации наблюдается сначала увеличение значений параметра C , а затем, после 2000 ч эксплуатации наблюдается тенденция к снижению емкости. При анализе же временной зависимости эквивалентного последовательного сопротивления, наблюдается выход поля рассеивания параметра за границу поля допуска ориентировочно через 2100 часов, что можно считать браковочным признаком.

Выборка 2. Проведение анализа данной выборки на определение зависимости ЭПС от емкости невозможно в связи с непрогнозируемым лавинным отказом

партии, связанной с разгерметизацией конденсаторов в ходе проведения испытаний.

Выборка 3. Анализ данной выборки с другим номиналом, подтверждает сделанные выводы при анализе 1 выборки. Наблюдается аналогичная картина, как и на рисунке 1. Параметр C за все время проведения испытаний не выходит за границы поля допуска, тогда как параметр ЭПС после 2000 часов уже вышел за верхнюю границу.

Выборка 4. Аналогичная картина наблюдается и на выборке с номиналом 220 мкФ. Параметр C практически не отклоняется от номинального значения в течении всего времени проведения эксперимента, при этом мы наблюдаем к 3000 ч. Приближение ЭПС к границе поля допуска.

Анализируя характеры зависимостей C и ЭПС от времени эксплуатации конденсаторов можно сделать следующие выводы: отказ по параметру ЭПС наблюдается с 2000 ч, даже с учетом ошибок технологических операций, приводящих к завышенным значениям C (что не является браковочным признаком и в дальнейшем дает ложноположительный результат при контроле параметров при проведении испытаний на длительную безотказность), отказ же по параметру C происходит много позже 3000 ч эксплуатации.

Таким образом, анализ этого выходного параметра технологического процесса позволяет спрогнозировать момент выхода границы поля рассеивания за границы поля допуска и заблаговременно определить момент появления бракованных изделий, анализируя не основной параметр C , а ЭПС, параметр, являющийся справочным для данных изделий.

Наличие же ЭПС в конденсаторе обусловлено потерями в диэлектрике, которые в свою очередь обусловлены особенностями его поляризации, составляют основную часть потерь в конденсаторе и определяются материалом, а так же толщиной слоя диэлектрика. Так же во время эксплуатации в конденсаторе протекают электрохимические процессы, которые разрушают контакты в зоне соединения обкладок с контактами.

3.3 Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени

Следует отметить, что при изготовлении объемно-пористых конденсаторов невозможно получить абсолютную повторяемость параметров, а при появлении отклонений в технологических операциях, эксплуатационные характеристики начинают изменяться во времени раньше расчетного срока [131].

Исследование экспериментальной партии танталовых объемно-пористых конденсаторов номиналом 63 В × 470 мкФ проведено на выборке $n=30$ шт. для оценки работоспособности конденсаторов при длительной безотказности.

Напряжение, подаваемое на конденсаторы $U_{исп} = 63$ В.

Температура испытаний: плюс 85 °С (согласно методике проведения испытаний на длительную безотказность).

Температура, при которой производились замеры эксплуатационных характеристик конденсаторов – плюс 20 °С

Продолжительность испытаний – 3 000 ч.

Контрольные точки – 0 ч; 1000 ч; 2000 ч; 3000 ч.

Для анализа взяты следующие эксплуатационные характеристики конденсаторов:

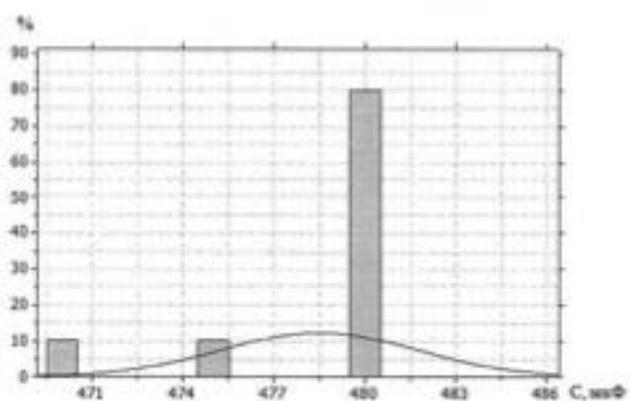
- емкость конденсаторов C (мкФ) на частоте 50 Гц;
- ЭПС конденсаторов (Ом) на частоте 100 кГц.

В ходе проведения эксперимента, были получены значения емкости C и ЭПС конденсаторов. Результаты проведенного исследования сведены в таблице 3.1.

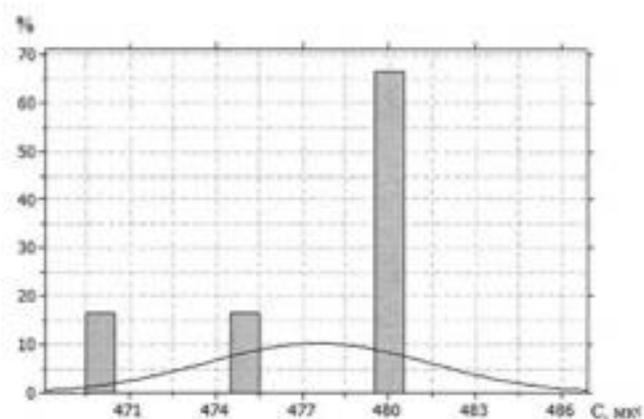
Из результатов проведенного исследования получены гистограммы распределения значений эксплуатационных характеристик конденсаторов. Результаты приведены на рисунках 3.12, 3.13.

Т а б л и ц а 3.1 – Эксплуатационные характеристики конденсаторов при эксплуатации в течение 3000 ч

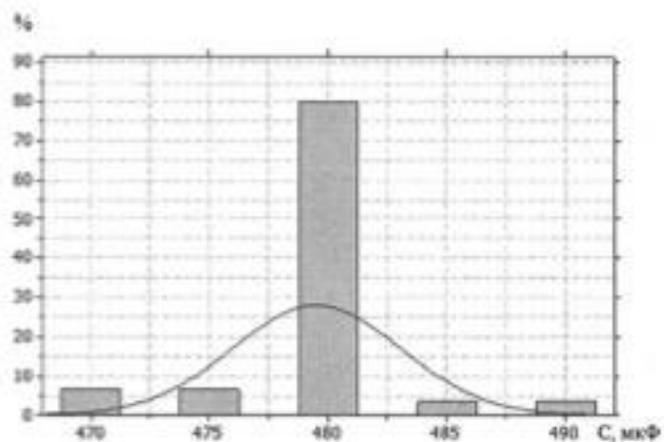
| № конденсатора | С, мкФ | | | | Rэкв, Ом | | |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0 ч | 1000 ч | 2000 ч | 3000 ч | 0 ч | 1000 ч | 2000 ч |
| 1 | 480 | 480 | 480 | 480 | 0,14 | 0,17 | 0,17 |
| 2 | 480 | 480 | 480 | 450 | 0,13 | 0,17 | 0,25 |
| 3 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,14 | 0,16 | 0,16 |
| 4 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,12 | 0,17 | 0,17 |
| 5 | 470 | 470 | 470 | 470 | 0,14 | 0,18 | 0,14 |
| 6 | 480 | 475 | 480 | 470 | 0,12 | 0,16 | 0,15 |
| 7 | 480 | 480 | 485 | 475 | 0,13 | 0,16 | 0,15 |
| 8 | 480 | 480 | 490 | 475 | 0,13 | 0,15 | 0,15 |
| 9 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,13 | 0,15 | 0,16 |
| 10 | 480 | 480 | 480 | 465 | 0,12 | 0,15 | 0,25 |
| 11 | 480 | 480 | 480 | 460 | 0,12 | 0,15 | 0,19 |
| 12 | 475 | 470 | 480 | 465 | 0,12 | 0,14 | 0,15 |
| 13 | 480 | 475 | 480 | 470 | 0,1 | 0,14 | 0,15 |
| 14 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,11 | 0,15 | 0,16 |
| 15 | 475 | 470 | 480 | 460 | 0,09 | 0,14 | 0,25 |
| 16 | 480 | 480 | 480 | 455 | 0,11 | 0,14 | 0,25 |
| 17 | 470 | 470 | 475 | 465 | 0,12 | 0,14 | 0,16 |
| 18 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,12 | 0,15 | 0,15 |
| 19 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,12 | 0,15 | 0,15 |
| 20 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,12 | 0,14 | 0,15 |
| 21 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,12 | 0,15 | 0,17 |
| 22 | 480 | 480 | 480 | 465 | 0,12 | 0,15 | 0,31 |
| 23 | 480 | 475 | 480 | 470 | 0,11 | 0,16 | 0,16 |
| 24 | 480 | 475 | 480 | 450 | 0,11 | 0,15 | 0,26 |
| 25 | 470 | 470 | 470 | 470 | 0,11 | 0,15 | 0,16 |
| 26 | 475 | 475 | 475 | 450 | 0,11 | 0,16 | 0,27 |
| 27 | 480 | 480 | 480 | 475 | 0,11 | 0,16 | 0,16 |
| 28 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,11 | 0,16 | 0,17 |
| 29 | 480 | 480 | 480 | 470 | 0,11 | 0,17 | 0,19 |
| 30 | 480 | 480 | 480 | 475 | 0,11 | 0,17 | 0,18 |
| Ср. | 478,50 | 477,50 | 479,50 | 467,17 | 0,12 | 0,15 | 0,18 |
| Min | 470 | 470 | 470 | 450 | 0,09 | 0,14 | 0,14 |
| Max | 480 | 480 | 490 | 480 | 0,14 | 0,18 | 0,31 |



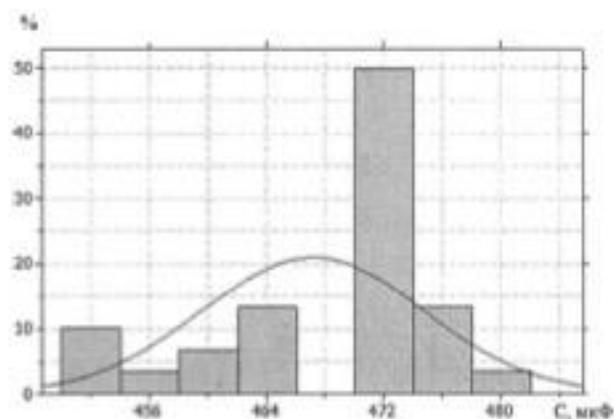
а)



б)



в)

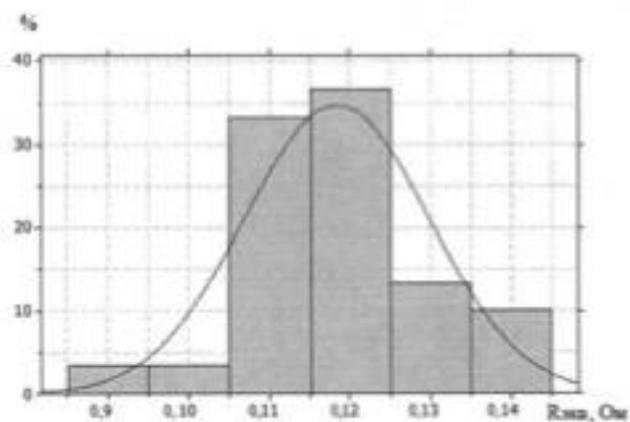


г)

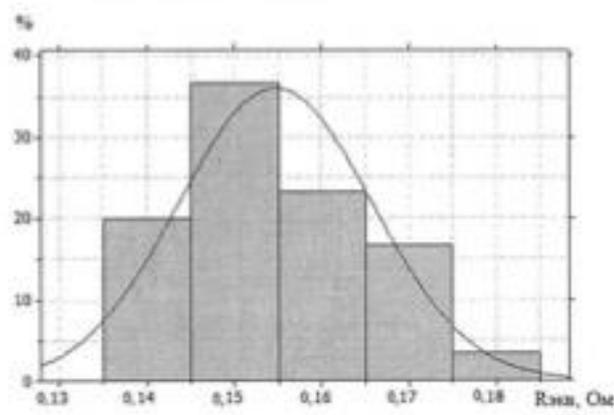
Рисунок 3.12 – Гистограммы распределения значений параметра С в выборке

а) номинальные значения б) через 1000 час работы

в) через 2000 час работы г) через 3000 час работы



а)



б)

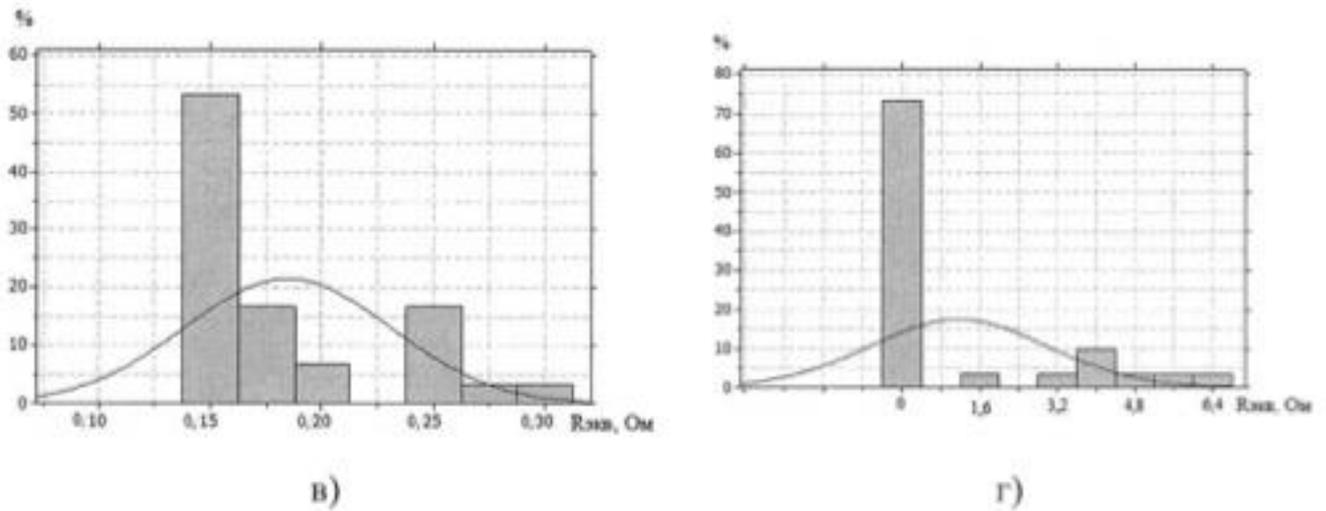


Рисунок 3.13 – Гистограммы распределения значений параметра ЭПС в выборке

- а) номинальные значения б) через 1000 час работы
в) через 2000 час работы г) через 3000 час работы

Проанализировав полученные результаты и построенные по имеющимся данным гистограммы распределения значений и минимаксный разброс параметров С и ЭПС, с учетом выборки $n=30$, согласно ГОСТ РВ 20.57.414-97 достаточной для проведения испытаний на длительную безотказность, можно сделать следующие заключения:

1. По гистограмме на рисунке 3.12а можно судить об отклонении в технологическом процессе. Отклонение от нормального закона распределения и смещение в сторону увеличения параметра С может быть связано с технологическими ошибками, допущенными на этапах производства, например, неравномерное распределение температуры при операции «Спекание анодной таблетки».

2. По гистограмме, приведенной на рисунке 3.13а наблюдается нормальное распределение Гаусса по значениям параметра ЭПС.

3. На гистограмме, приведенной на рисунке 3.12б, наблюдается нормализация параметра С и приближение его к номинальному значению, что связано с

электрохимическими процессами, происходящими внутри конденсаторов при эксплуатации, например, доформовкой анода.

4. На гистограмме, приведенной на рисунке 3.13б, наблюдается смещение нормального распределения в сторону увеличения ЭПС до 0,18 Ом, что связано с электрохимическими процессами, происходящими внутри конденсаторов.

5. Через 2000 ч наблюдается стабилизация параметра С (гистограмма на рисунке 3.12в). Гистограмма принимает вид нормального распределения Гаусса. За счет электрохимических процессов, происходящих внутри конденсатора, произошло окончательное формирование физико-химической структуры конденсатора. Смещение распределения значений параметра С к 480 мкФ, при номинальном значении 470 мкФ связано с наличием систематической случайной погрешности из-за ошибок настройки технологического оборудования.

6. На гистограмме, приведенной на рисунке 3.13в, наблюдаем продолжение смещения вершины гистограммы распределения в сторону увеличения значений параметра ЭПС до 0,3 Ом.

7. По истечении 3000 ч наблюдается уменьшение параметра С (рисунок 3.12г), но данный параметр, за счет ошибок технологических операций остается на уровне номинального значения, хотя при контроле по ЭПС уже наблюдается наличие браковочного признака конденсатора (рисунок 3.13г) – значения ЭПС превышают 6 Ом.

По полученным экспериментальным данным построен минимаксный разброс значений С и ЭПС от времени эксплуатации. Результаты приведены на рисунках 3.14, 3.15.

Соединив точки верхних и нижних границ полей рассеяния получили временные функции изменения емкости (рисунок 3.14).

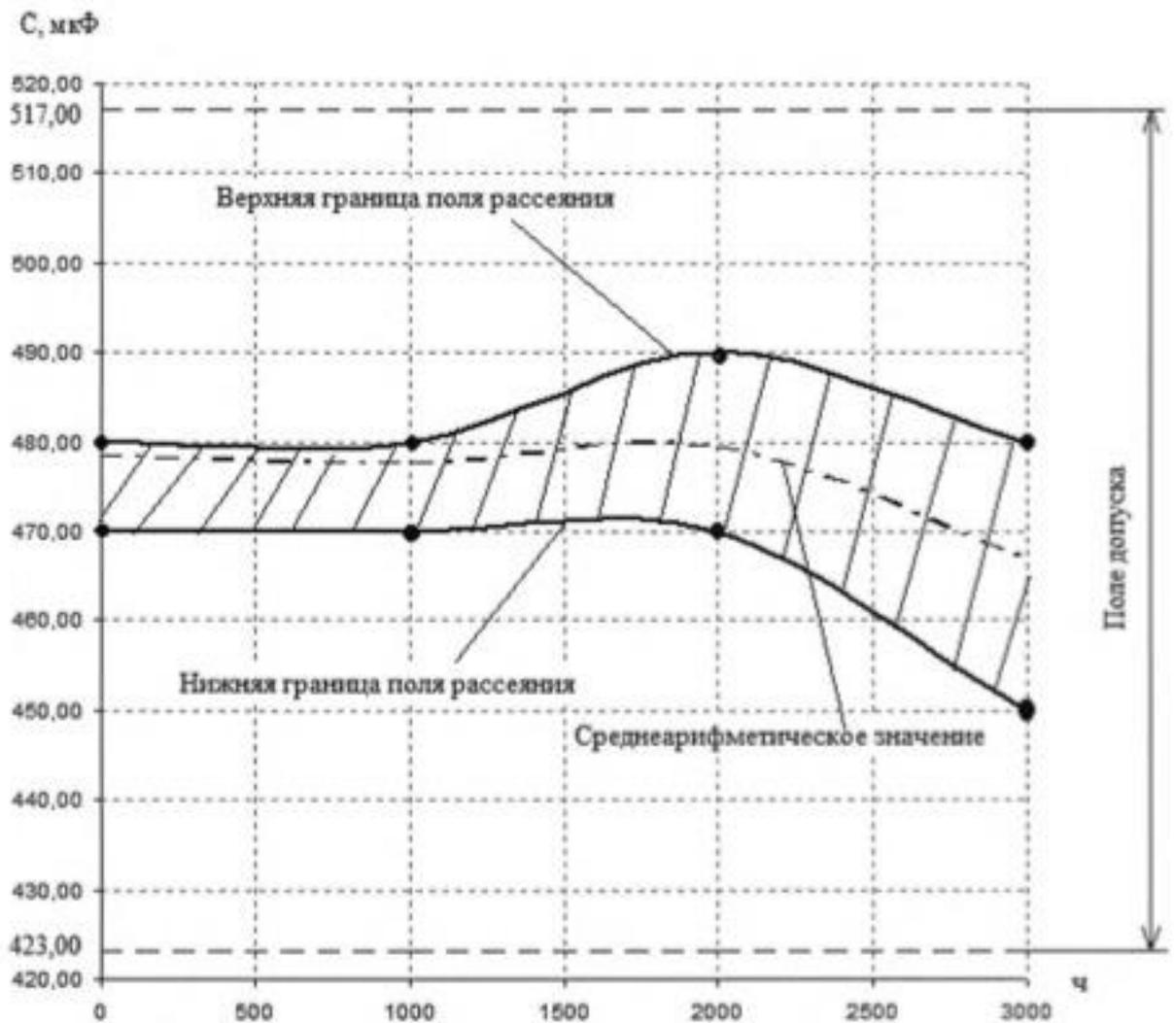


Рисунок 3.14 – Минимаксный разброс параметра C от времени эксплуатации

Из представленной зависимости видно, что за все время эксперимента не произошло выхода границы поля рассеивания за границы поля допуска. После 2000 ч эксплуатации наблюдается тенденция к снижению емкости.

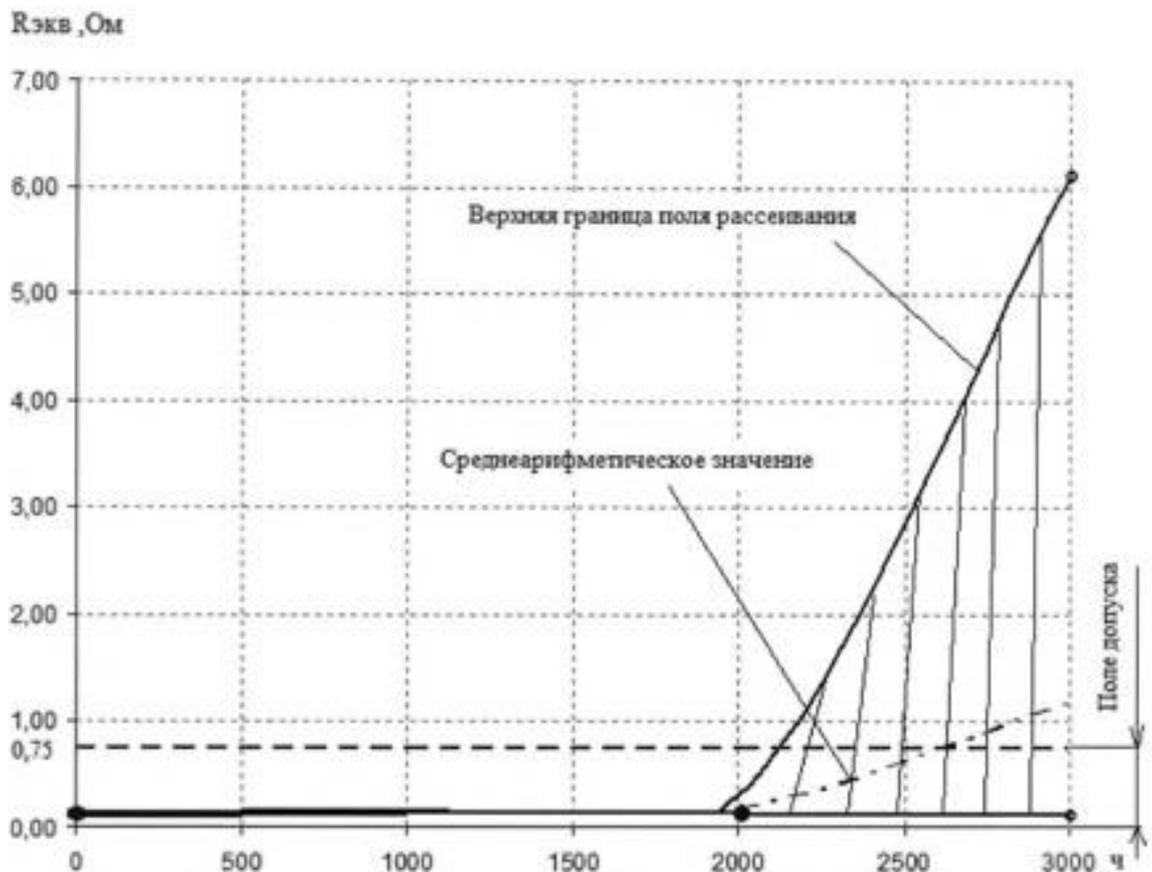


Рисунок 3.15 – Минимаксный разброс параметра ЭПС от времени эксплуатации

При анализе временной зависимости ЭПС, приведенной на рисунке 3.15 наблюдается выход поля рассеивания параметра за границу поля допуска ориентировочно через 2100 часов, что можно считать браковочным признаком.

Анализируя характеры зависимостей C и ЭПС (рисунки 3.14, 3.15) от времени эксплуатации конденсаторов можно сделать следующие выводы: отказ по параметру ЭПС наблюдается с 2000 ч, даже с учетом ошибок технологических операций, приводящих к завышенным значениям C (что не является браковочным признаком и в дальнейшем дает ложноположительный результат при контроле параметров при проведении испытаний на длительную безотказность), отказ же по параметру C происходит много позже 3000 ч эксплуатации.

Таким образом, этот метод анализа технологического процесса позволяет спрогнозировать момент выхода границы поля рассеивания за границы поля допуска и заблаговременно определить момент появления бракованных изделий, анализируя не основной параметр C , а справочный параметр ЭПС.

3.4 Устройство разбраковки электролитических конденсаторов по параметру эквивалентное последовательное сопротивление

Измеритель ЭПС конденсаторов [132] представляет собой устройство, которое измеряет с высоким нижним и достаточным верхним пределом при низкой погрешности. В отечественной радиоэлектронике измерители ЭПС встречаются только в любительском исполнении. При проектировании в таких условиях, нет высокой точности измерения ЭПС. А так же измерители ЭПС проектируются вместе с другими функциями, которые усложняют и удорожают устройство.

Измерители ЭПС должны обладать высоким быстродействием, малой погрешностью и широким диапазоном измерения. В настоящее время достаточно измерять ЭПС в пределах от 10^{-4} до 10^2 Ом. Но не достаточно задать и измерять в этих пределах, необходимо достичь минимальной погрешности измерения. Среди основных методов измерения параметров электрических цепей можно назвать мостовые методы и метод, связанный с использованием соотношений закона Ома на переменном токе.

Принцип действия мостовых измерителей импеданса основан на использовании измерительного моста, для уравнивания которого, в приборе содержатся наборы образцовых активных и реактивных (ёмкостных) сопротивлений. Такие приборы могут работать только на фиксированных частотах. Реализация цифровых приборов для измерения параметров электрических цепей на основе мостовых методов сопровождается заметным усложнением их схемотехники и автоматизации процессов уравнивания.

Приборы, в основу которых положено использование соотношений закона Ома, проще с точки зрения схемотехнической реализации и автоматизированного получения результата измерения. Принцип измерения таких измерителей импеданса основан на анализе прохождения тестового сигнала (обычно синусоидального) с заданной частотой через измеряемую цепь, обладающую комплексным сопротивлением. Напряжение рабочей частоты с внутреннего генератора подается на измеряемый объект. На выделенном участке цепи

измеряется напряжение, ток и фазовый сдвиг между ними. Измеренные величины используются для расчёта параметров цепей.

Современные измерители иммитанса и измерители LCR построены по типовой схеме и позволяют измерять, в том числе и ЭПС.

На рисунке 3.16 изображены векторы напряжений, которые появляются на конденсаторе в процессе измерения параметров, и опорное вспомогательное напряжение с произвольной фазой.

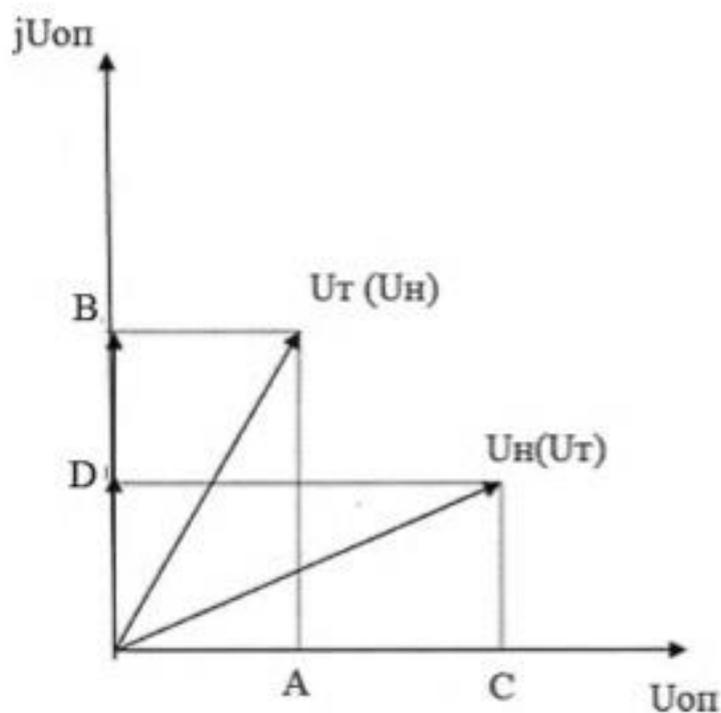


Рисунок 3.16 – Векторная диаграмма распределения напряжений на конденсаторе

Проекции векторов U_0 , U_I на опорное напряжение U_H , jU_H выделяются синхронным детектором СД и измеряются в некотором произвольном масштабе измерителем интегрирующего типа.

Очевидны соотношения:

$$Y = G + jB' = \frac{U_T}{U_H} = \frac{U_x}{U_0} = \frac{A + jB}{C + jD} \quad (3.4)$$

где G – активная проводимость

B' – реактивная проводимость

U_H – числитель измеряемого напряжения

U_T – знаменатель измеряемого отношения

A, B, C, D – проекции векторов U_H и U_T на опорное напряжение $U_{оп}$ и $jU_{оп}$,

откуда

$$G = \frac{AC + BD}{C^2 + D^2} \quad (3.5)$$

$$B = \frac{BC + AD}{C^2 + D^2} \quad (3.6)$$

Аналогично

$$Z = R + jX = \frac{U_H}{U_T} = \frac{U_X}{U_0} = \frac{A + jB}{C + jD} \quad (3.7)$$

где R – активное сопротивление

X – реактивное сопротивление, или

$$R = \frac{AC + BD}{C^2 + D^2} \quad (3.8)$$

и

$$X = \frac{BC + AD}{C^2 + D^2} \quad (3.9)$$

При измерении высокоомных объектов, когда генератор сигналов является источником напряжения, предпочтительно осуществляется измерения в виде составляющих проводимостей ($U_X = U_T$, $U_0 = U_H$).

В случае измерения низкоомных объектов, источник сигнала работает как генератор тока и более удобным является измерение в форме составляющих полного сопротивления ($U_X = U_H$, $U_0 = U_T$). Требуемая форма иммитанса достигается пересчетом из первичной формы (A, B' или X, R) и осуществляется контроллером. Расширение пределов измерения достигается за счет изменения коэффициента передачи усилительного тракта логометра при измерении составляющих числителя $U_{оп}$ в 10, 100 и 1000 раз.

Для реализации измерений ЭПС необходимо иммитансные характеристики измеряемого объекта преобразовать в одно напряжение, пропорциональное току, проходящему через исследуемый объект и во второе напряжение – напряжение самого объекта. Отношение преобразованных напряжений равно комплексному

сопротивлению или комплексной проводимости объекта. Расчет иммитансных параметров и измерение отношения напряжений измеряемого объекта происходит с помощью встроенного микропроцессора.

Типовая структурная схема построения измерителей LCR (на основе измерителя иммитанса E7-20) приведена на рисунке 3.17.

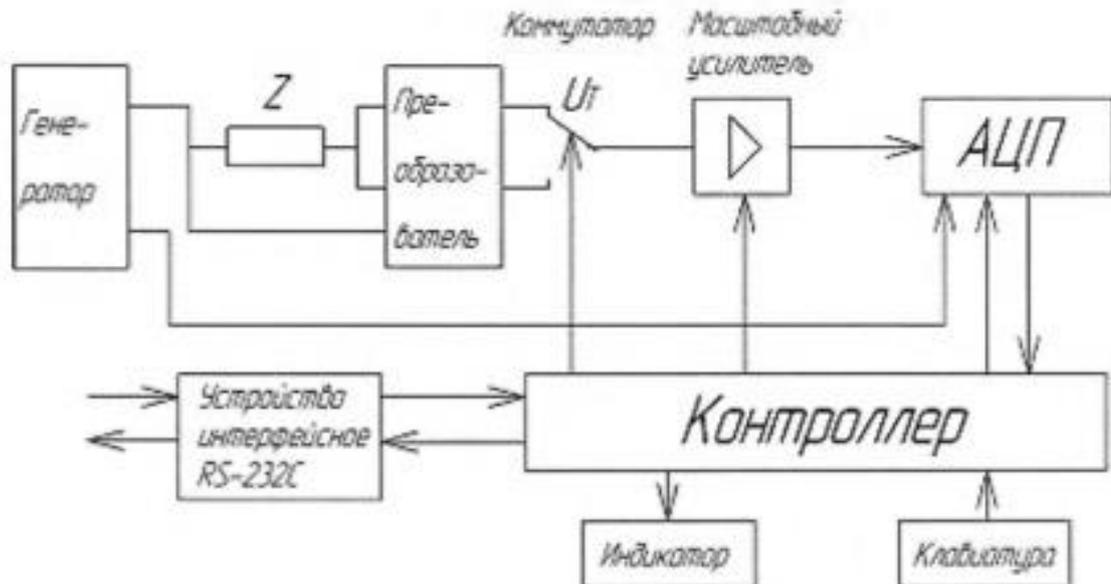


Рисунок 3.17 – Структурная схема измерителя иммитанса

Роль генератора исполняет кварцевый резонатор с частотой 6 МГц. Генератор подает напряжение рабочей частоты на измеряемую цепь (объект). Преобразователь формирует два напряжения, одно из которых пропорционально току, протекающему через измеряемую цепь, другое - напряжению на ней. Отношение этих напряжений равно комплексной проводимости Y или комплексному сопротивлению Z объекта. Измерение отношения напряжений проводится аппаратно–программным логометром.

Аппаратная часть логометра состоит из коммутатора, масштабного усилителя, аналого–цифрового преобразователя АЦП. Итогом работы программной части логометра является расчет отношений напряжений.

Некоторые из существующих измерителей иммитанса и измерителей LCR уже имеют как дополнительную, возможность производить разбраковку изделий по определенным параметрам, но это либо дорогие промышленные измерители параметров электронных компонентов, предназначенные для работы в высокопроизводительных линиях, либо данная функция реализована “для галочки” и не позволяет производить разбраковку в достаточной степени или имеет сложный алгоритм предварительной настройки, что опять же не позволяет работать оператору с этой функцией в полной мере.

В основу разрабатываемого устройства лег промышленно выпускаемый измеритель иммитанса E7-20. Принцип работы данного измерителя основан на соотношении закона Ома.

Функции, которые должен выполнять измеритель/разбраковщик конденсаторов по ЭПС (ИРЭПС):

- измерение ЭПС конденсаторов, вывод информации на ЖКД и/или светодиодная индикация;
- разбраковка конденсаторов по ЭПС;
- выбор границы диапазона контролируемого параметра;
- ручной выбор частоты для измерения ЭПС конденсаторов.

Для формирования системы определены блоки, необходимые для реализации заложенных функций (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Структурная схема ИРЭПС

Измерение и вычисление параметров исследуемого объекта производит непосредственно измеритель иммитанса, но в связи с малой мощностью контроллера E7-20 при работе в режиме разбраковщика происходят постоянные зависания прибора, что приводит к невозможности даже оперативно сменить диапазон разбраковки. Но измеритель иммитанса позволяет передавать данные о проведенных измерениях через последовательный интерфейс RS232, что позволило разделить функции измерителя и разбраковщика.

На рисунке 3.19 показан типичный логический сигнал RS-232 (формат данных: 1 стартовый бит, 8 битов данных, без контроля четности, 1 стоповый бит). Передача данных начинается с начального бита, за которым следуют биты данных (LSB отправляется первым, а MSB отправляется последним) и заканчивается битом «Стоп». Напряжение логической «1» (метка) находится в диапазоне от -3 В до -15 В постоянного тока, в то время как логическое «0» (пробел) находится в диапазоне от +3 В до +15 В постоянного тока. RS-232 соединяет заземление двух разных устройств вместе, что является так называемым «несбалансированным» соединением. Несбалансированное соединение более восприимчиво к шуму и имеет ограничение расстояния 15 метров.

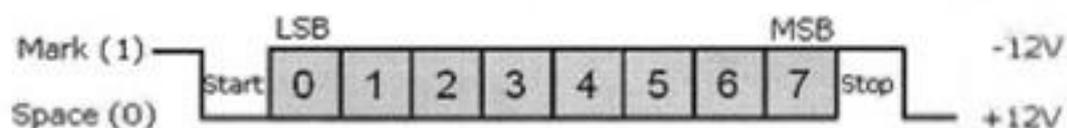


Рисунок 3.19 – Формат данных логического сигнала протокола RS232

Измеритель иммитанса E7-20 непрерывно находится в режиме передачи. Формат передаваемого кадра: 0xAA, Offset, Level, Frequency, Flags, Mode, Limit, ImParam, SecParam, SecParam_Value, ImParam_Value, onChange, CS, где:

0xAA – байт синхронизации;

Offset – младший и старший байт значения смещения;

Level – байт значения уровня измерительного сигнала;

Frequency – младший, старший байт значения частоты и байт множителя 10 частоты;

Flags – байт флагов:

4-й бит – автовыбор схемы замещения;

3-й бит – допуск;

2-й бит – параллельная/последовательная схема замещения;

1-й бит – автоматический режим переключения поддиапазонов;

Mode – режим работы прибора: 0x1 – режим измерения;

Limit – предел измерения;

ImParam – измеряемый параметр:

0x0 – Cp;

0x1 – Lp;

0x2 – Rp;

0x3 – Gp;

0x4 – Bp;

0x5 – |Y|;

0x6 – Q;

0x7 – Cs;

0x8 – Ls;

0x9 – Rs;

0xA – φ;

0xB – Xs;

0xC – |Z|;

0xD – D;

0xE – I;

SecParam – дополнительный измеряемый параметр;

SecParam_Value – старший, средний, младший байты и байт множителя 10 дополнительного измеряемого параметра в дополнительном коде;

ImParam_Value – старший, средний, младший байты и байт множителя 10 измеряемого параметра в дополнительном коде;

OnChange – байт флагов редактирования:

3-й бит – изменение поддиапазона;

- 2-й бит – изменение частоты;
- 1-й бит – изменение смещения;
- 0-й бит – изменение уровня;
- CS – контрольная сумма.

ИРЭПС получает данные только об измеренном ЭПС и сравнивает их с заданным диапазоном разбраковки.

Расчет происходит в микроконтроллере, после чего информация выводится на блок индикации, который состоит жидкокристаллического дисплея (LCD дисплей). На ЖКД поступает следующая информация об измеренных данных – это значение ЭПС и выбранная граница диапазона. При выходе параметра за границы выбранного диапазона, цвет выводимого значения изменяется на красный. В случае необходимости, разбраковщик может быть дооснащен сигнальным устройством для звукового оповещения оператора о выходе контролируемого параметра за границы диапазона.

Выводы по главе III

1. Из проведенного анализа исследования электрических параметров танталовых оксидно-электролитических конденсаторов на основе физико-химических процессов и схем их замещения сделан вывод, что наиболее важным параметром для исследования танталовых конденсаторов является параметр - ЭПС.

2. Чем больше ЭПС конденсатор имел до начала эксплуатации, тем скорее и возрастет его величина. ЭПС неисправного конденсатора может повыситься от нескольких мОм до нескольких десятков Ом, что эквивалентно появлению нового элемента – резистора внутри неисправного конденсатора. Чем выше частота эксплуатации, тем влияние ЭПС больше.

3. Из проведенного анализа характеров зависимостей C и ЭПС от времени эксплуатации конденсаторов получено, что отказ по параметру ЭПС наблюдается уже с 2000 ч, даже с учетом ошибок технологических операций, приводящих к

завышенным значениям C (что не является браковочным признаком), отказ же по параметру C происходит много позже 3000 ч эксплуатации. Поэтому наиболее важным параметром для контроля конденсаторов является контроль ЭПС.

4. Анализируя технологический процесс по параметру ЭПС можно спрогнозировать момент выхода параметра конденсатора с границы поля рассеивания за границы поля допуска и заблаговременно определить момент появления бракованных изделий.

5. Разработано устройство разбраковки электролитических конденсаторов по параметру ЭПС в производстве, основанное на соотношении закона Ома.

ГЛАВА IV КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРЕСС-ТЕСТА

4.1 Разработка методики СТРЕСС-ТЕСТ

Известно, что тантал является вентильным металлом, и соответственно, выращенный аморфный пентаоксид способен образовать равномерный слой на поверхности тантала, но вследствие различных факторов (из-за неровности поверхности, пористости, неравномерности распределения электролита во время процесса оксидирования и электрического контакта рейконоситель-анод) создается поверхность с «проблемными участками», «не проформовкой», или, иначе «слабое место» (рисунок 4.1). Толщина диэлектрика контролируется напряжением, прикладываемым в течение процесса формирования (как правило, для танталовых объемно-пористых конденсаторов это коэффициент 1,8 от номинального напряжения) [133].

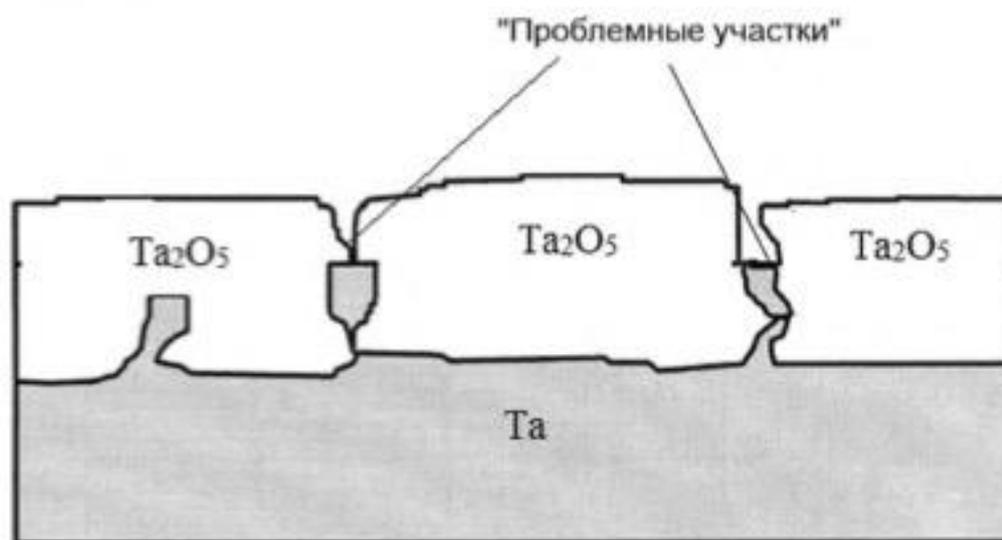


Рисунок 4.1 – Поверхность пентаоксида тантала с «проблемными участками»

Опытным путем (проведенными экспериментами) получена новая методика оценки танталовых конденсаторов СТРЕСС-ТЕСТ, которая основана на циклическом (10 циклов) приложении к конденсатору повышенного напряжения с коэффициентом 1,8 от номинального напряжения (соответствующего напряжению при формировании оксидного слоя на танталовом аноде) при продолжительности

каждого цикла в течение 5 минут. В ходе проведения методики СТРЕСС-ТЕСТ выявляются конденсаторы с проблемными участками (рисунок 4.2), за счет активации процесса электрохимического старения и ионизационного пробоя.



Рисунок 4.2 – Дефекты, выявляемые методикой СТРЕСС-ТЕСТ

Экспериментально определено время приложения повышенного напряжения - 5 минут, в течение которого происходит полный заряд конденсатора. Физико-химические процессы, происходящие внутри конденсатора при приложении к нему повышенного напряжения 1,8 от номинального, приводят к росту температуры внутри конденсатора, в течение 5 минут так же происходит ее стабилизация (рисунок 4.3).

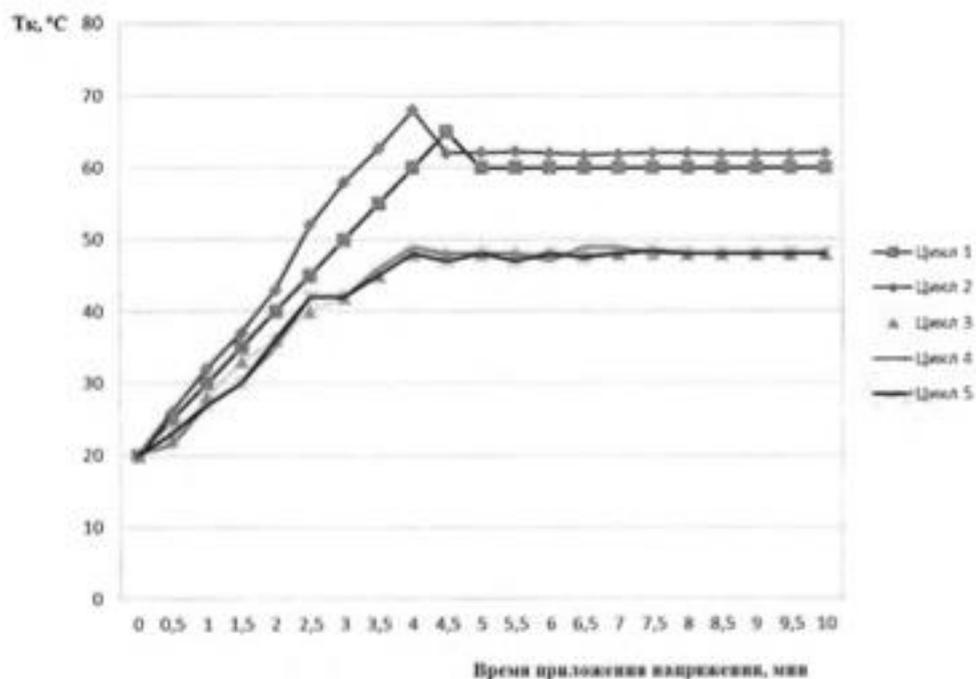


Рисунок 4.3 – Температура поверхности конденсатора в зависимости от времени приложения повышенного напряжения 1,8 от номинального

Результаты исследования по определению коэффициента и количества циклов приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Результаты исследования по определению коэффициента по напряжению и количества циклов

| Коэффициент по напряжению | Количество необходимых циклов |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1,2 | 120 |
| 1,3 | 80 |
| 1,4 | 55 |
| 1,5 | 35 |
| 1,6 | 25 |
| 1,7 | 15 |
| 1,8 | 10 |
| >1,8 | Отказ физический |

При выдержке конденсаторов под повышенным напряжением выше 1,8 от номинального получены отказы конденсаторов (рисунок 4.4) из-за неконтролируемых процессов и лавинообразном росте температуры внутри конденсаторов.



Рисунок 4.4 – Фотография разрушенного конденсатора

Экспериментально определено, что оптимальным является приложение 10 циклов повышенного напряжения. За такое количество циклов происходят изменения, приводящие к увеличению ЭПС, соответствующие с фактическими увеличениями ЭПС при проведении испытаний длительной безотказности.

Подтвердим полученную модель расчетами. Согласно ГОСТ 11 0481-87 для процесса ускорения оценки долговечности конденсаторов была выбрана модель Журкова, максимально приближенная к полученным результатам:

$$\tau_{\text{уск}} = \tau_0 \cdot e^{\frac{w - \alpha K_n}{K \cdot T}} \quad (4.1)$$

где:

τ_0 - параметр, зависящий от конструкции изделий, ч;

w - энергия активации ионного переноса, эВ;

K - коэффициент Больцмана, В/градус;

K_n - коэффициент нагрузки;

α - коэффициент, зависящий от типа носителей заряда, структуры диэлектрика и напряженности поля при номинальном напряжении, эВ;

T - температура, К.

Для определения коэффициентов модели проведены испытания конденсаторов К52-.. до двух отказов, данные приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Данные для определения коэффициентов модели

| Наименование | Режимы испытаний | | Объем выборки, шт. | Продолжительность, тыс. час |
|----------------|------------------|-------|--------------------|-----------------------------|
| | T, К | K_n | | |
| T ₁ | 398 | 0,7 | 30 | 5 |
| T ₂ | 358 | 1,0 | 30 | 14,5 |
| T ₃ | 358 | 1,15 | 30 | 0,9 |

Согласно ОСТ 11 0481-87 составлена система уравнений:

$$\begin{cases} \ln T_1 = \ln \tau_0 + \frac{w - \alpha \cdot 0.7}{0.87 \cdot 10^{-4} \cdot 398} \\ \ln T_2 = \ln \tau_0 + \frac{w - \alpha \cdot 1}{0.87 \cdot 10^{-4} \cdot 358} \\ \ln T_3 = \ln \tau_0 + \frac{w - \alpha \cdot 1.15}{0.87 \cdot 10^{-4} \cdot 358} \end{cases}$$

Параметры модели τ_0 , α , w получены при решении системы уравнений и приведены в таблице 4.3. Параметры K_n и T получены опытным путем в ходе проведения испытаний.

Т а б л и ц а 4.3 – Полученные данные для методики СТРЕСС-ТЕСТ

| τ_0 , ч | α , эВ | w , эВ |
|--------------|---------------|----------|
| 0,00206 | 0,1044 | 0,34 |

Методика ускоренной оценки качества СТРЕСС-ТЕСТ описывается следующей формулой, основанной на формуле 4.1 и коэффициентах, приведенных в таблице 4.3:

$$\tau_{\text{уск}} = 0,00206 \cdot e^{\frac{0,34 - 0,1044 \cdot K_n}{0,862 \cdot 10^{-4} T}} \quad (4.2)$$

где:

K_n – коэффициент нагрузки;

T – температура, К.

Подставляя в формулу 4.2 коэффициент по напряжению 1,8 и температуру 20 °С (293 К) получаем время для процесса ускорения – 50 минут, что соответствует 10 циклам методики СТРЕСС-ТЕСТ, полученной опытным путем.

Произведен расчёт необходимого количества выборки для проведения испытаний. Определен тип контроля – выборочный (испытания методикой СТРЕСС-ТЕСТ расходуют ресурс конденсаторов и после испытаний поставке не подлежат).

Для этого была взята упрощенная формула Колмогорова (Р 50.1.033-2001), из которой определяется необходимое количество изделий исходя из требуемого уровня качества:

$$n = N \cdot \left[1 - \left(\frac{m}{100} \right)^{\frac{100}{qN}} \right], \quad (4.3)$$

где: N – количество изделий в партии;

m – средний процент принимаемых партий;

q – допустимая доля дефектных изделий.

Для вычисления были взяты следующие значения:

- средний процент принимаемых партий 99.9% (при допустимой доле дефектных изделий 1%);

- объем изготавливаемой партии – 320 шт.

Подставив значения в формулу 4.3, получаем величину выборки равную 30 шт., что в свою очередь соответствует необходимой выборке для проведения испытаний на длительную безотказность (согласно ГОСТ РВ 20.57.414-97).

Установим критерии оценки после проведения испытаний. Для этого были взяты расчёты необходимых критериев согласно ГОСТ Р 57409-2017. Исходными данными для расчета норм являются результаты измерения параметров после проведения испытаний по Методике СТРЕСС-ТЕСТ.

До начала расчета проведена проверка однородности выборки, составленной из результатов измерений параметров до начала испытаний и результатов измерений параметров, полученных в процессе (после) проведения испытаний. Для этого применен Метод проверки однородности нескольких выборок с помощью критерия Краскела-Уоллиса. Данный Метод применим при объеме выборок ≥ 5 шт. Так как выборка для проведения испытаний по Методике СТРЕСС-ТЕСТ составляет 30 шт. – проводим расчет. Для расчета были взяты 5 выборок оксидно-электролитических танталовых конденсаторов:

1 выборка (30 шт.) – 6,3 В x 470 мкФ;

2 выборка (30 шт.) – 16 В x 47 мкФ;

3 выборка (30 шт.) – 25 В x 68 мкФ;

4 выборка (30 шт.) – 50 В x 33 мкФ;

5 выборка (30 шт.) – 100 В x 6,8 мкФ.

В качестве оценочного критерия взято увеличение ЭПС относительно первоначальных значений после проведения испытаний по Методике СТРЕСС-ТЕСТ. Увеличение ЭПС, как было указано в главе 3, показывает проблемы при изготовлении конденсаторов (например, отработка новых техпроцессов, режимов, применение новых материалов).

Проведена проверка однородности выборок объемом n_i каждая:
- все результаты измерений, содержащиеся в k выборках, расположили в один вариационный ряд (таблица 4.4);

Т а б л и ц а 4.4 – вариационные значения параметров выборок

| Номер выборки | Значения параметра (увеличение ЭПС $R_{эпс}$ относительно первоначальных значений, раз) |
|---------------|--|
| 1 | 4,2; 4,2; 4,2; 4,3; 4,5; 4,5; 4,6; 4,7; 4,7; 4,7; 4,8; 4,8; 4,8; 4,8; 4,8; 4,8; 4,9; 4,9; 5,0; 5,0 5,2; 5,2; 5,2; 5,2; 5,2; 5,2; 5,4; 5,4; 6,0; 12,4; |
| 2 | 2,6; 2,6; 2,9; 2,9; 3,0; 3,1; 3,1; 3,1; 3,3; 3,3; 3,4; 3,4; 3,6; 3,9; 4,0; 4,0; 4,0; 4,1; 4,6; 4,6; 4,6; 4,6; 4,6; 4,7; 5,0; 5,0; 5,0; 5,0; 5,1; 5,4 |
| 3 | 3,0; 3,1; 3,1; 3,1; 3,1; 3,1; 3,1; 3,3; 3,3; 3,3; 3,4; 3,5; 3,5; 3,5; 3,7; 3,7; 3,8; 3,8; 4,0; 4,0; 4,0; 4,0; 4,0; 4,2; 4,3; 4,4; 4,4; 4,4; 4,6; 5,1; |
| 4 | 2,0; 2,2; 2,2; 2,2; 2,2; 2,3; 2,3; 2,3; 2,3; 2,3; 2,4; 2,7; 2,9; 3,0; 3,0; 3,0; 3,0; 3,5; 3,5; 3,5; 3,5; 3,5; 3,5; 3,6; 3,6; 3,9; 3,9; 3,9; 4,1; 8,2 |
| 5 | 1,5; 1,5; 1,5; 1,5; 1,5; 1,5; 1,5; 1,5; 1,5; 1,6; 1,6; 1,7; 1,7; 1,8; 1,9; 1,9; 1,9; 1,9; 1,9; 2,0; 2,1; 2,1; 2,1; 2,2; 2,2; 2,2; 2,2; 2,2; 2,4; 2,4; 2,5; |

Каждому результату измерения присвоили ранг. Наименьший член получил ранг 1, следующий за наименьшим членом - ранг 2 и т.д. Наибольшему члену присвоили ранг N (если два или более членов вариационного ряда совпадают, то всем совпадающим членам присвоили одинаковый ранг, равный среднеарифметическому значению номеров совпадающих членов); данные приведены в таблице 4.5.

Т а б л и ц а 4.5 – Значения рангов

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Значение параметра | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 |
| Ранг | 5 | 10,5 | 12,5 | 14 | 17 | 20,5 | 23 | 28,5 | 35 | 39 |
| Значение параметра | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,6 |
| Ранг | 41 | 42,5 | 44 | 46 | 50,5 | 58 | 65 | 69 | 75 | 81 |
| Значение параметра | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,6 |
| Ранг | 83,5 | 85,5 | 88,5 | 94,5 | 99,5 | 102,5 | 105,5 | 108 | 110,5 | 115 |
| Значение параметра | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,4 | 6,0 | 8,2 | 12,4 |
| Ранг | 120,5 | 125,5 | 129,5 | 133,5 | 137,5 | 141,5 | 146 | 148 | 149 | 150 |

Далее высчитали сумму рангов в каждой выборке R_i (таблица 4.6).

Т а б л и ц а 4.6 – Сумма рангов

| Номер выборки | Ранги | Сумма рангов R_i |
|---------------|---|--------------------|
| 1 | 102,5; 102,5; 102,5; 105,5; 110,5; 110,5; 115; 120,5; 120,5; 120,5; 125,5; 125,5; 125,5; 125,5; 125,5; 125,5; 129,5; 129,5; 133,5; 133,5; 141,5; 141,5; 141,5; 141,5; 141,5; 141,5; 141,5; 141,5; 148; 150; | 3819,5 |
| 2 | 42,5; 42,5; 46; 46; 50,5; 58; 58; 58; 65; 65; 69; 69; 81; 88,5; 94,5; 94,5; 94,5; 99,5; 115; 115; 115; 115; 115; 120,5; 133,5; 133,5; 133,5; 133,5; 137,5; 141,5 | 2730,5 |
| 3 | 50,5; 58; 58; 58; 58; 58; 58; 65; 65; 65; 69; 75; 75; 75; 83,5; 83,5; 85,5; 85,5; 94,5; 94,5; 94,5; 94,5; 94,5; 102,5; 105,5; 108; 108; 108; 115; 137,5; | 2482,5 |
| 4 | 20,5; 28,5; 28,5; 28,5; 28,5; 35; 35; 35; 35; 35; 39; 44; 46; 50,5; 50,5; 50,5; 50,5; 75; 75; 75; 75; 75; 75; 81; 81; 88,5; 88,5; 88,5; 99,5; 149 | 1678 |
| 5 | 5; 5; 5; 5; 5; 5; 5; 5; 5; 5; 10,5; 10,5; 12,5; 12,5; 14; 17; 17; 17; 17; 17; 20,5; 23; 23; 23; 28,5; 28,5; 28,5; 28,5; 39; 39; 41; | 512,5 |

Так как совпадает небольшая часть результатов (меньше половины членов вариационного ряда) рассчитываем значение критерия H (увеличение ЭПС) по формуле 4.4

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3 \cdot (N+1) \quad (4.4)$$

где H – случайная величина;

k – число выборок;

n_j – объем j -й выборки;

R_j – сумма рангов в j -й выборке.

Суммарный объем всех выборок N :

$$N = \sum_{j=1}^n n_j \quad (4.5)$$

$N = 150$;

$$H = \frac{12}{150(150 + 1)} \cdot \left(\frac{3819,5^2}{30} + \frac{2730,5^2}{30} + \frac{2482,5^2}{30} + \frac{1678^2}{30} + \frac{512,5^2}{30} \right) - 3 \cdot 15 = 552254$$

Производим сравнение полученного значения H с табличным значением нулевой гипотезы согласно таблицы Е.5 ГОСТ Р 57409-2017 при значении числа степеней свободы f (формула 4.6) и уровне значимости $\alpha = 0,5$.

$$f = k - 1, \quad (4.6)$$

где k – число выборок

$f = 4$, $\alpha = 0,05$, находим H_0 .

$$H_0(\chi^2) = 3,36$$

Так как $H > H_0$ принимаем гипотезу о неоднородности измерений. Нормы на значение изменения ЭПС не могут быть равны нормам при приемке и поставке. Следовательно, необходимо проведение расчета границ норм.

Рассчитываем толерантные границы: закон распределения увеличения ЭПС не известен.

Значение параметра увеличения ЭПС располагаем в вариационный ряд.

$$x_i \leq x_{i+1},$$

где $i = 1, 2, \dots, n-1$

n – объем выборки;

x_i – значение параметра.

Вариационный ряд значений:

$$\begin{aligned} x_{1-9} &= 1,5; \quad x_{10,11} = 1,6; \quad x_{12,13} = 1,7; \quad x_{14} = 1,8; \quad x_{15-19} = 1,9; \quad x_{20,21} = 2,0; \quad x_{21-23} = 2,1; \quad x_{24-31} \\ &= 2,2; \quad x_{32-36} = 2,3; \quad x_{37-39} = 2,4; \quad x_{40} = 2,5; \quad x_{41,42} = 2,6; \quad x_{43} = 2,7; \quad x_{44-46} = 2,9; \\ x_{47-52} &= 3,0; \quad x_{53-61} = 3,1; \quad x_{62-66} = 3,3; \quad x_{67-69} = 3,4; \quad x_{70-78} = 3,5; \quad x_{79-81} = 3,6; \quad x_{82,83} = 3,7; \end{aligned}$$

$$x_{84,85} = 3,8; x_{86-89} = 3,9; x_{90-97} = 4,0; x_{98,99} = 4,1; x_{100-103} = 4,2; x_{104,105} = 4,3;$$

$$x_{106-108} = 4,4; x_{109,110} = 4,5; x_{111-117} = 4,6; x_{118-121} = 4,7; x_{122-127} = 4,8; x_{128,129} = 4,9;$$

$$x_{130-135} = 5,0; x_{136,137} = 5,1; x_{138-143} = 5,2; x_{144-147} = 5,4; x_{148} = 6,0; x_{149} = 8,2; x_{150} = 12,4.$$

Аномальным значением в полученном в ходе испытаний вариационном ряду согласно приложения А ГОСТ Р 57409-2017 является значение $x_{150} = 12,4$. Исключаем его из ряда.

Требуется рассчитать верхнюю толерантную границу при $\gamma=0,9$; $P=0,9$. Нижнюю границу рассчитывать не требуется, так как значения изменения ЭПС должно нормироваться по верхней границе.

В качестве верхней толерантной границы при одностороннем ограничении принимают наибольшее значение параметра $x_B = x_{\max}$.

Из таблицы Ж.2 ГОСТ Р 57409-2017 определяем значение объема выборки n , соответствующее $\gamma=0,9$; $P=0,9$; $n=140$.

Объем выборки $n_1=149 > n$, следовательно, в качестве верхней толерантной границы можно выбрать не наибольший, а другой член вариационного ряда. Определим номер S наибольшего члена ряда методом подбора с использованием формулы 4.7:

$$1 - P = \frac{\chi_{1-\gamma; 2b}^2}{2a + b - 1 + \frac{1}{2}\chi_{1-\gamma; 2b}^2} \quad (4.7)$$

где $a=n+1-r-S$;

$$b = r+S$$

$\chi_{1-\gamma; 2b}^2 - (1 - \gamma) \cdot 100 =$ процентная точка распределения χ^2 с $2b$ степенями свободы;

r и S - определяют методами подбора для заданных γ и P .

Задаем $S=2$, так как граница односторонняя, то $r=0$; $a=149+1-2-0=148$; $b=2+0=2$.

Определили $\chi_{0,1; 4}^2$ согласно приложения Е ГОСТ Р 57409-2017:

$$\chi_{0,1; 4}^2 = 30,08.$$

Далее провели расчет по формуле 4.7:

$$1 - P = \frac{30,08}{2 \cdot 148 + 2 - 1 + 3,89} = 0,1$$

Следовательно, в качестве верхней толерантной границы выбираем значение 2-го наибольшего члена вариационного ряда.

$$x_B = x_{148} = 6,0.$$

Соответственно, граница норм увеличения ЭПС относительно номинальных значений для методики СТРЕСС-ТЕСТ составляет не более 6,0 раз значений относительно первоначальных.

Соответственно конденсаторы считаются выдержавшими испытание по методике СТРЕСС-ТЕСТ, если:

- после испытаний значения ЭПС не превышает 6,0 раз значений от первоначальных.
- при заключительных проверках отсутствуют механические повреждения конденсаторов, не нарушена герметичность.

Для оценки правильности применения разработанной методики ускоренной оценки качества конденсаторов СТРЕСС-ТЕСТ были взяты 2 выборки конденсаторов K52-... номиналом 35 В × 100 мкФ, n = 30 шт.

На выборке 1 было проведено 10 циклов испытаний при напряжении равном 1,8 $U_{ном} = U_{исп} = 63$ В и температуре 20 °С. Контроль электрических параметров (ЭПС $R_{экв}$, Ом на частоте 100 кГц). Контроль ЭПС проводился в наиболее показательных точках: 0 цикл, 1 цикл, 7 цикл, 9 цикл, 10 цикл.

На выборке 2 проведено испытание на длительную безотказность $U_{исп} = 35$ В. $T_{исп} = 85$ °С, продолжительность испытаний – 24000 ч. Контроль ЭПС проводился в точках: 0 ч, 2000 ч, 3000ч, 8000 ч, 10 000 ч, 12 000 ч, 16 000 ч, 18 000 ч, 21 000 ч, 24 000 ч. После 24 000 ч произошел массовый отказ конденсаторов.

При испытаниях конденсаторов получены следующие усредненные данные, приведенные в таблицах 4.7 и 4.8.

Т а б л и ц а 4.7 – Результаты испытания выборки 1

| Номер цикла | 0 | 1 | 7 | 9 | 10 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R_{экв}$ ср, Ом $\leq 1,2$ | 0,201 | 0,222 | 0,241 | 0,199 | 0,352 |

Таблица 4.8 – Результаты испытания выборки 2

| Время испытаний, тыс.ч | 0 | 2 | 3 | 8 | 10 | 12 | 16 | 18 | 21 | 24 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Рэкв ср, Ом $\leq 1,2$ | 0,200 | 0,262 | 0,232 | 0,339 | 0,276 | 0,244 | 0,294 | 0,259 | 0,270 | 0,527 |

В ходе статистической обработки полученных в ходе испытаний данных получены регрессионная модель ЭПС в зависимости от цикла испытаний (рисунок 4.5) и регрессионная модель ЭПС в зависимости от времени испытаний (рисунок 4.6).

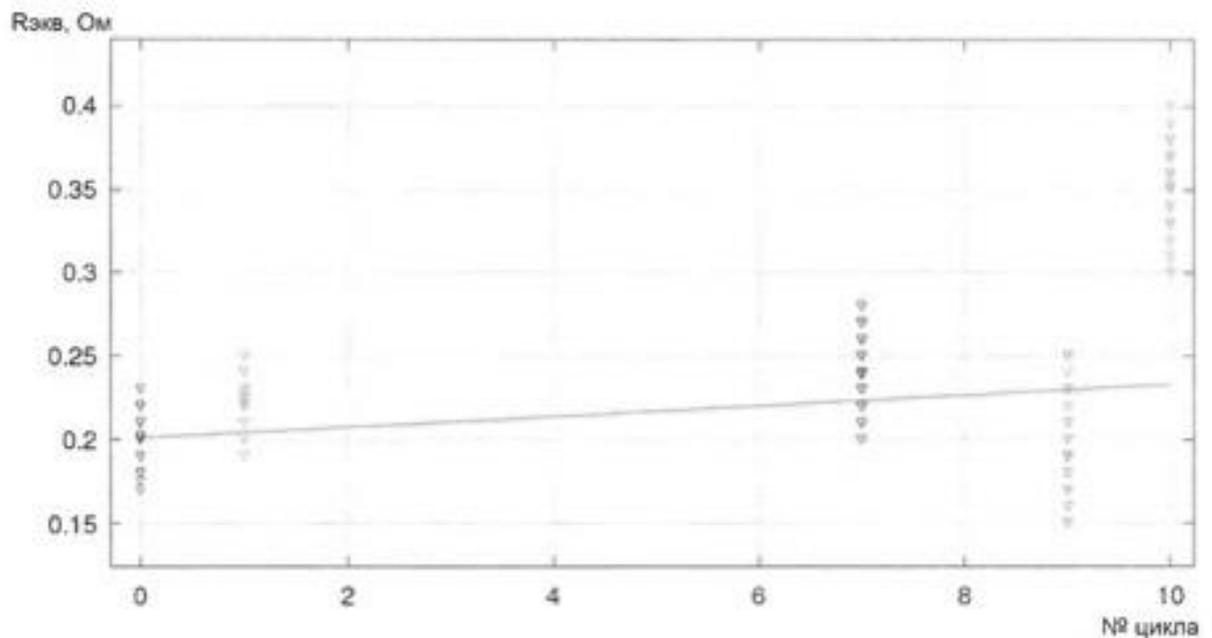


Рисунок 4.5– Регрессионная модель результатов испытаний по методике СТРЕСС-ТЕСТ (выборка 1)

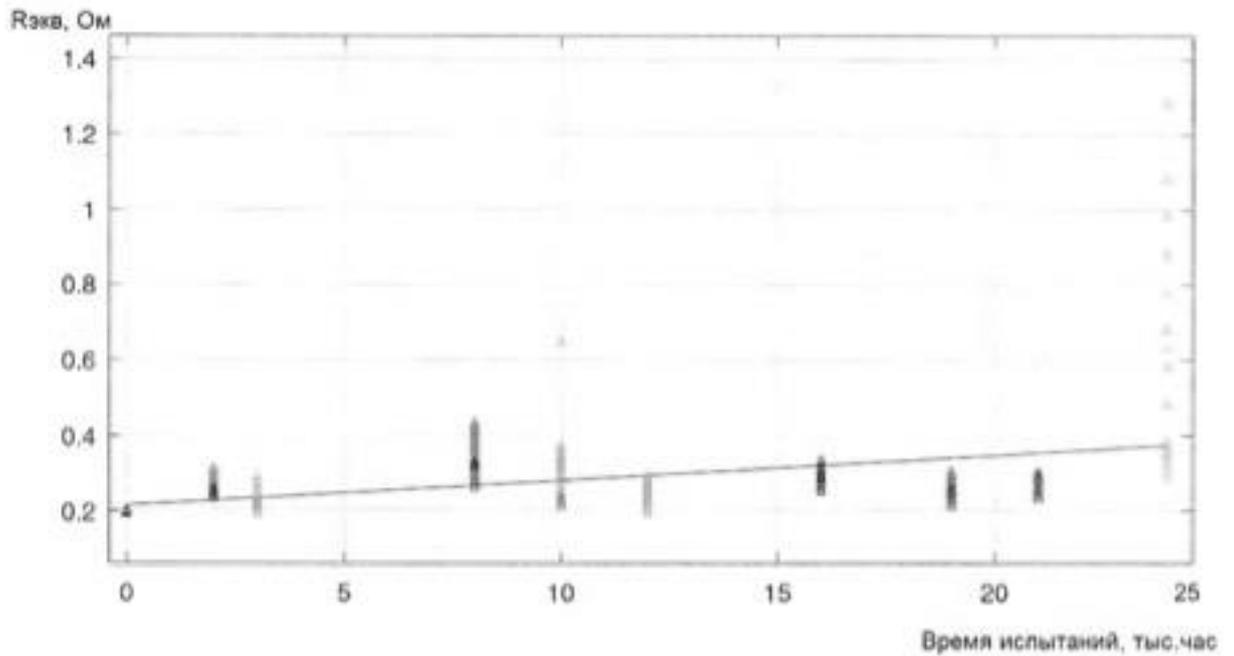


Рисунок 4.6 – Регрессионная модель результатов испытаний на длительную безотказность (выборка 2)

Из полученных данных наблюдается положительная связь между временем испытаний (рисунок 4.6) или количеством циклов (рисунок 4.5) СТРЕСС-ТЕСТА и ЭПС, что обосновывается физико-химическими процессами старения конденсаторов (деградация диэлектрика). Характер поведения регрессионных моделей результатов испытаний на длительную безотказность и результатов испытаний, полученных при проведении СТРЕСС-ТЕСТ аналогичны и сопоставимы друг с другом, что делает возможным применение методики СТРЕСС-ТЕСТ взамен устаревших методик испытаний, занимающих длительное время и требующих больших ресурсов.

При сравнении статистических данных после проведения испытаний по методике СТРЕСС-ТЕСТ и методом длительной безотказности установлено, что применение метода СТРЕСС-ТЕСТ целесообразно для ускоренной оценки качества объемно-пористых танталовых конденсаторов. По полученным регрессионным моделям испытаний наблюдается аналогичный характер поведения моделей, полученных при анализе результатов после испытаний на длительную безотказность и после СТРЕСС-ТЕСТ, но при этом экономится время проведения

испытаний и ресурсы. Для танталовых объемно пористых конденсаторов время проведения испытаний сокращается ориентировочно на 2,5 года.

4.2 Разработка установки разбраковки конденсаторов с применением методики СТРЕСС-ТЕСТ

В основу установки разбраковки электролитических конденсаторов с применением СТРЕСС-ТЕСТА легли вновь разработанные метод прогнозирования ресурса конденсаторов при использовании в цепях импульсного тока и измеритель разбраковщик по ЭПС, описанные в предыдущей главе 3.

Структурная схема установки разбраковки конденсаторов с применением СТРЕСС-ТЕСТА приведена на рисунке 4.7 [134].



Рисунок 4.7 – Структурная схема установки разбраковки конденсаторов с применением СТРЕСС-ТЕСТА

В качестве S_x , обозначен испытываемый конденсатор, помещенный в специальную камеру. К выводам конденсатора подключаются измерительные клеммы, а на корпус испытываемого конденсатора крепится датчик температуры, который контролирует температуру поверхности корпуса, и дает сигнал о прекращении эксперимента в случае приближения температуры корпуса к критической.

Блок коммутации, переключает режим проведения испытаний: испытание перенапряжением, или измерение. Режим измерения включается только после достижения испытываемого объекта стабилизации по температуре.

Блок управления и индикации служит для ввода данных об испытываемом конденсаторе: значение напряжения, значение температуры, допустимый характер отклонения по эквивалентному последовательному сопротивлению.

По окончании эксперимента через блок управления и индикации осуществляется вывод информации, об испытываемом объекте: количество проведенных циклов испытаний, значения температуры в каждом цикле, время проведения каждого цикла испытаний и характер отклонения эквивалентного последовательного сопротивления с указанием процентного отклонения от первоначального.

4.3 Применение методики СТРЕСС-ТЕСТ при анализе качества танталовых электролитических конденсаторов.

Одним из важнейших направлений в обеспечении коммутации источников питания, микропроцессоров и цифровых схем является достижение низких значений шумов при работе на высоких частотах. Чтобы реализовать это требование, необходимо применять компоненты с низким ЭПС, в частности это распространяется и на конденсаторы.

До 2000-х годов в России основным параметром, характеризующим сопротивление конденсатора, являлось полное сопротивление конденсатора (импеданс) Z , т.е. сопротивление конденсатора переменному синусоидальному току определенной частоты, обусловленное наличием у реального конденсатора наряду с емкостью C

также активного сопротивления и индуктивности. Следует отметить, что для конденсаторов, работающих при больших импульсных токах и на высокой частоте, например в фильтрах преобразователей, когда полное сопротивление конденсатора (импеданс) $Z \rightarrow ЭПС$, требуется более объективная оценка качества. При этом изменения в десятые и даже сотые доли Ом могут иметь существенное значение, в связи с чем исследование параметра $ЭПС$ представляется наиболее важным.

Цикл исследований качества электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов в зависимости от качества материалов и технологии в процессе производства позволил повысить значение процента выхода годной продукции. Однако необходимо развивать ускоренные способы анализа качества электролитических танталовых конденсаторов [135].

Проведено исследование метода ускоренного анализа качества электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов на основе прогноза изменения ЭПС при проведении СТРЕСС-ТЕСТА.

В качестве образцов для проведения исследований были взяты электролитические объемно-пористые танталовые конденсаторы, произведенные АО «Элеконд».

Исследование экспериментальной партии электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов номиналом $35 \text{ В} \times 100 \text{ мкФ}$ с использованием СТРЕСС-ТЕСТА проведено на выборке $n = 30$ шт. Объем такой выборки согласно ГОСТ РВ 20.57.414-97 достаточен для проведения испытаний на длительную безотказность.

Для объемно-пористых танталовых конденсаторов значение длительной безотказности может составлять до 40 000 ч.

Методика исследований на длительную безотказность включала следующие операции:

– измерения начальных значений параметров конденсаторов в контрольных точках проводилось при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$;

– испытание конденсаторов при напряжении, равном номинальному $U_{исп} = 35 \text{ В}$. Температура испытаний – максимальная температура среды, при которой допускается работа конденсаторов $T_{исп} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$;

- продолжительность испытаний – 24000 ч;
- контрольные точки – 2000 ч; 3000 ч; 4000 ч; 6000 ч; 8000 ч; 10000 ч; 12 000 ч; 16000 ч; 19000 ч; 21000 ч; 24000 ч.

Для анализа взяты следующие эксплуатационные характеристики конденсаторов: емкость конденсаторов C (мкФ) на частоте 50 Гц и ЭПС $R_{экв}$ (Ом) на частоте 100 кГц.

Метод проведения СТРЕСС-ТЕСТА включал следующие операции:

1. Проведение измерения начальных значений параметров конденсаторов при температуре 20 °С.

2. Проведение 10 циклов испытаний при напряжении равном $1,8 U_{ном} = U_{исп} = 63$ В и температуре 20 °С. Напряжение, при котором проводился СТРЕСС-ТЕСТ, соответствует напряжению формовки анода конденсатора и имитирует эту операцию, но уже при собранном в корпус конденсаторе.

3. Продолжительность каждого цикла – 5 мин.

4. Контроль параметров:

- емкость конденсаторов C (мкФ) на частоте 50 Гц;
- ЭПС $R_{экв}$ (Ом) на частоте 100 кГц;
- температура поверхности конденсатора T_k .

При проведении испытаний на длительную безотказность получены зависимости изменения значений емкости и ЭПС, представленные на рисунках 4.8 и 4.9.

Соединив точки верхних и нижних границ полей рассеяния, получим временные функции изменения емкости (рисунок 4.8).

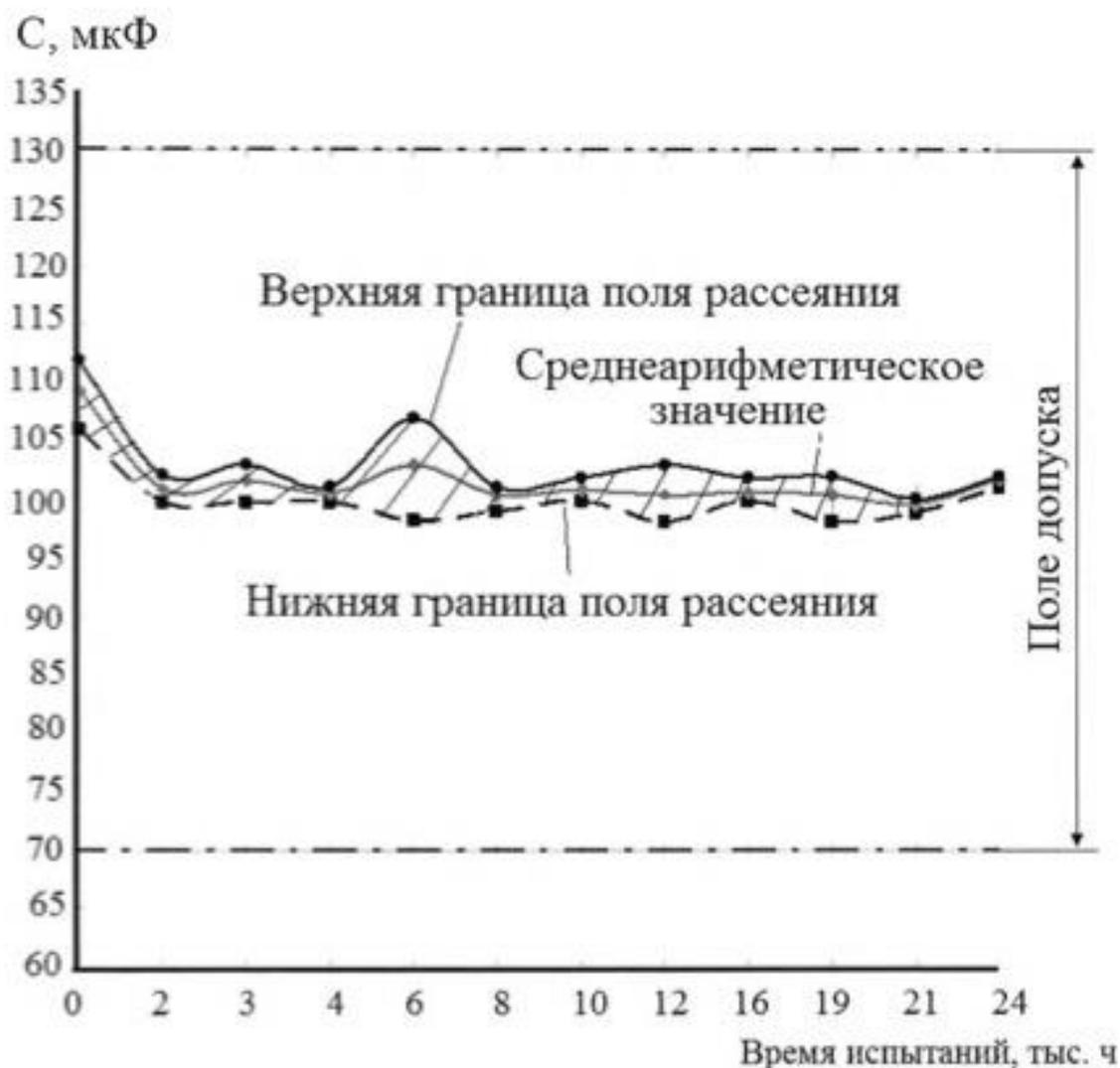


Рисунок 4.8 – График зависимости разброса емкости конденсаторов K52-... от времени эксплуатации

Из зависимости по рисунку 4.8 видно, что за все время эксперимента не произошло выхода границы поля рассеивания емкости за границы поля допуска (70–130 мкФ). К 2000 ч эксплуатации наблюдается снижение значений параметра C , а затем к 6000 ч эксплуатации наблюдается некоторое увеличение емкости, что, возможно, связано с подформовкой анода. После 6000 ч эксплуатации вновь наблюдается небольшое снижение емкости и с 8000 ч емкость стабилизируется.

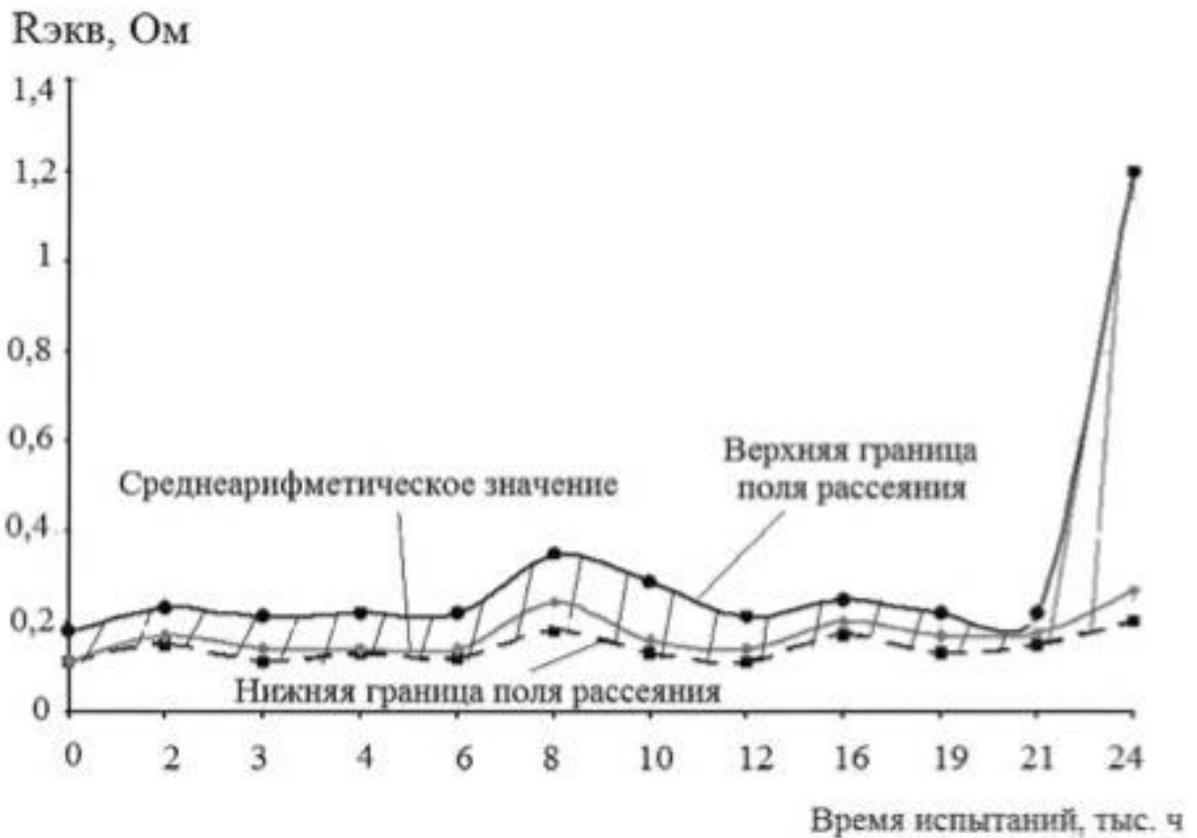


Рисунок 4.9 – График зависимости разброса ЭПС конденсаторов K52-... от времени эксплуатации

Из анализа временной зависимости эквивалентного последовательного сопротивления, приведенной на рисунке 4.9, следует, что до 21000 ч наблюдаются стабильные значения ЭПС с небольшим увеличением в контрольной точке 8000 ч, затем с 21000 ч наблюдается резкое увеличение в контрольной точке 24000 ч (максимальное значение ЭПС возросло с 0,2 до 1,2 Ом), что можно считать браковочным признаком.

Анализируя характеры зависимостей емкости конденсаторов C и ЭПС от времени эксплуатации (рисунок 4.8 и рисунок 4.9), можно сделать следующие выводы: отказ по параметру ЭПС наблюдается с 21000 ч, даже с учетом ошибок технологических операций, приводящих к завышенным значениям C (что не является браковочным признаком и в дальнейшем дает ложноположительный результат при контроле параметров при проведении испытаний на длительную безотказность), отказ же по параметру C не происходит даже после 24000 ч эксплуатации.

Таким образом подтверждается, что анализ выходного параметра технологического процесса ЭПС позволяет спрогнозировать момент выхода границы поля рассеивания параметра за границы поля допуска и заблаговременно определить момент появления бракованных изделий.

Для ускоренной оценки качества конденсаторов был проведен СТРЕСС-ТЕСТ. На рисунках 4.10 и 4.11 представлены характеры изменения емкости и ЭПС конденсаторов при проведении СТРЕСС-ТЕСТА.

C , мкФ

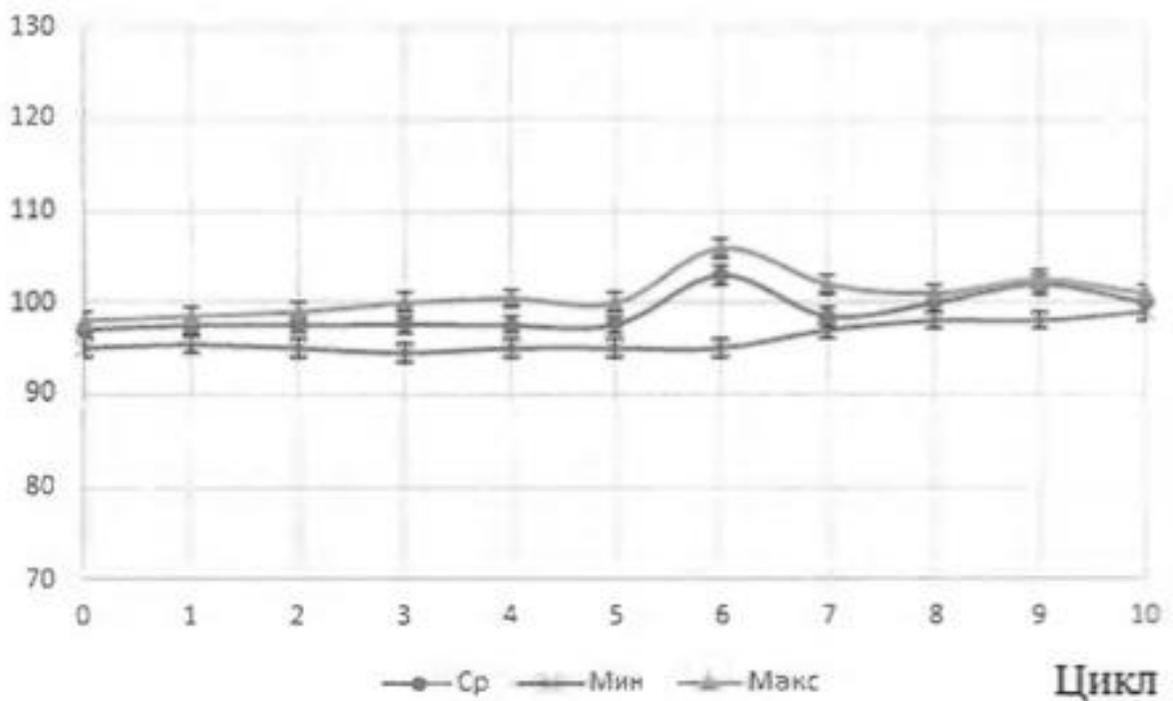


Рисунок 4.10 – Характер изменения C , мкФ конденсаторов K52-... номиналом 35 В × 100 мкФ при проведении СТРЕСС-ТЕСТА

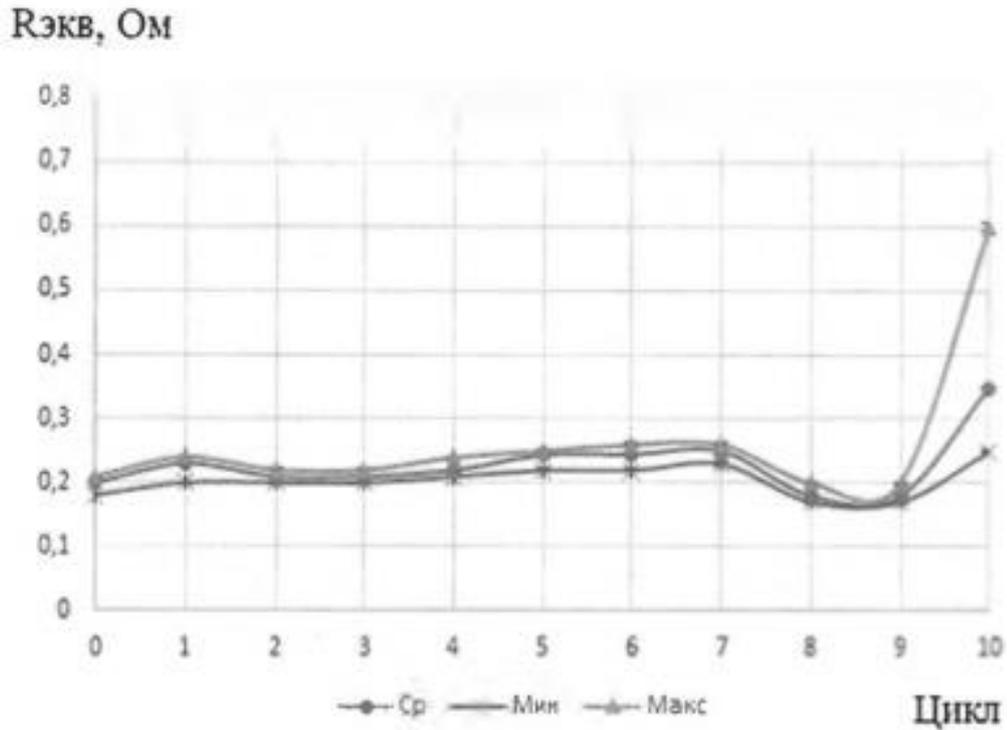


Рисунок 4.11 – Характер изменения ЭПС, Ом конденсаторов К52-... номиналом 35 В×100 мкФ при проведении СТРЕСС-ТЕСТА

В ходе проведения СТРЕСС-ТЕСТА в цикле 6 наблюдается увеличение емкости, а затем емкость вновь стабилизируется. Тогда как эквивалентное последовательное сопротивление до 7 цикла испытаний стабильно, с 7 по 9 цикл данный параметр снижается, а уже с 9 цикла происходит резкое его увеличение – с 0,19 до 0,35 Ом, что можно считать браковочным признаком.

По характеру изменения ЭПС в ходе испытаний, можно сделать вывод, что в дальнейшем при использовании его на высоких частотах, произойдет дальнейшее увеличение сопротивления, что приведет к преждевременному выходу из строя и разрушению, тогда как по параметру С это не наблюдается.

На рисунке 4.12 представлен танталовый анод до и после проведения СТРЕСС-ТЕСТА.

Наибольшие необратимые изменения параметров вызываются длительным воздействием электрической нагрузки, при которой происходят процессы старения, ухудшающие электрическую прочность. Это необходимо учитывать, выбирая

значение рабочего напряжения, особенно при длительной эксплуатации конденсаторов.

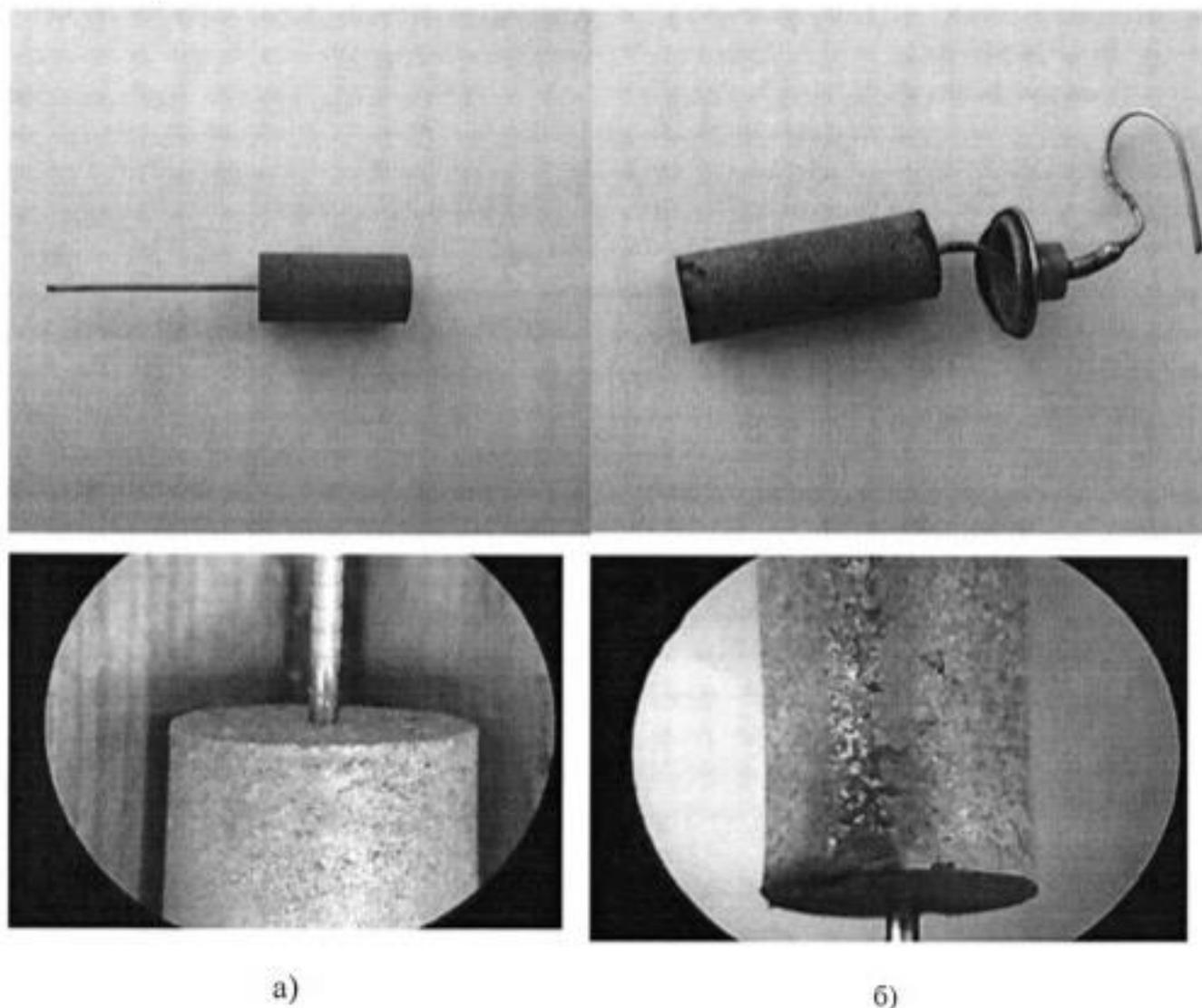


Рисунок 4.12 – Фотографии танталового анода (увеличение 10х)
 а) до проведения СТРЕСС-ТЕСТА
 б) после проведения СТРЕСС-ТЕСТА

При постоянном напряжении основной причиной старения являются электрохимические процессы, возникающие в диэлектрике под действием постоянного поля и усиливающиеся с повышением температуры и влажности окружающей среды. Степень их влияния на параметры конденсаторов определяется видом диэлектрика и конструктивным исполнением конденсатора. При этом суммарное изменение параметров конденсаторов не превышает значений, гарантируемых на период минимальной наработки, приведенных в справочных

данных. При переменном напряжении и импульсных режимах основной причиной старения являются ионизационные процессы, возникающие внутри диэлектрика или у краёв обкладок, преимущественно в местах газовых включений. Данное явление характерно в основном для высоковольтных конденсаторов. Ионизация разрушает органические диэлектрики в результате бомбардировки их возникающими ионами и электронами, а также за счет агрессивного действия на диэлектрик образовавшихся озона и окислов азота.

Подобный эффект мы наблюдаем и после проведения ускоренной оценки долговечности (рисунок 4.13).

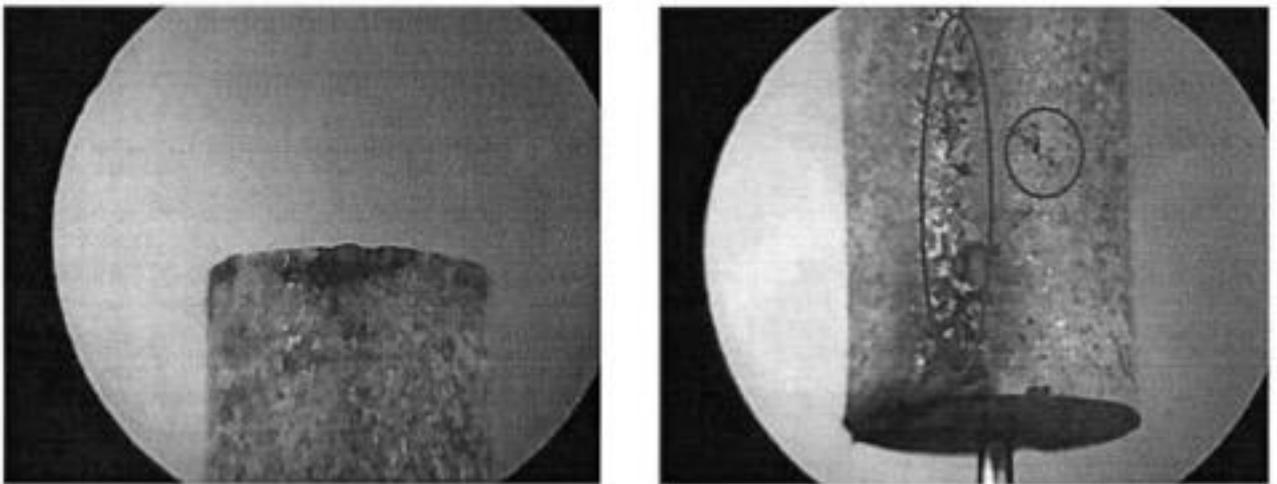


Рисунок 4.13 – Дефекты танталового анода после проведения испытаний на длительную безотказность (увеличение 10х)

Несмотря на то, что допускаемое значение напряжённости электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытаниях выбирается с некоторым запасом, эксплуатация под электрической нагрузкой, превышающей номинальное напряжение, резко снижает надёжность конденсаторов. Превышение допустимой переменной составляющей напряжения может вызвать нарушения теплового равновесия в конденсаторе, приводящего к термическому разрушению диэлектрика. Развитие этого явления обусловлено тем, что активная проводимость диэлектрика возрастёт с повышением температуры.

Анализ выходных параметров технологического процесса позволяет заблаговременно определить момент появления бракованных изделий не по

основному параметру конденсатора – емкости C , а по справочному параметру – ЭПС, что является важным при проведении ускоренных испытаний.

4.4 Применение метода СТРЕСС-ТЕСТ при анализе качества оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы, как правило, состоят из двух проводящих электричество обкладок, разделенных слоем диэлектрика. Один из электродов, называемый анодом, сделан из алюминиевой фольги с увеличенной эффективной площадью поверхности и покрыт диэлектрическим слоем оксида алюминия (Al_2O_3). В отличие от других конденсаторов в оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторах вторым электродом, называемым катодом, служит проводящая жидкость, называемая электролитом. Вторая алюминиевая фольга, называемая катодной фольгой, служит контактной поверхностью для проходящего через электролит тока.

В качестве образцов для проведения исследований были взяты оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы, серии K50-XX номиналом 16В 220 мкФ в количестве $n=30$ шт.

Методика проведения СТРЕСС-ТЕСТА оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов включала следующие операции [136]:

1. Проведение измерения начальных значений параметров конденсаторов при температуре 20 °С.

2. Проведение 6 циклов испытаний при напряжении равном $U_{исп}=1,8 \cdot U_{ном}$ и температуре 20 °С.

Напряжение, при котором проводился СТРЕСС-ТЕСТ, соответствует напряжению тренировки секции конденсатора и имитирует эту операцию, но уже при собранном в корпус конденсаторе.

3. Продолжительность каждого цикла – 5 мин.

4. Контроль параметров:

– емкость конденсаторов C (мкФ) на частоте 50 Гц;

– эквивалентное последовательное сопротивление $R_{эв}$ (МОм).

Для данного типа конденсаторов, величина ЭПС не нормируется и ее контроль не производится. Контроль эквивалентного последовательного сопротивления, проводится на частоте 100 кГц;

5. Испытания проводились при контроле температуры поверхности корпуса и при достижении $T_k=65$ °С прекращались. Это связано с конструктивными особенностями оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов и пагубным влиянием повышенной температуры на параметры электролитов.

Измерение электрических параметров производилось, после достижения конденсатором температуры окружающей среды. Результаты представлены на рисунке 4.14.

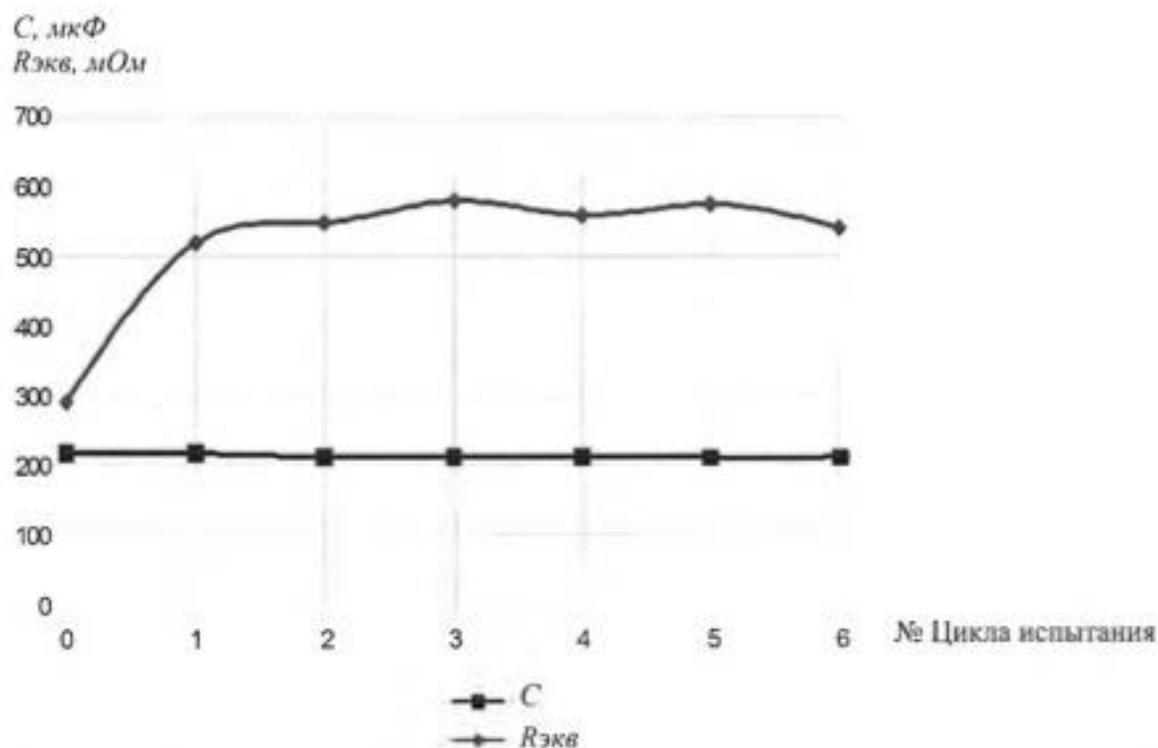


Рисунок 4.14 – Характер изменения емкости и ЭПС во время проведения СТРЕСС-ТЕСТА. Конденсатор серии K50-XX

На представленных на рисунке 4.14 зависимостях в первом цикле проведения СТРЕСС-ТЕСТА наблюдается значительный скачок эквивалентного последовательного сопротивления, и дальнейшее планомерное его увеличение.

При этом в обоих случаях, значение емкости остается практически неизменным на протяжении всего времени проведения СТРЕСС-ТЕСТА.

Таким образом, исходя из представленных на рисунке 4.14 зависимостей, применение СТРЕСС-ТЕСТА при контроле качества оксидно-электрических алюминиевых конденсаторов, дает более полное представление об изменениях критических электрических параметров и позволяет производить ускоренную оценку характера изменения ЭПС. Также из представленных зависимостей можно сделать вывод, что данный тип конденсаторов менее приспособлен к работе в цепях пульсирующего тока.

4.5 Контроль качества конденсаторов различной конструкции с использованием методики СТРЕСС-ТЕСТ

В качестве образцов для проведения исследований были взяты электролитические объемно-пористые танталовые конденсаторы, оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы и конденсаторы с двойным электрическим слоем произведенные АО «Элеконд» [137].

Исследование экспериментальной партии электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов номиналом 35 В × 100 мкФ, оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов номиналом 16 В × 220 мкФ и конденсаторов с двойным электрическим слоем номиналом 2,7 В × 1 Ф с использованием метода СТРЕСС-ТЕСТ проведено на выборках $n = 30$ шт., что составляет 5% от партии.

Объем такой выборки согласно ГОСТ РВ 20.57.414-97 и требованиям технических условий на конденсаторы достаточен для проведения испытаний на длительную безотказность. Выборки формировались методом случайного отбора без подбора конденсаторов по емкости и ЭПС.

Методика исследований на длительную безотказность включала следующие операции:

- измерения начальных значений параметров конденсаторов и в контрольных точках проводилось при температуре 20 °С;

- испытание конденсаторов при напряжении, равном номинальному $U_{исп}$;

- температура испытаний – максимальная температура среды, при которой допускается работа конденсаторов $T_{исп} = 85$ °С (для объемно-пористых танталовых и алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов), $T_{исп} = 65$ °С (для конденсаторов с двойным электрическим слоем);

- продолжительность испытаний – 24000 ч (для объемно-пористых танталовых конденсаторов), 3000 ч (для алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов), 600 ч (для конденсаторов с двойным электрическим слоем).

Для анализа взяты следующие эксплуатационные характеристики объемно-пористых танталовых и алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов:

1. Емкость конденсаторов C на частоте 50 Гц;
2. ЭПС на частоте 100 кГц.

Для конденсаторов с двойным электрическим слоем взяты следующие характеристики:

1. Емкость конденсаторов C на постоянном токе;
2. ЭПС на постоянном токе.

Методика проведения СТРЕСС-ТЕСТА включала следующие операции:

1. Проведение измерения начальных значений параметров конденсаторов при температуре 20 °С.

2. Проведение 10 циклов испытаний при напряжении равном $1,8 U_{ном} = U_{исп}$ и $T = 20$ °С. Напряжение, при котором проводился СТРЕСС-ТЕСТ, соответствует напряжению формовки анода конденсатора и имитирует эту операцию, но уже при собранном в корпус конденсаторе.

3. Продолжительность каждого цикла – 5 мин.

4. Контроль параметров.

Результаты испытаний объемно-пористых танталовых конденсаторов на длительную безотказность и методики СТРЕСС-ТЕСТ приведены на рисунках 4.15-4.18.

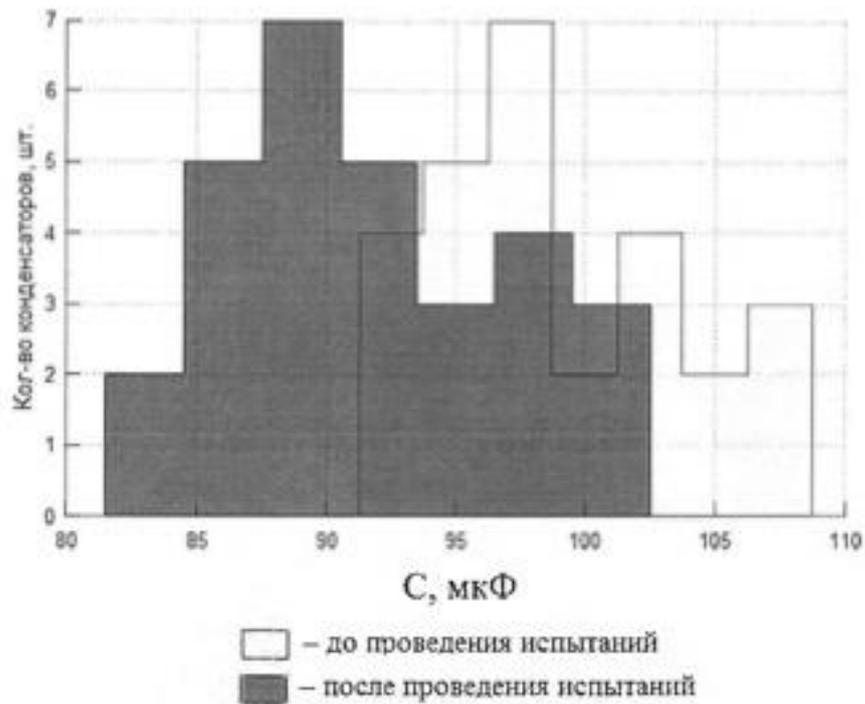


Рисунок 4.15 – Распределение емкости объемно-пористых танталовых конденсаторов при испытании на длительную безотказность

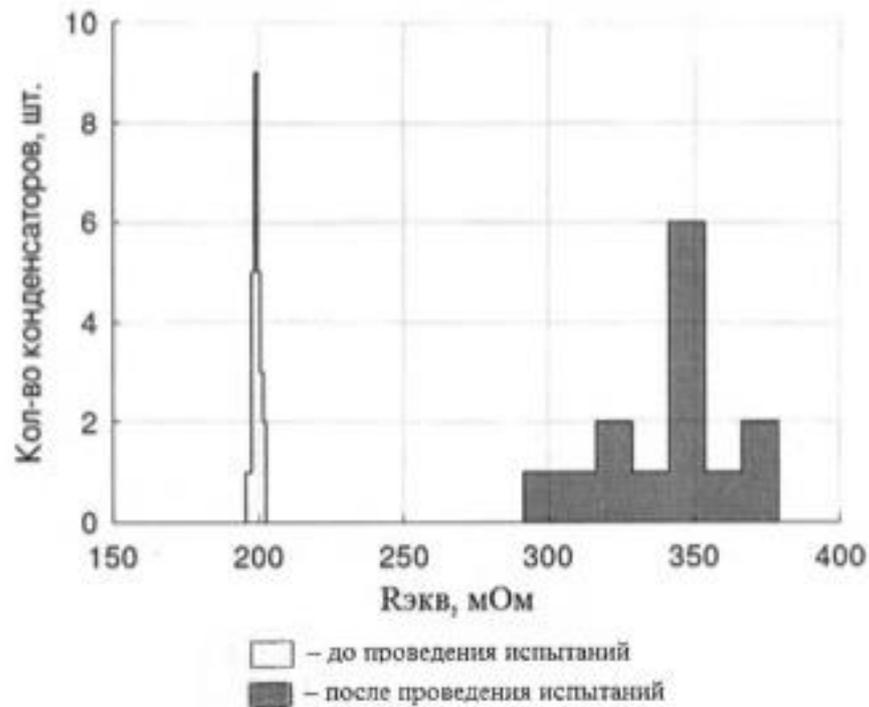


Рисунок 4.16 – Распределение ЭПС объемно-пористых танталовых конденсаторов при испытании на длительную безотказность

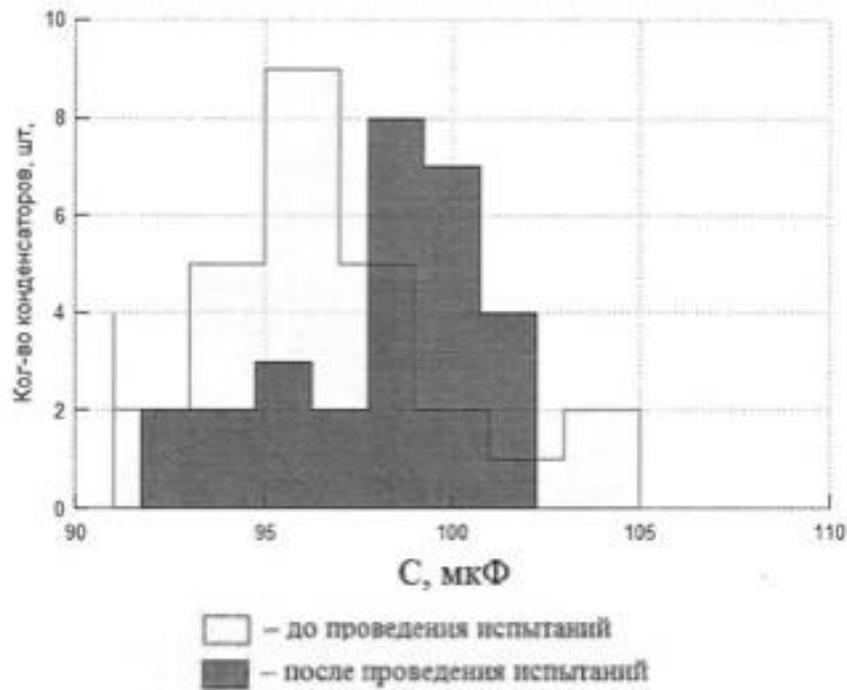


Рисунок 4.17 – Распределение емкости объемно-пористых танталовых конденсаторов при проведении СТРЕСС-ТЕСТ

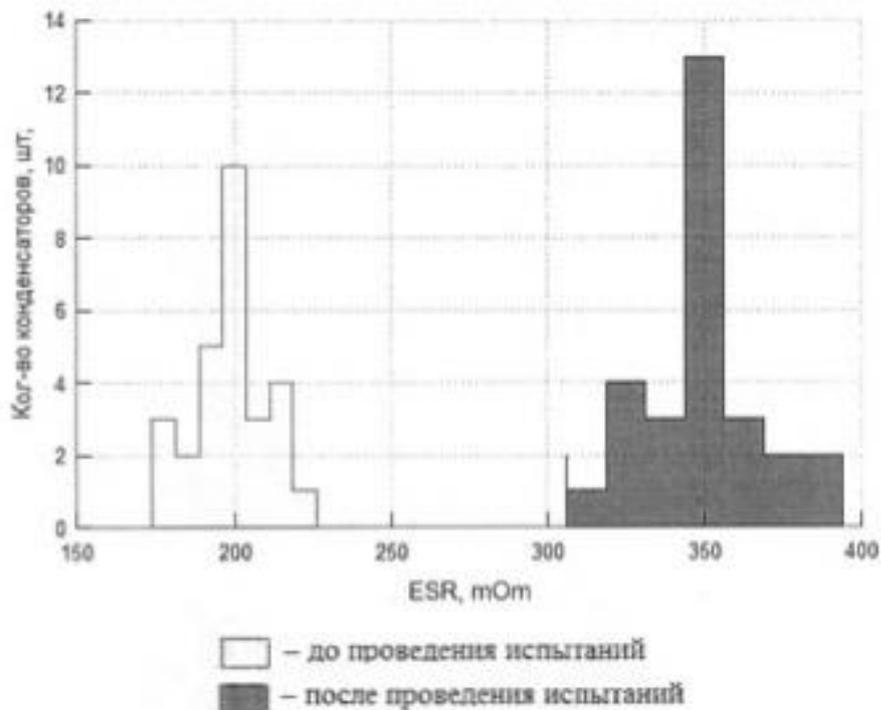


Рисунок 4.18 – Распределение ЭПС объемно-пористых танталовых конденсаторов при проведении СТРЕСС-ТЕСТ

При проведении оценки распределения емкости, приведенной на гистограммах 4.15 и 4.17 наблюдается, что разброс параметров по емкости укладывается в границы $\pm 20\%$, но при этом значение параметров с максимальной частотой вхождения по рядам распределения после проведения испытаний на длительную безотказность отличается не более чем на 10%.

Однако, при сравнении результатов контроля ЭПС после проведения СТРЕСС-ТЕСТА наблюдается аналогичный характер изменения параметра как и после проведения испытаний на длительную безотказность. При этом, как и при проведении испытаний на длительную безотказность, так и после проведения СТРЕСС-ТЕСТА, максимальная частота вхождения значений смещается со значений порядка 200 мОм к значениям порядка 350 мОм.

При сравнении распределения параметров на гистограммах, приведенных на рисунках 4.16 и 4.18 (до и после проведения испытаний на длительную безотказность и после проведения СТРЕСС-ТЕСТА), наблюдается одинаковое характерное смещение распределения значений ЭПС в сторону увеличения, но при этом характер отклонения параметра сопоставим, как для испытаний на длительную безотказность, так и при проведении СТРЕСС-ТЕСТА, тогда как сроки проведения испытаний отличаются в 24000 раз (2.7 лет против 1 часа).

Результаты испытаний оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов на длительную безотказность и методикой СТРЕСС-ТЕСТ приведены на рисунках 4.19-4.22.

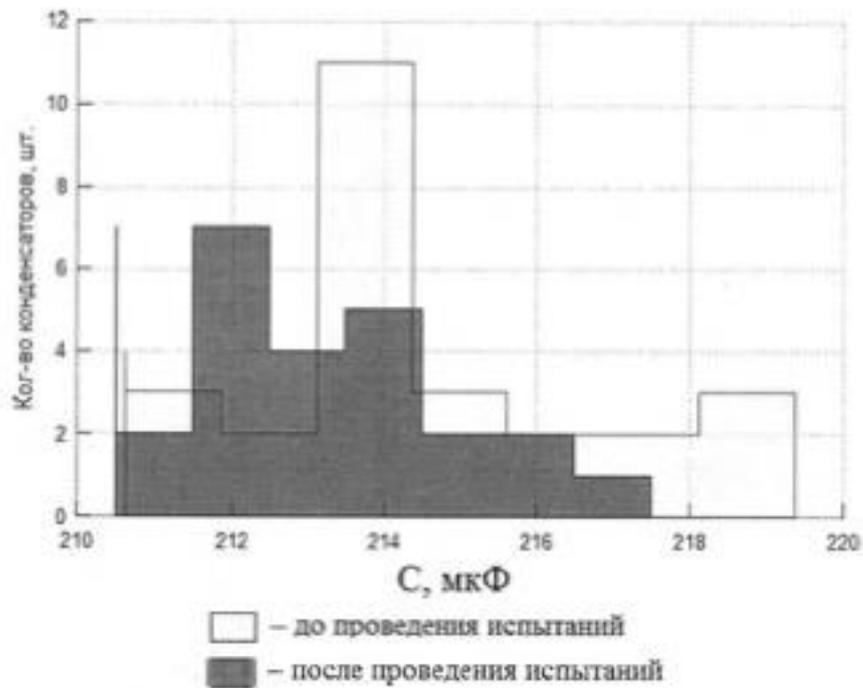


Рисунок 4.19 – Распределение емкости оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов при испытании на длительную безотказность

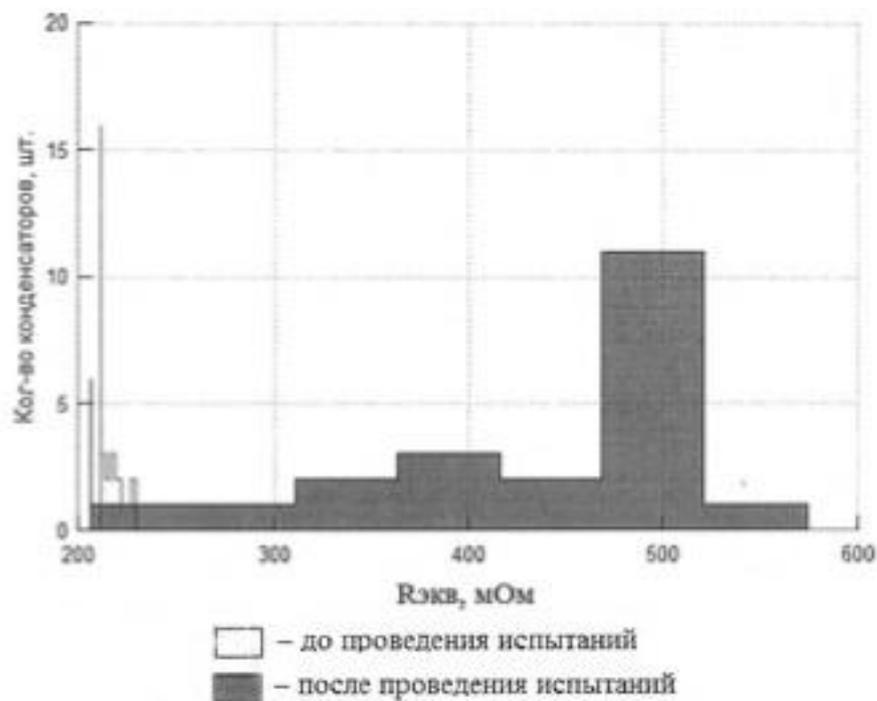


Рисунок 4.20 – Распределение ЭПС оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов при испытании на длительную безотказность

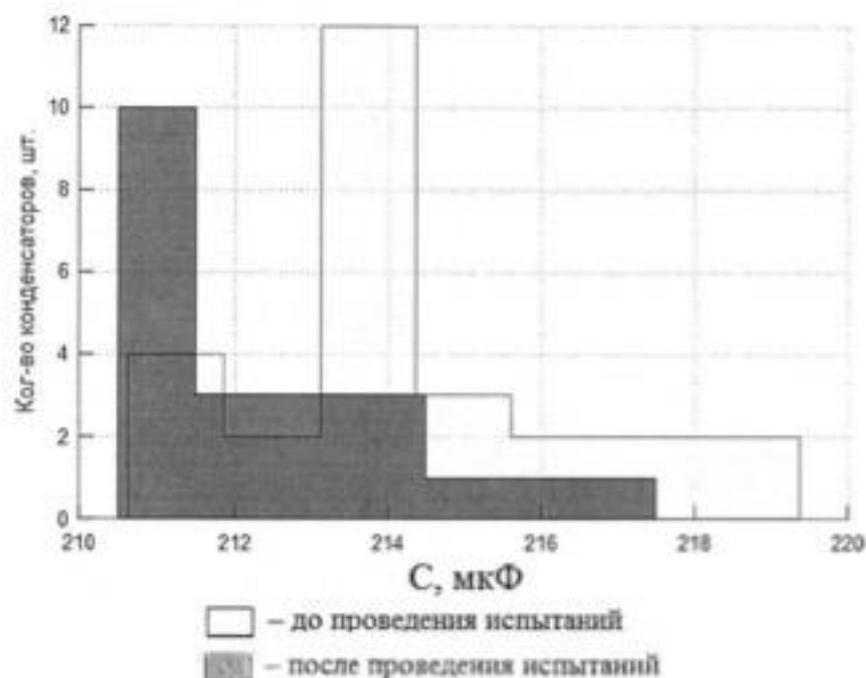


Рисунок 4.21 – Распределение емкости оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов при проведении СТРЕСС-ТЕСТ

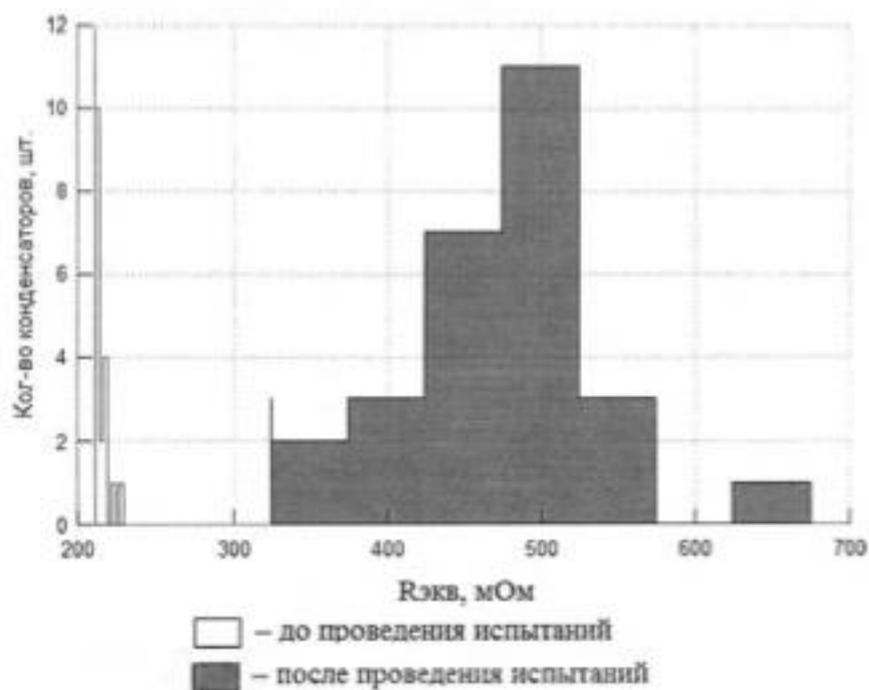


Рисунок 4.22 – Распределение ЭПС оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов при проведении СТРЕСС-ТЕСТ

При проведении оценки распределения емкости, приведенной на гистограммах 4.19 и 4.21, наблюдается смещение значений с максимальной частотой вхождения

в сторону уменьшения не более чем на 7% от номинального значения при допуске на параметр $\pm 20\%$.

При сравнении распределения параметров на гистограммах, приведенных на рисунках 4.20 и 4.22 (до и после проведения испытаний на длительную безотказность и после проведения СТРЕСС-ТЕСТА), наблюдается аналогичное поведение характера отклонения параметра как и у объемно-пористых танталовых конденсаторов, т. е. Характер отклонения при сравнении изделий с максимальной частотой вхождения одинаковый и после проведения испытаний на длительную безотказность и после проведения СТРЕСС-ТЕСТ. Смещение эквивалентного последовательного сопротивления происходит из района значений 200 мОм в диапазон значений порядка 500 мОм.

Результаты испытаний конденсаторов с двойным электрическим слоем на длительную безотказность и методикой СТРЕСС-ТЕСТ приведены на рисунках 4.23-4.26.

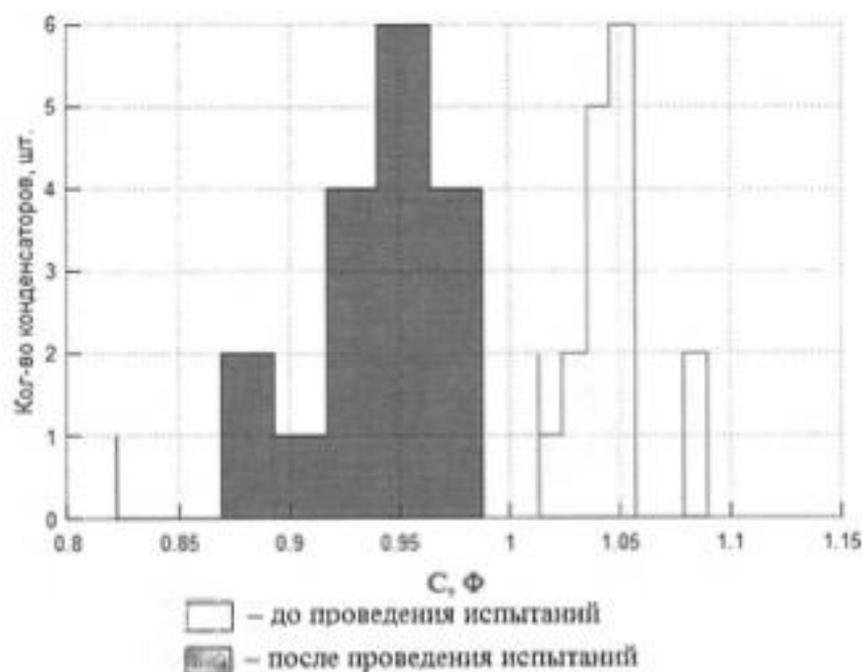


Рисунок 4.23 – Распределение емкости конденсаторов с двойным электрическим слоем при испытании на длительную безотказность

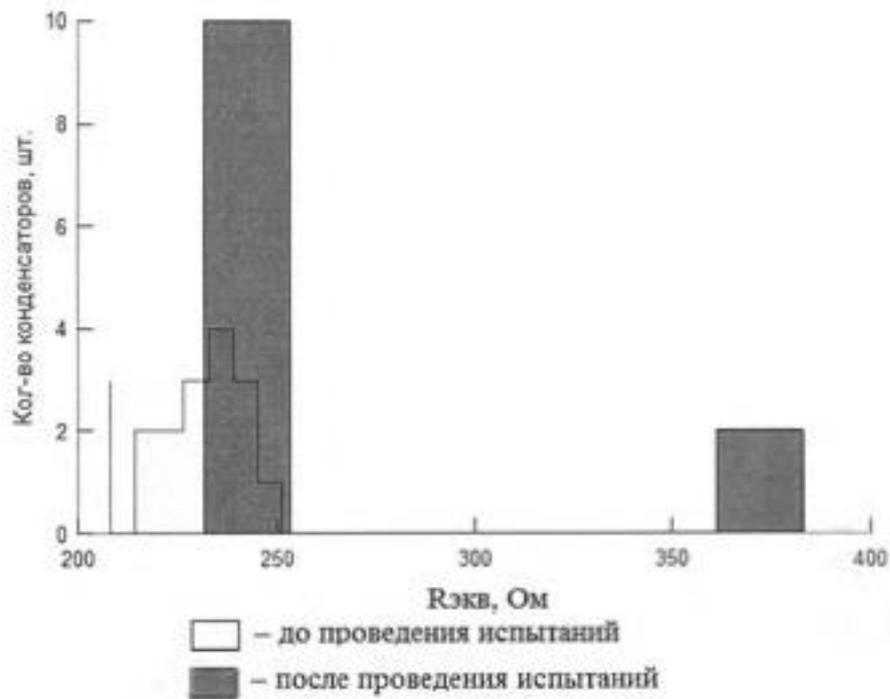


Рисунок 4.24 – Распределение ЭПС конденсаторов с двойным электрическим слоем при испытании на длительную безотказность

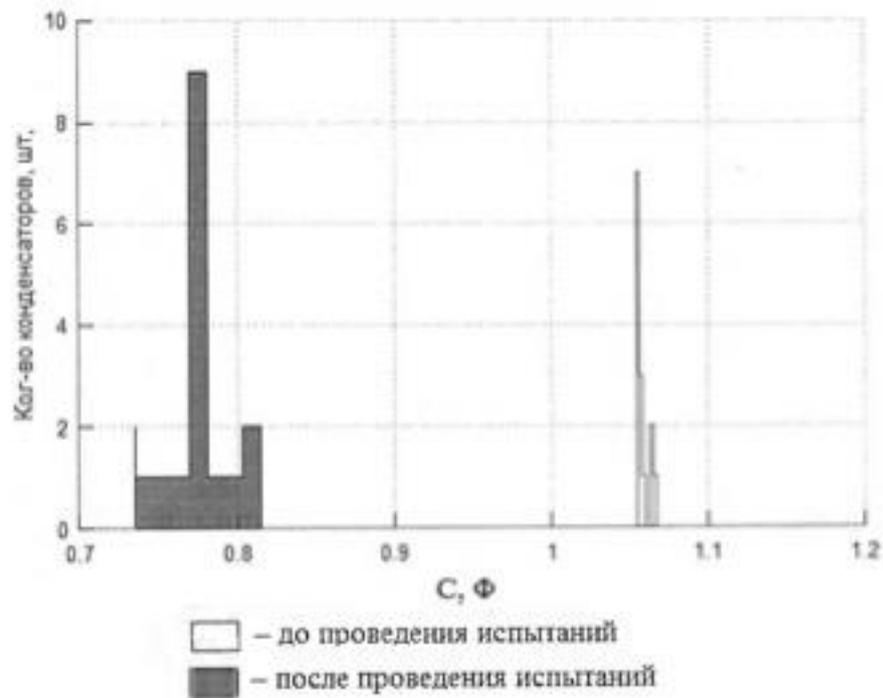


Рисунок 4.25 – Распределение емкости конденсаторов с двойным электрическим слоем при проведении СТРЕСС-ТЕСТ

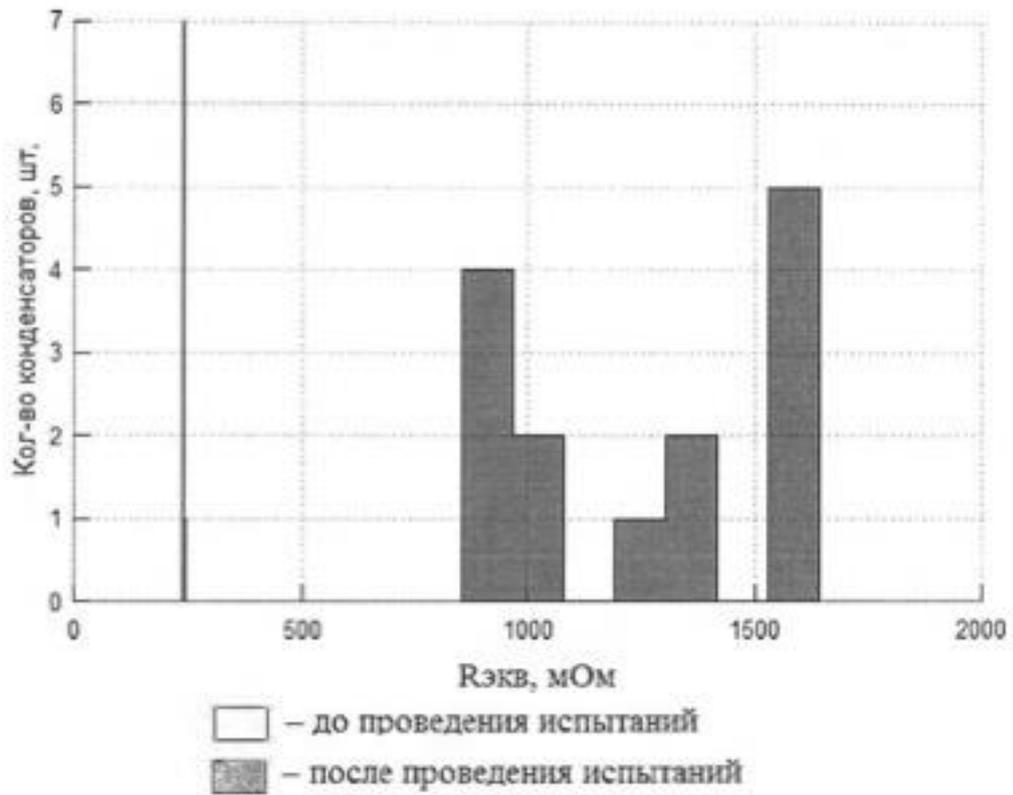


Рисунок 4.26 – Распределение ЭПС конденсаторов с двойным электрическим слоем при проведении СТРЕСС-ТЕСТ

При проведении оценки распределения емкости и ЭПС после проведения испытаний на длительную безотказность и после проведения СТРЕСС-ТЕСТ, значений, приведенных на гистограммах (рисунки 4.23-4.26), отсутствует возможность проведения аналогий по частотам вхождения параметров в ряды распределения, что связано с отличной структурой строения конденсаторов с двойным электрическим слоем от классической конструкции конденсаторов.

Выводы по главе IV

1. Разработана новая методика СТРЕСС-ТЕСТ, с использованием повышенной нагрузки, а именно проведение 10 циклов испытаний с приложением повышенного напряжения (коэффициент 1,8 от номинального напряжения) в течение 5 минут каждый. Данная методика позволяет заблаговременно выявлять некачественные конденсаторы

2. Разработана установка для проведения испытаний с применением методики СТРЕСС-ТЕСТ, включающая блок управления и индикации, блок коммутации, источник питания, блок контроля температуры, измерительную камеру, измеритель/разбраковщик по ЭПС.

3. Применение методики СТРЕСС-ТЕСТ при контроле качества оксидно-электрических алюминиевых конденсаторов дает более полное представления об изменениях критичных электрических параметров и позволяет производить ускоренную оценку характера изменения ЭПС.

4. Применение методики СТРЕСС-ТЕСТ при контроле оксидно-электрических танталовых конденсаторов позволяет заблаговременно определить момент появления бракованных изделий не по основному параметру конденсатора – емкости, а по справочному параметру – ЭПС.

5. Применение методики СТРЕСС-ТЕСТ для конденсаторов с двойным электрическим слоем не представляется возможным в связи с отличной структурой по сравнению с классической конструкцией конденсаторов и требует дополнительного подбора режимов проведения ускоренных испытаний.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при контроле электрических характеристик оксидно-электролитических конденсаторов, в том числе конденсаторов с двойным электрическим слоем, наиболее важным является контроль параметра эквивалентное последовательное сопротивление, зачастую не контролируемый в рамках производства оксидно-электролитических конденсаторов. Из проведенного анализа характеров зависимостей емкости и эквивалентного последовательного сопротивления от времени эксплуатации конденсаторов получено, что отказ по параметру эквивалентное последовательное сопротивление наблюдается уже с 2000 час, тогда как отказ по параметру емкость происходит много позже 3000 час эксплуатации.

2. Проведенные исследования электрических параметров алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов, танталовых объемно-пористых конденсаторов, конденсаторов с двойным электрическим слоем при измерении обоснованного объема выборки в технологическом процессе доказали возможность прогноза момента выхода эквивалентного последовательного сопротивления за границы поля допуска, а так же момента появления брака, что легло в основу устройства для контроля конденсаторов по этому параметру, основанное на анализе прохождения тестового сигнала с заданной частотой через измеряемую цепь, обладающую комплексным сопротивлением.

3. Разработана новая методика СТРЕСС-ТЕСТ для ускоренной оценки качества оксидно-электролитических конденсаторов с использованием повышенной нагрузки, а именно проведение 10 циклов испытаний с приложением повышенного напряжения (коэффициент 1,8 от номинального напряжения) в течение 5 минут каждый. Методика позволяет отбраковывать некачественные конденсаторы после всего цикла изготовления до отгрузки их потребителю.

4. Разработана автоматизированная установка для проведения контроля по методике СТРЕСС-ТЕСТ, включающая блоки управления и индикации, коммутации, контроля температуры и измеритель-разбраковщик ЭПС.

Установка позволяет проводить оценку качества оксидно-электролитических конденсаторов с сокращением времени испытаний с 2,5 лет до 1 часа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день конденсаторы являются одними из самых массовых компонентов РЭА, а мировое конденсаторостроение представляет собой мощную индустрию с ежегодным приростом объема продаж около 30%. Одновременно с количественными изменениями в производстве конденсаторов происходят серьезные качественные изменения в их номенклатуре, связанные с внедрением новых материалов и технологий, новых конструктивных решений, отражающих требования и тенденции развития сферы применения. За последние 20 лет характеристики конденсаторов радикально улучшились, это заставляет конструкторов находить более лучшие, быстрые и дешевые решения. Подтверждение этому – в популярности электронных устройств, которыми мы пользуемся в повседневной жизни и без которых мы не представляем свою жизнь.

Наиболее новым и перспективным элементом в мировом конденсаторостроении является конденсатор с ДЭС. За данным типом конденсаторов будущее мира.

Проведение правильной оценки электрических характеристик оксидно-электролитических конденсаторов и конденсаторов с ДЭС на стадии производства ведет к снижению отказов конденсаторов на стадии эксплуатации. Для этого и была разработана и внедрена в производство АО «Элеконд» методика оценки качества оксидно-электролитических конденсаторов СТРЕСС-ТЕСТ с использованием повышенной нагрузки, а именно проведение 10 циклов испытаний с приложением повышенного напряжения (коэффициент 1,8 от номинального напряжения) в течение 5 минут каждый.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

ДЭС - двойной электрический слой

ЖКД - жидко-кристаллический дисплей

ИРЭПС - измеритель/разбраковщик конденсаторов по эквивалентному последовательному сопротивлению

НТД - нормативно-техническая документация

РЭА - радиоэлектронная аппаратура

РЭМ - растровый электронный микроскоп

СТРЕСС-ТЕСТ - «стрессовый» тест конденсаторов

ЭПС (ESR) - эквивалентное последовательное сопротивление

$f_{рез}$ - резонансная частота

$U_{ном}$ - номинальное напряжение

$U_{раб}$ - рабочее напряжение

$U_{исп}$ - испытательное напряжение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич, В. Электролитические конденсаторы: особенности конструкции и проблемы выбора / В. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2012. - № 5 (130). – С. 17-24.
2. Ежов, В. Проблемы и перспективы развития отечественной пассивной электронной компонентной базы / В. Ежов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2019. – № 3. – С. 44-49.
3. Беленький, Б. Танталовые конденсаторы – проблемы и перспективы / Б. Беленький, Н. Горбунов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2008, 07. – С. 54-57.
4. Гольцова, М. Специализированные конденсаторы, резисторы и индуктивности, блестящее будущее миниатюрных прецизионных компонентов/ М. Гольцова // Электроника: Наука, технология, бизнес. –2015. – № 6 (146). – С. 52-66.
5. Самарин, А. Высоковольтные полимерные танталовые конденсаторы AVX серии TCJ для поверхностного монтажа / А. Самарин // Компоненты и технологии. – 2013. – № 7 (144). – С. 50-54.
6. Рентюк, В. Электролитические конденсаторы: традиционные или полимерные - вот в чем вопрос / В. Рентюк // Компоненты и технологии. – 2017. – № 9 (194). – С. 11-16.
7. Каспер, К., Рентюк, В. Полимерные гибридные конденсаторы: особенности выбора / К. Каспер, В. Рентюк // Компоненты и технологии. – 2019. – № 5 (214). – С. 8-10.
8. Пухане, Ф. Алюминиевые конденсаторы: электролитический или полимерный? Полноценная реализация их преимуществ / Ф. Пухане, В. Рентюк // Компоненты и технологии. – 2018. – № 8 (205). – С. 25-30.
9. Горбачев, В. Оксидные конденсаторы / В. Горбачев, В. Кочемасов, С. Хорев // Компоненты и технологии. – 2020. – № 6 (227). – С. 34-39.

10. Попов, А. Вопросы надежности и срока службы алюминиевых электролитических конденсаторов / А. Попов, С. Попов // Компоненты и технологии. – 2015. – № 2 (163). – С. 10-14.

11. Рентюк, В. Алюминиевые электролитические конденсаторы, или еще раз про надежность / В. Рентюк // Силовая электроника. – 2018. – Т. 3. – № 72. – С. 4-11.

12. Альбертсен, Д.А. Алюминиевые электролитические конденсаторы с проводящим полимером / Д.А. Альбертсен // Силовая электроника. – 2018. – Т. 2. – № 71. – С. 4-8.

13. Попов, С. Вопросы надежности и срока службы алюминиевых электролитических конденсаторов / С. Попов, А. Попов // Компоненты и технологии. – 2015. – № 3 (164). – С. 52-54.

14. Соколов, М. Полимерные Конденсаторы КЕМЕТ: надежные решения для гражданской электроники / М. Соколов, В. Ежов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2020. – № 7 (198). – С. 116-121.

15. Тарабанов, В.Н. Нанотехнологии, аккумуляторы и суперконденсаторы – ионисторы / В.Н. Тарабанов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2012. – № 9-10. – С. 96-101.

16. Кузнецов, В. Твердотельные ионисторы: новые серии, параметры и характеристики / В. Кузнецов // Компоненты и технологии. – 2015. – № 9 (170). – С. 22-24.

17. Кузнецов, В.П. Результаты исследований в области создания ионисторов для поверхностного монтажа и планарных ионисторов на основе суперионного проводника AGI-RBI / В.П. Кузнецов // В сборнике: Технологии и материалы для экстремальных условий (создание и разработка технологий изготовления электроактивных материалов для преобразователей и накопителей энергии). Материалы Всероссийской конференции. МЦАИ РАН. – 2015. – С. 20-29.

18. Логинова, А.В. Исследование возможностей ионисторов / А.В. Логинова, Д.А. Марцияш, А.Ю. Игнатова, Е.А. Макаревич // В сборнике: Проблемы теории и практики современной науки. Материалы Международной (заочной) научно-

практической конференции. Под общей редакцией А.И. Вострецова. – 2018. – С. 24-26.

19. Логинова, А.В. Новые типы ионисторов и их исследования / А.В. Логинова, Д.А. Марцияш // В сборнике: Актуальные вопросы современных исследований. Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. Научно-издательский центр «Мир науки». – 2018. – С. 22-24.

20. Амантурлиева, Ю.Ж. Ионисторы / Ю.Ж. Амантурлиева, В.Э. Белостропова // В сборнике: Наука сегодня: теория, практика, инновации. Материалы XL Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 129-130.

21. Русинов, В.Л. Моделирование процесса заряда ионистора с нулевым начальным условием / В.Л. Русинов, Н.А. Макаров // В сборнике: Актуальные вопросы энергетики в АПК. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор О. А. Пустовая, редактор Е. С. Дубкова. – 2019. – С. 26-29.

22. Кузнецов, В. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6 (50). – С. 12-16.

23. Добряк, А.С. Анализ рынка ионисторов в российской федерации / А.С. Добряк // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т. 1. – № 14. – С. 378-380.

24. Сергеев, А.Е. Концепция использования конденсаторов с двойным электрическим слоем: проблемы и перспективы / А.Е. Сергеев, Г.В. Тимофеев // Инновационные подходы в отраслях и сферах. – 2018. – Т. 3. – № 9. С. 18-21.

25. Сергеев, А.Е. Концепция использования конденсаторов с двойным электрическим слоем: проблемы и перспективы / А.Е. Сергеев, Э.Д. Муратова // Академия педагогических идей Новация. Серия: Студенческий научный вестник. – 2019. – № 3. – С. 192-194.

26. Мифтахов, К.Р. Суперконденсаторы / К.Р. Мифтахов, А.В. Орлов // Современные инновации. – 2017. – № 6 (20). – С. 42-43.

27. Силотин, Д.Е. Основные принципы расчета суперконденсаторных модулей / Д.Е. Силотин, М.Ю. Чайка, В.С. Горшков, А.В. Лешова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 7-2. – С. 106-108.

28. Пузынин, А.В. Исследование возможностей применения наноструктурированного углеродного материала «KEMERIT» в качестве электродов суперконденсатора / А.В. Пузынин, Б.П. Адуев, Г.М. Белокуров, А.П. Козлов, О.С. Ефимова, А.В. Самаров, Ч.Н. Барнаков, З.Р. Исмагилов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 5 (99). – С. 62-67.

29. Писарева, Т.А. Физические основы накопления энергии и электродные материалы электрохимических конденсаторов / Писарева Т.А. // Вестник Удмуртского университета. Серия Физика и химия. – 2014. – № 3. – С. 30-41.

30. Щегольков, А.В. Исследование режимно-конструктивных параметров суперконденсаторов на основе графеновых электродов / А.В. Щегольков, А.В. Мележик, Н.Р. Меметов, А.В. Щегольков, А.Г. Ткачев // В сборнике: Технологии и материалы для экстремальных условий (создание и разработка технологий изготовления электроактивных материалов для преобразователей и накопителей энергии). материалы Всероссийской конференции. МЦАИ РАН. – 2015. – С. 100-105.

31. Жаксыбаева, Д.К. Альтернативные материалы для создания эффективных суперконденсаторов / Д.К. Жаксыбаева, М.Н. Иманкул, К.Ж. Наурыз // Естественно-гуманитарные исследования. – 2016. – № 1 (11). – С. 6-14.

32. Писарева, Т.А. Электроемкость электрохимических конденсаторов с композиционными электродами на основе системы алюминий–активированный уголь / Т.А. Писарева, Харанжевский Е.В., Решетников С.М. // Электрохимия. – 2016. – Т. 52. – № 8. – С. 851-859.

33. Спиридонов, С.В. К вопросу о конструкции стабильных суперконденсаторов / С.В. Спиридонов, И.М. Лернер, Д.Р. Иванов // Вестник Казанского

государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2020. – Т. 76. – № 4. – С. 125-131.

34. Дмитриев, Д.С. Исследование лиофильности активированных углей для суперконденсаторов / Дмитриев Д.С., Ивахив М.В., Агафонов Д.В. // Журнал прикладной химии. – 2018. – Т. 91. – № 3. – С. 440-446.

35. Чайка, М.Ю. Основные типы сепарационных материалов в суперконденсаторах с неводным электролитом / М.Ю. Чайка, В.С. Горшков, Д.Е. Силютин, В.А. Небольсин, А.Н. Ермаков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 7-2. – С. 57-60.

36. Микрюкова, М.А. Органические эфиры фосфорной кислоты как растворители для электролитов суперконденсаторов и литий-ионных аккумуляторов / М.А. Микрюкова, Д.В. Агафонов, В.Н. Нараев // Электрохимическая энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 40-44.

37. Стаханова, С.В. Многокомпонентные неводные электролиты для работы суперконденсаторов при экстремально низких температурах / С.В. Стаханова, Р.Р. Галимзянов, О.В. Зайцева, А.Т. Калашник, И.С. Кречетов, М.В. Астахов // В книге: V Международная конференция-школа по химической технологии. сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – 2016. – С. 580-582.

38. Варфоломеев, С.Д. Высокопотенциальные электролиты для суперконденсаторов. Полиаспартат лития / С.Д. Варфоломеев, В.М. Гольдберг, С.Б. Бибииков, В.Н. Калиниченко, А.А. Мальцев, С.П. Червонобродов // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 475. – № 6. – С. 652-654.

39. Патент № 2676468 С1 Российская Федерация, МПК H01G 9/035, H01G 11/54. Электролит для углеродного суперконденсатора с двойным электрическим слоем : № 2017141662 : заявл. 29.11.2017 : опубл. 29.12.2018 / А. Л. Синявин, Е. Е. Волошин, А. Г. Бережная, В. А. Волочаев; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет".

40. Астахов, М.В. Многокомпонентные неводные электролиты для работы суперконденсаторов при повышенных температурах / М.В. Астахов, Л.А. Пунтусова, Р.Р. Галимзянов, И.С. Кречетов, А.В. Лисицын, Н.В. Свириденкова, С.В. Стаханова // Бутлеровские сообщения. –2020. – Т. 61. – № 1. – С. 67-75.

41. Стаханова, С.В. Многокомпонентные неводные электролиты для эксплуатации суперконденсаторов в расширенном интервале температур / С.В. Стаханова, И.С. Кречетов, Н.В. Свириденкова, К.Г. Статник, Р.Р. Галимзянов, М.В. Астахов // В сборнике: Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы II Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 112-113.

42. Шкаруба, М.В. Влияние температуры на емкость ионистора / М.В. Шкаруба, А.А. Соловьев, А.И. Тихонов, А.Д. Эрст // Вестник Сибирского Отделения Академии Военных Наук. – 2018. – № 46. – С. 111-116.

43. Salami, A.A. Supercapacitors modeling and simulation in matlab/simulink: studying the influence of model elements on the duration of self-discharge / A.A. Salami, A.S.A. Ajavon, K.M. Kodjo, K.Sa. Bedja // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. –№ 3 (35). – С. 42-58.

44. Степанов, В.А. Электродинамические эффекты в асимметричных суперконденсаторах после нейтронного облучения / В.А. Степанов, В.П. Лебедев, Ю.Г. Паршиков, Е.В. Харанжевский, В.А. Чернов // В сборнике: Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки). МАТЕРИАЛЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. под общей редакцией Б.Ф. Мясоедова. – 2018. –С. 100-105.

45. Степанов, В.А. Радиационно-индуцированное разделение и накопление электрического заряда в суперконденсаторах / В.А. Степанов, В.А. Чернов, Ю.Г. Паршиков, В.П. Лебедев, Е.В. Харанжевский // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2018. – № 1. –С. 146-153.

46. Analysis of Weibull Grading Test for Solid Tantalum Capacitors /Alexander Teverovsky (Dell Perot Systems) - CARTS Europe 2010, 10-11 November, Munich, Germany (<http://ecadigitallibrary.com>)

47. Electrical Properties of a Novel High CV Wet Tantalum Capacitor System / Douglas M. Edson, James S. Bates (AVX Tantalum Corporation) - CARTS USA, 2009 (<http://ecadigitallibrary.com>)

48. Zednicek T. Voltage Derating Rules for Solid Tantalum and Niobium Capacitors / Gill J. AVX technical paper, AVX Ltd, Tantalum division paigton, 2003. 8 p. <https://www.avx.com/docs/techinfo/TantalumNiobiumCapacitors/voltaged.pdf>

49. Failure modes of tantalum capacitors made by different technologies / P. Vasina, T. Zednicek, J. Sikula, J. Pavelka - Proceedings of the 15th Annual European Passive Components Conference (CARTS-EUROPE 2001), Copenhagen, 15–19 October 2001, pp. 77–81.

50. Improved capacitor using amorphous RuO₂ / David Evans (Evans Capacitor Company) – <http://www.evanscap.com>

51. Prospects for the ultimate energy density of oxide-based capacitor anodes / Joachim Hossick-Schott (Medtronic Energy and Components Center) - CARTS Europe, 2007 (<http://ecadigitallibrary.com>)

52. Reaching the Highest Reliability for Tantalum Capacitors. / James Bates, Marc Beaulieu, Michael Miller, Joseph Paulus (AVX Corporation) - CARTS International 2013, March 25-28, 2013 (<http://ecadigitallibrary.com>)

53. Reliability and Critical Applications of Tantalum Capacitors (/ Yuri Freeman, Randy Hahn, Philip Lessner, and John Prymak (KEMET Electronics Corporation) - CARTS USA, 2007 (<http://ecadigitallibrary.com>)

54. Surface Mount Tantalum // Сайт AVX. 2019. http://www.avx.com/docs/techinfo/Surface_Mount_Tantalum.pdf стр. 45-56

55. Virkki J. Testing the effects of temperature cycling on tantalum capacitors / S. Tuukkanen. Tampere, Finland: Tampere University of Technology, Department of Electronics, P.O. Box 692, FI-33101. 2010. P. 4

56. Chao Shi, Hongji Li, Cuiping Li, Mingji Li, Changqing Qu, Baohe Yang, "Preparation of TiO₂/boron-doped diamond/Ta multilayer films and use as electrode materials for supercapacitors", Applied Surface Science, vol. 357, pp. 1380, 2015.

57. Teverovsky A. Screening and Qualification Testing of Chip Tantalum Capacitors for Space Applications // Greenbelt: Dell Perot Systems Code 562, NASA GSFC, MD 20771. P. 19

58. Fritzler T., Azarian M. H., Pecht M. G. Scintillation Conditioning of Tantalum Capacitors With Manganese Dioxide Cathodes, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 01/2014; 14(2):630-638. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6782440>

59. Меркулов, В.И. Основы конденсаторостроения: учебное пособие / В. И. Меркулов. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 121 с.

60. Рене, В.Т. Электрические конденсаторы. – Л.: Энергия, 1969.

61. John Gill. Basic tantalum capacitor technology. – Paington, England: AVX Ltd, 2004. – 7 p.

62. Леонтьев, Л.И. Применение бездефектных нанокристаллических порошков тантала в конденсаторостроении. / Л.И. Леонтьев, С.П. Старостин, В.А. Костылев, В.Л. Лисин, С.А. Петрова, А.В. Степанов, В.П. Лебедев. // Всероссийская конференция физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем. Сборник трудов 22-26 ноября 2010 г. Ижевск.

63. Баранов, М.В. Исследование электрокинетических свойств наночастиц тантала в водных растворах / М.В. Баранов, А. Р. Бекетов, М. С. Боков, В. Л. Лисин, В.Ф. Марков, С.П. Старостин, Д.А. Филатова // Бутлеровские сообщения. – 2010. – Т. 21 – №8 – с. 13-18.

64. Леонтьев, Л.И. Получение наноразмерных и ультрадисперсных металлических и композиционных порошков различного назначения / Л.И. Леонтьев, В.Л. Лисин, В.А. Костылев, С.А. Петрова // В сборнике: Наноматериалы и технологии - VIII. VIII Международная конференция «Наноматериалы и технологии», VIII Международная конференция по материаловедению, III Международная молодежная конференция «Наноматериалы и технологии», V Китайско-Монгольско-Российская конференция по функциональным материалам. – 2019. – С. 312-317.

65. Дрогобужская, С.В. Исследование танталовых порошков для анодов электролитических конденсаторов / С.В. Дрогобужская, Т.Ю. Прохорова // Перспективные материалы. – 2011. – № 11. – С. 116-119.

66. Титов, А.А. Новые тенденции в совершенствовании технологии и улучшении свойств танталового порошка для конденсаторов / А.А. Титов // Цветные металлы. – 2003. – № 12. – С. 59-62.

67. Прохорова, Т.Ю. Влияние условий агломерации натриетермических танталовых порошков на их характеристики / Т.Ю. Прохорова, В.М. Орлов, М.Н. Мирошниченко, В. Н. Колосов // Металлы. – 2014. – № 4. – С. 86-89.

68. Трещёв, С.Ю. Сравнительный анализ состава и структуры отечественных и импортных конденсаторных танталовых порошков / С.Ю. Трещёв, О.М. Канунникова, С.П. Старостин, В.И. Ладьянов // Межотраслевой институт Наука и образование. – 2015. – № 3. – С. 34-37.

69. Прохорова, Т.Ю. Влияние условий агломерации наноразмерных танталовых порошков на их характеристики / Т.Ю. Прохорова, В.М. Орлов, В.Н. Колосов, М.Н. Мирошниченко // В сборнике: III Международная конференция по химии и химической технологии. 16-20 сентября 2013 г. Ереван. Сборник материалов. Редколлегия: Н.Б. Князян, Г.Г. Манукян, А.Р. Исаакян, А.Е. Костанян. – 2013. – С. 411-413.

70. Старостин, С.П. Перспективы использования танталовых нанокристаллических порошков и композиционного материала "тантал-рутений-оксид рутения" в танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторах чип-исполнения и танталовых объемно-пористых конденсаторах / С.П. Старостин., Л.И. Леонтьев, А.В. Степанов, В.П. Лебедев, В.А. Костылев // В сборнике: Технологии и материалы для экстремальных условий (создание и разработка технологий изготовления электроактивных материалов для преобразователей и накопителей энергии). материалы Всероссийской конференции. МЦАИ РАН. – 2015. – С. 106-111.

71. Кузнецова, В.А. Факторы, определяющие емкость танталового оксидного конденсатора на стадии изготовления анода / В.А. Кузнецова, П.Л. Кузнецов, А.А.

Масалев, В.В. Муравьев // Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов. Труды II Международной конференции. Сер. "Фундаментальные проблемы современного материаловедения". – 2013. – С. 233-240.

72. Кузнецова, В.А. Влияние конструктивных характеристик анода на эксплуатационные параметры оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов / В.А. Кузнецова, В.В. Муравьев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2014. – №4. – С. 105-107.

73. Небера, А.Л., Лизунов, А.В., Семенов, А.А., Маркушкин, Ю.Е. Исследование условия оксидирования высокочастотных танталовых анодов из порошков с нанокристаллической структурой / А.Л. Небера, А.В. Лизунов, А.А. Семенов, Ю.Е. Маркушкин // Композиты. – 2017. – Т. 9. № 3-4 – С. 123-128.

74. Беляева, Е. А. Влияние пористости и режимов оксидирования анода на качество танталовых конденсаторов с жидким электролитом / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 3. – С. 62-70. – DOI 10.14489/td.2016.03.pp.062-070.

75. Беляева, Е.А. Комплексный контроль качества приварки выводов танталовых объемно-пористых конденсаторов / Е.А. Беляева, В.В. Муравьев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова – 2018. – Т. 21. № 2. – С. 147-158. – DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-147-158.

76. Беляева, Е.А. Влияние дефектов на выход годных при производстве герметичных танталовых объемно-пористых конденсаторов с жидким электролитом / Е.А. Беляева, В.В. Муравьев // В сборнике: Приборостроение в XXI веке - 2014. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. ФГБОУ ВПО "Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова": В. И. Заболотских - научный редактор. – 2015. – С. 158-163.

77. Алыков, А.Н. Обеспечение качества пассивной электронной компонентной базы для высоконадёжной радиоэлектронной аппаратуры / А.Н. Алыков, А.Я. Кулибаба, И.Ю. Булаев // В сборнике: Молодёжь и будущее авиации и

космонавтики. 10-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ. – 2018. – С. 267-269.

78. Беляева, Е. А. Влияние переменной синусоидальной составляющей пульсирующего напряжения при оксидировании объемно-пористых анодов танталовых конденсаторов на электрические параметры / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 96-102.

79. R.W. Franklin Equivalent series resistance of tantalum capacitors, AVX Limited. https://www.avx.com/docs/techinfo/7_Equivalent.pdf

80. Морозов, А.В. Источники питания для испытаний танталовых конденсаторов [Электронный ресурс] / А.В. Морозов, В.А. Морозов, В.К. Барсуков // Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке электронное научное издание: сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – 2013. – С.1352-1355.

81. Sibgatullin, B.I. Effect of circuit resistance and inductance on surge current testing of tantalum capacitors with different capacitance / B.I. Sibgatullin // В сборнике: Instrumentation engineering, electronics and telecommunications - 2015. Сборник статей I Международного форума IEET-2015, проводимого в рамках XI международной научно-технической конференции. – 2016. – С. 163-170.

82. Кузнецова, В. А. Метод ускоренных испытаний сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 7. – С. 57-60. – DOI 10.14489/td.2016.07.pp.057-060.

83. Кузнецова, В. А. Ускоренные испытания сохраняемости танталовых конденсаторов с использованием теплового метода / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 82-88. – DOI 10.22213/2413-1172-2018-1-82-88.

84. Кузнецова, В.А. Разработка метода ускоренной оценки качества танталовых конденсаторов при применении новых материалов путем теплового воздействия

без электрической нагрузки / В.А. Кузнецова, В.В. Муравьев // Актуальные проблемы науки и техники : матер. I Межвуз. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в г. Сарапуле (Сарапул, май 2020 г.) [Электронный ресурс]. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020 – 532 с. – 21,8 МБ (PDF). – Систем. требования: Acrobat Reader 5.8 и выше. (С. 275-278).

85. Киршин, А.Б. Разработка устройства разбраковки чип-конденсаторов по току утечки / А.Б. Киршин, В.В. Тепляков // В сборнике: Актуальные проблемы науки и техники. Материалы I Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в городе Сарапуле. –2020. – С. 232-234.

86. Абдурахмонов, С.У. Испытание различных бумажно-масляных конденсаторов / С.У. Абдурахмонов // Современные научные исследования и инновации. – 2020. –№ 2 (106). –С. 8.

87. Петрухин, А.С. Результаты испытаний танталовых конденсаторов / А.С. Петрухин // В сборнике: Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. материалы Всероссийской научно-технической конференции. – 2020. – С. 139-141.

88. Алыков, А. Н. Анализ токов заряда и утечки при испытаниях танталовых конденсаторов / А. Н. Алыков // Гагаринские чтения - 2020 : Сборник тезисов докладов, Москва, 27 декабря 2019 года – 17 2020 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 597-598.

89. Горбачев, И. П. Метод выявления внутренних дефектов танталовых конденсаторов для снижения количества отказов аппаратуры / И. П. Горбачев, А. А. Сашов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 94-101. – DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.94.101.

90. Teverovsky A. Surge Current Testing and Derating for Solid Tantalum Capacitors // Parts, Packaging, and Assembly Technologies Office, Code 562, GSFC/ASRC Federal Space and Defense, ESA Sept. 2013. P. 17.
91. Teverovsky A. Effect of Surge Current Testing on Reliability of Solid Tantalum Capacitors // The 28th Symposium for Passive Components, CARTS'08, Newport Beach, CA, 2008. P. 20.
92. Teverovsky A. Screening and Qualification Testing of Chip Tantalum Capacitors for Space Applications // Greenbelt: Dell Perot Systems Code 562, NASA GSFC, MD 20771. P. 19.
93. Virkki J. Testing the effects of temperature cycling on tantalum capacitors / S. Tuukkanen. Tampere, Finland: Tampere University of Technology, Department of Electronics, P.O. Box 692, FI-33101. 2010. P. 4.
94. Fritzler Th. Scintillation conditioning of tantalum capacitors with manganese dioxide cathodes // Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 2013. P. 53.
95. Кузнецова, В.А. Разработка методики ускоренной оценки эксплуатационных характеристик танталовых конденсаторов с использованием теплового воздействия: дис. ...канд. тех. наук: 05.11.13 / Кузнецова Валентина Александровна. – Ижевск, 2020, 144.
96. Федулаев, Д.Е. Контроль качества производства электролитических конденсаторов / Д.Е. Федулаев, Е.Н. Балакирев // News of Science and Education. – 2018. – Т. 10. – № 2. – С. 072-074.
97. Беляева, Е.А. Контроль качества танталовых конденсаторов на основе анализа выявляемых дефектов в процессе производства и эксплуатации / Е.А. Беляева // В сборнике: Приборостроение в XXI веке - 2017. Интеграция науки, образования и производства. сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. – 2018. – С. 23-29.
98. Беляева, Е. А. Управление качеством танталовых конденсаторов на основе анализа дефектов, возникающих на этапах технологического процесса и

обнаруживаемых при эксплуатации / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 74-81. – DOI 10.22213/2413-1172-2018-1-74-81.

99. Беляева, Е.А. Анализ влияния различных факторов на технологических операциях в процессе изготовления на качество танталовых конденсаторов / Е.А. Беляева, В.В. Муравьев // Актуальные проблемы науки и техники : матер. I Межвуз. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в г. Сарапуле (Сарапул, май 2020 г.) [Электронный ресурс]. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020 – 532 с. – 21,8 МБ (PDF). – Систем. требования: Acrobat Reader 5.8 и выше. (С. 271-274).

100. Беляева, Е.А. Управление производством танталовых конденсаторов с жидким электролитом посредством контроля операционного выхода годных / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2015. – Т. 18. – № 2(66). – С. 72-75.

101. Беляева, Е.А. Статистический операционный контроль танталовых электролитических конденсаторов с использованием многофакторной модели / Е. А. Беляева // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24. – № 2. – С. 105-113. – DOI 10.22213/2413-1172-2021-2-105-113.

102. Кузнецова, В.А. Прогнозирование сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов по временной зависимости / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2016. – Т. 19. – № 4(72). – С. 69-72. – DOI 10.22213/2413-1172-2016-4-69-72.

103. Кузнецова, В.А. Влияние качества корпуса оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов на эксплуатационные параметры / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 112-115.

104. Беляева, Е.А. Исследование влияния срока сохраняемости на эксплуатационные характеристики и состояние объемно-пористых танталовых

конденсаторов / Е. А. Беляева, В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1(23). – С. 96-99.

105. Игнатенко, Е.С. Защита чип-конденсаторов от статического электричества на этапах производства / Е.С. Игнатенко, С.В. Горелов, Н.В. Лебедькова // В сборнике: Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России - 2020. Сборник статей I Всероссийской с международным участием научно-практической онлайн-конференции. – 2020. – С. 111-113.

106. Игнатенко, Е.С. Влияние / Е.С. Игнатенко // В сборнике: Россия молодая. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Редакционная коллегия: Костюк Светлана Георгиевна отв. редактор, Останин Олег Александрович, Хорешок Алексей Алексеевич, Дворовенко Игорь Викторович, Кудреватых Наталья Владимировна, Черкасова Татьяна Григорьевна, Стенин Дмитрий Владимирович, Покатилов Андрей Владимирович, Бобриков Валерий Николаевич, Бородин Дмитрий Андреевич. – 2019. – С. 20113.

107. Горелов, С.В. Предотвращение отказов танталовых чип-конденсаторов на этапе производства / С.В. Горелов, Е.С.Игнатенко, К.Н. Морев, В.И. Никулин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3-4. – С. 135-138.

108. Кузнецов, П.Л. Комплексный подход к обеспечению качества при производстве электролитических конденсаторов и ионисторов / П.Л. Кузнецов, В.А. Кузнецова // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электронное научное издание : сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 23-25 апреля 2013 года / Министерство образования и науки Удмуртской Республики, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова». – Электрон. дан. (1 файл : 39,3 Мб.). – Ижевск, 2013. – 1415 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

– Систем. требования: Acrobat reader 6.0 и выше – ISBN 978-5-7526-0603-8. (С. 950-955).

109. РД-50-98-86 Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (по применению ГОСТ 8.051-81)

110. Кузнецов, П.Л. Анализ электрических параметров танталовых объемно-пористых (оксидно-электролитических) конденсаторов на основе физико-химических процессов и схем их замещения / П.Л. Кузнецов, В.А. Кузнецова // В сборнике: Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 79-87.

111. Кузнецов, П.Л. Метрологическое обеспечение измерений характеристик суперконденсаторов / П.Л. Кузнецов, Ю.И. Дидик // Сборник докладов 9-й научно-технической конференции «Энергия белых ночей-2018». Метрология. Учет и контроль качества электрической энергии. Измерения в интеллектуальных сетях. Ответственный за выпуск: Н.Б. Корнеева. – 2018 – с.80-83

112. Кузнецов, П.Л. Проблемы контроля качества оксидно-полупроводниковых конденсаторов при использовании «Inrush-test» / П.Л. Кузнецов // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 50-летию приборостроительного факультета, 2012

113. Соломин, А.В. Разработка стенда для тестирования танталовых чип-конденсаторов импульсным током / А.В. Соломин, М.А. Чепкасова, М.Л. Новоселов, В.К. Барсуков // Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке электронное научное издание: сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – 2013. – С.1386-1389.

114. Сигбатуллин, Б.И. Влияние параметров стенда импульсного тестирования на результаты испытаний / Б.И. Сигбатуллин, В.К. Барсуков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2. – С.195-202.

115. Барсуков, В.К. Емкость батареи конденсаторов в стенде испытаний танталовых конденсаторов импульсным током / Б.И. Сигбатуллин, В.К. Барсуков // В сборнике: VIII Камские чтения. сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 3-х ч., под ред. Л.А. Симоновой ; Министерство образования и науки РФ, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета. – 2016. – С. 352-355.

116. Барсуков, В.К. Особенности испытания танталовых конденсаторов большими значениями токов // В.К. Барсуков, М.А. Пустовалов // В сборнике: Интеграция науки, образования и производства-2010. Приборостроение в XXI веке. сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции. Министерство образования и науки РФ, ГОУ ВПО Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. – 2011. – С. 194-199.

117. Барсуков, В.К. Методика отбора эталонных образцов для настройки порогов разбраковки прибора импульсного тестирования танталовых конденсаторов ИТК-10 / В.К. Барсуков, А.В. Соломин, М.Л. Новоселов // В сборнике: Приборостроение в XXI веке - 2012. Интеграция науки, образования и производства. Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 60-летию ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2012. – С. 185-189.

118. Барсуков, В.К. Исследование влияния индуктивности цепи заряда на характер переходного процесса при импульсивном тестировании танталовых конденсаторов / В.К. Барсуков, М.А. Пустовалов, А.В. Соломин // В сборнике: Измерения, контроль и диагностика - 2012. Сборник материалов II Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, с международным участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного

технического университета имени М. Т. Калашникова. Редколлегия: Г. В. Ломаев (главный редактор), С. А. Мурашов, Л. В. Волкова. – 2012. – С. 276-280.

119. Барсуков, В.К. Стенд ИТК-10 для тестирования танталовых конденсаторов импульсивным током. / В.К. Барсуков, М.А. Пустовалов, А.В. Соломин, Д.В. Дровосек // В сборнике: Измерения, контроль и диагностика - 2012. Сборник материалов II Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, с международным участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. Редколлегия: Г. В. Ломаев (главный редактор), С. А. Мурашов, Л. В. Волкова. –2012. – С. 281-284.

120. Сибгатуллин, Б.И. Заряд и разряд танталовых конденсаторов при испытаниях импульсным током / Б.И. Сибгатуллин // В сборнике: Молодежь и научно-технический прогресс. IX международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 томах. – 2016. – С. 130-132.

121. Барсуков, В.К. Контроль качества танталовых чип-конденсаторов с помощью испытаний импульсным током / В.К. Барсуков, Б.И. Сибгатуллин // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 3. – С. 58-63.

122. Сибгатуллин, Б.И. Расчет и моделирование переходных процессов при испытаниях танталовых конденсаторов импульсным током / Б.И. Сибгатуллин, В.К. Барсуков // Интеллектуальные системы в производстве. –2015. – № 1 (25). – С. 115-120.

123. Сибгатуллин, Б.И. Коммутирующий элемент в стенде испытаний танталовых конденсаторов импульсным током / Б.И. Сибгатуллин // В сборнике: Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов: сборник трудов. Ответственный за выпуск: В.В. Вахнина. – 2016. – С. 380-383.

124. Сибгатуллин, Б.И. Влияние эквивалентного последовательного сопротивления танталовых конденсаторов на результаты испытаний импульсным

током / Б.И. Сибгатуллин, В.К. Барсуков // В сборнике: Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. Ответственные за выпуск: А. П. Тюрин, В. В. Сяктерева. – 2016. – С. 290-294.

125. Барсуков, В.К. Влияние емкости танталовых конденсаторов на условия испытаний импульсным током / В.К. Барсуков, Б.И. Сибгатуллин // В сборнике: Тинчуринские чтения. Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции. – 2016. – С. 132-133.

126. Барсуков, В.К. Пробой оксидных пленок танталовых конденсаторов при воздействии зарядных токов большой амплитуды / В.К. Барсуков, Б.И. Сибгатуллин // В сборнике: Наука. Технология. Производство - 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматизации. материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате. Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Салавате. – 2016. – С. 23-26.

127. Кузнецов, П.Л. Анализ характерных зависимостей импеданса и эквивалентного последовательного сопротивления электролитических конденсаторов от частоты / П.Л. Кузнецов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Сборник научных трудов XII-ой Международной научно-практической конференции: в 4-х томах. – 2015. – С.316-319.

128. Кузнецов, П.Л. Исследование изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени / П.Л. Кузнецов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Сборник научных трудов XI-ой Международной научно-практической конференции: в 4-х томах. – 2014. – С. 283-286.

129. Кузнецова, В.А. Исследование влияния на эксплуатационные характеристики качества материалов танталовых оксидно-полупроводниковых

чип-конденсаторов. / В.А. Кузнецова, П.Л. Кузнецов, Е.А. Беляева, В.В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. - №2. С. 140-143.

130. Кузнецова, В. А. Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных / В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2013. – № 3(59). – С. 088-091.

131. Кузнецов, П.Л. Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени / П. Л. Кузнецов, В. А. Кузнецова, Г. В. Ломаев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2014. – № 1(61). – С. 11-15.

132. Кузнецов, П.Л. Разработка устройства разбраковки электролитических конденсаторов по эквивалентному последовательному сопротивлению / П.Л. Кузнецов // В сборнике: Актуальные проблемы науки и техники. Материалы I Международной научно-технической конференции. Ижевск, 2021. С. 485-490.

133. Кузнецов, П.Л. Исследование танталовых объемно-пористых конденсаторов с использованием ускоренной методики оценки качества СТРЕСС-ТЕСТ / П. Л. Кузнецов, В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19. – № 4. – С. 49-54. – DOI 10.22213/2410-9304-2021-4-49-54.

134. Кузнецов, П.Л. Разработка метода «СТРЕСС-ТЕСТ» для разбраковки электролитических конденсаторов / П.Л. Кузнецов // Актуальные проблемы науки и техники : матер. I Межвуз. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в г. Сарапуле (Сарапул, май 2020 г.) [Электронный ресурс]. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020 – 532 с. – 21,8 МБ (PDF). – Систем. требования: Acrobat Reader 5.8 и выше. (С. 279-282).

135. Кузнецов, П. Л. Контроль качества электролитических танталовых конденсаторов с использованием стресс-теста / П. Л. Кузнецов, В. В. Муравьев // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1(10). – С. 76-80.

136. Кузнецов, П.Л. Применение СТРЕСС-ТЕСТА при контроле качества оксидно-электролитических конденсаторов / Кузнецов П.Л. // Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием: электронное научное издание. – 2015. – С.308-310.

137. Кузнецов, П. Л. Применение метода "Стресс-тест" при контроле качества электролитических конденсаторов и конденсаторов с двойным электрическим слоем / П. Л. Кузнецов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 43-49. – DOI 10.22213/2410-9304-2021-2-43-49.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель главного инженера по
подготовке производства
АО «Элеконд»
Председатель комиссии



А.В. Алабужев
«24» 09 2021 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования на тему:
«Разработка методики и средств контроля электрических параметров оксидно-
электролитических конденсаторов с использованием повышенной нагрузки
(СТРЕСС-ТЕСТ)»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Заместитель главного инженера по подготовке производства АО «Элеконд» А.В. Алабужев

Члены комиссии от предприятия: Начальник отдела технического контроля АО «Элеконд» Е.А. Беляева, начальник испытательной лаборатории АО «Элеконд» А. М. Соломенников, начальник бюро информационно-технического сопровождения производства отдела танталовых и ниобиевых конденсаторов О.Н. Лошкарев

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования внедрены в производство оксидно-электролитических конденсаторов типа К50-..., К52-... в виде:

- Методика СТРЕСС-ТЕСТ для контроля качества оксидно-электролитических конденсаторов К50-..., К52-...;
- установка для проведения методики СТРЕСС-ТЕСТ;
- средство контроля электролитических конденсаторов типа К50-..., К52-... по параметру эквивалентное последовательное сопротивление.

Члены комиссии:

Е.А. Беляева

А.М. Соломенников

О.Н. Лошкарев

УТВЕРЖДАЮ

Директор СПИ(филиал)

ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени

М.Т. Калашникова»

д.т.н., профессор

Г.В. Миловзоров

2021 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Кузнецова Павла Леонидовича

Комиссия в составе: председатель - и.о. заместителя директора по учебной работе Т.В. Кривоногова, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Е.Д. Макшаков, заведующий лабораторией С.П. Малахов составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Кузнецова П.Л. «Разработка методики и средств контроля электрических параметров оксидно-электролитических конденсаторов с использованием повышенной нагрузки (СТРЕСС-ТЕСТ)» используются в учебном процессе подготовки бакалавров по направлениям 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» в виде лекционных занятий по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация», в курсовом проектировании, а так же при подготовке к выпускным квалификационным работам.

Председатель комиссии

Т.В. Кривоногова

Е.Д. Макшаков

С.П. Малахов

УТВЕРЖДАЮ
И.о. ректора ФГБОУ ВО
«Ижевский государственный
технический университет
имени М.Т.Калашникова»
к.т.н. А.В. Губерт



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Кузнецова Павла Леонидовича

Комиссия в составе: председатель — председатель УМС 12.00.00 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии» д.т.н., профессор О.В. Муравьева, члены комиссии - доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» к.т.н. доцент В.А. Стрижак, доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» к.т.н. С.А. Мурашов составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Кузнецова П.Л. «Методика и средства контроля электрических параметров оксидно-электролитических конденсаторов с повышенной электрической нагрузкой» использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 12.03.01 «Приборостроение» в виде лабораторной работы по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация», а так же в научно-исследовательских работах студентов.

Председатель комиссии


О.В. Муравьева

Члены комиссии


В.А. Стрижак


С.А. Мурашов