На правах рукописи

Лебедев Сергей Олегович



ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ УСТРОЙСТВ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)».

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор

Русинов Леон Абрамович

Официальные оппоненты:

Манойлов Владимир Владимирович
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, сектор автоматизации измерений и цифровой обработки сигналов, главный научный сотрудник;

Беркутов Игорь Владимирович
кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **15 января 2027 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **ауд. № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.
Автореферат разослан 13 ноября 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета  УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Прогнозирование остаточного ресурса изделий является одной из важнейших задач технической диагностики, от решения которой зависят их эксплуатационная безопасность и экономическая эффективность. Для новых типов изделий, выполненных на основе функциональных материалов с изменяющимися свойствами, эта задача становится наиболее актуальной, поскольку традиционные методы контроля к ним зачастую неприменимы.

К таким изделиям относятся электрохромные устройства (ЭХУ), представляющие собой многослойные электрохимические системы, способные обратимо изменять свои спектрально-оптические свойства под действием электрического тока. Благодаря своей способности регулировать световые и тепловые потоки, они рассматриваются как современный элемент энергоэффективных зданий и сооружений. Однако эксплуатация таких устройств сопровождается регулярной сменой полярности электропитания, что, в свою очередь, приводит к деградации функциональных слоев и ограничивает их срок службы.

В связи с этим возникает потребность в методах контроля и диагностики, позволяющих оценивать техническое состояние ЭХУ без разрушения и за время, значительно меньшее, чем стандартные циклические испытания. Также актуальной задачей является повышение достоверности контроля за счет снижения искажающего влияния переходных процессов и краевого эффекта, возникающих при испытаниях таких изделий. Необходимость решения вышеуказанных задач определяет актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

Методология контроля ЭХУ, основанная на циклических испытаниях на разрушение, описана в российском и международном стандартах (ГОСТ Р 56759-2015, ASTM E2141-12). В них регламентируются оптические и температурные диапазоны функционирования изделий и их эксплуатационный ресурс, а также приводятся основные параметры для оценки качества. В роли основного параметра используется электрохромная эффективность, которая характеризуется отношением изменения оптической плотности к величине удель-

ного электрического заряда. Однако в диссертационной работе Кириенко Д.А. было обнаружено, что электрохромная эффективность не всегда коррелирует, а иногда и полностью противоречит результатам оценки эксплуатационного ресурса по методу циклических испытаний. Это связано с тем, что в вышеперечисленных стандартах не учитывается влияние технологических особенностей изготовления изделия и режимов электрического воздействия на регламентируемые параметры. Также значительными недостатками существующей методологии являются большая продолжительность диагностики и ограничения по площади диагностируемых образцов.

Эксплуатационный ресурс ЭХУ в значительной степени зависит как от технологических режимов их изготовления, так и от методов контроля их параметров. На сегодняшний день наиболее простым и распространенным методом является контроль при работе ЭХУ в гальваностатическом режиме, описанный в работах Ванникова А.В. и Маттьюза Дж. Этот метод предполагает подачу на ЭХУ тока стабилизированной плотности в пределах до 500 мкА/см^2 в безопасных диапазонах окислительно-восстановительного потенциала. Хотя такой подход позволяет снизить негативное влияние изменения полярности электропитания, он не решает проблему равномерного распределения плотности тока по активной площади крупногабаритных устройств. Частично эта проблема была решена в работах Брауна С.К. с помощью импульсных воздействий, однако его применение возможно только на ЭХУ с малой электрической емкостью.

Объект исследования – методы и средства контроля и диагностики электрохромных устройств, основанные на анализе их электрооптических характеристик.

Предмет исследования – математическая модель электрооптических процессов, метод оценки технического состояния, а также алгоритмические и приборные решения для средств контроля и диагностики электрохромных устройств.

Цель работы – повышение достоверности и оперативности контроля и диагностики электрохромных устройств на основе разработки электрооптических методов и средств, обеспечивающих идентификацию структуры электрохромного материала, оценку технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса изделий.

Идея работы – использование взаимосвязи электрических, оптических и температурных характеристик электрохромных устройств, регистрируемых в условиях компенсации переходных и краевых процессов, позволяет по результатам сокращённых испытаний идентифицировать структуру электрохромного материала, оценить техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс изделий, повышая достоверность и оперативность контроля и диагностики.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов и средств контроля и диагностики электрохромных устройств, определить их ограничения и сформулировать требования к перспективным методам оценки технического состояния.

2. Исследовать электрооптические процессы в электрохромных устройствах и разработать математическую модель, устанавливающую взаимосвязь между электрическими, оптическими и температурными характеристиками изделий.

3. Разработать программные, алгоритмические и приборные средства автоматизированного контроля и диагностики и провести их экспериментальную апробацию на сериях электрохромных устройств.

4. Разработать метод оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрохромных устройств, обеспечивающий повышение оперативности контроля без ограничений по площади объекта.

5. Внедрить в опытную эксплуатацию разработанные электрооптические методы и средства контроля и диагностики состояния электрохромных устройств.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель обработки результатов регистрации вольтамперных и спектрально-оптических характеристик электрохромных устройств, отличающаяся введением коэффициентов, характеризующих связанную с ресурсом интенсивность интеркаляции ионов электролита в поверхностный слой электрохромного материала и в его объем и обеспечивающих автоматизацию диагностики за счет идентификации фазового состава электрохромного

материала и качественной оценки его однородности без проведения рентгенофазового анализа.

2. Разработаны программные, алгоритмические и приборные средства автоматизированного контроля и диагностики электрохромных устройств, включающие специализированные узлы формирования и регистрации процессов заряда-разряда приэлектродных областей и позволяющие повысить достоверность оценки технического состояния, а также увеличить эксплуатационный ресурс изделий за счёт снижения деградационного воздействия средства контроля на объект измерений.

3. Разработан метод оценки технического состояния электрохромных устройств, отличающийся введением коэффициента электрооптической стабильности, характеризующего степень изменения электрохромного материала относительно исходного состояния, что позволяет оперативно прогнозировать работоспособность и остаточный ресурс изделий различной площади.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды по пунктам:

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.

2. Разработка методологий прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса изделий, направляющих оптимизацию методов, приборов, систем контроля и диагностирования изделий, повышение надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

3. Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

4. Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и

природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды.

6. Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке математической модели электрооптических процессов в электрохромных устройствах, основанной на совокупности оптического закона Бугера–Ламберта–Бера, электрохимических законов Фарадея и эмпирического уравнения Вант-Гоффа. Модель позволяет описывать интенсивность интеркаляции ионов электролита в поверхностный слой и в объем электрохромного материала, а также устанавливать взаимосвязь между удельными электрическими, оптическими и температурными характеристиками изделий.

Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем:

1. Разработанная математическая модель позволяет автоматизировать диагностику электрохромных устройств, идентифицировать фазовый состав электрохромного материала по коэффициенту инициальных потерь (для WO_3: аморфная фаза соответствует $P_{\lambda 0} < 14$ мКл/см^2, кристаллическая - $P_{\lambda 0} > 20$ мКл/см^2) и качественно оценить однородность покрытия по коэффициенту объемных потерь без проведения рентгенофазового анализа (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617962 и № 2020663357).

2. Разработанные программные, алгоритмические и приборные средства автоматизированного контроля и диагностики электрохромных устройств позволяют повысить достоверность оценки технического состояния за счет снижения их деградационного воздействия, а также увеличить эксплуатационный ресурс изделий в сред-

нем в 2 раза (патенты на изобретение № 2758579 и № 2864674; свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663124, № 2021664079, № 2021663924 и № 2025662023).

3. Разработанный метод оценки технического состояния позволяет спрогнозировать остаточный ресурс изделий и сократить время контроля с нескольких суток до 1 часа (патент на изобретение № 2839673; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617958). Достоверность прогноза подтверждена коэффициентом корреляции Пирсона 0,978.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в опытную эксплуатацию АО «Октогласс» (акт о внедрении от 09.09.2026 г.) и в ООО «Фотофизикс» (акт о внедрении от 22.09.2026 г.).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель обработки результатов регистрации вольтамперных и спектрально-оптических характеристик электрохромных устройств, базирующаяся на объединении законов Фарадея, Бугер-Ламберта-Бера и уравнения Вант-Гоффа, позволяющая автоматизировать диагностику изделий путем определения фазового состава и качественной оценки однородности электрохромного материала без проведения рентгенофазового анализа.

2. Программные, алгоритмические и приборные средства автоматизированного контроля и диагностики электрохромных устройств, включающие специализированные узлы формирования и регистрации процессов заряда-разряда приэлектродных областей, обеспечивающие снижение деградационного воздействия и увеличение эксплуатационного ресурса изделий в среднем в 2 раза с повышением достоверности оценки технического состояния.

3. Метод оценки технического состояния электрохромных устройств, основанный на определении коэффициента электрооптической стабильности, характеризующего степень изменения электрохромного материала относительно исходного состояния и позволяющего прогнозировать остаточный ресурс изделий с сокращением времени контроля с нескольких суток до 1 часа.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями, математическим моделированием и подкреплена апробацией основных

теоретических положений в статьях, докладах на научных конференциях, патентах на изобретение и свидетельствами о регистрации программы для ЭВМ. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат литературным данным, ранее представленным другими авторами.

Апробация результатов диссертации проведена на 9 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных; за последние 3 года принято участие в 2 научно-практических мероприятиях, в том числе на 1 международном: Всероссийская научная конференция с международным участием «Традиции и Инновации», посвященная 191-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (27-29 ноября 2019 года, г. Санкт-Петербург); X научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках мероприятий XV Всероссийского фестиваля науки «NAUKA 0+» «Неделя науки – 2020» (с международным участием) (1-3 апреля 2020 года, г. Санкт-Петербург); Международный семинар «Нанофизика и наноматериалы» (25-26 ноября 2020 года, г. Санкт-Петербург); Всероссийская научная конференция с международным участием «Традиции и Инновации», посвященная 192-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (1-3 декабря 2020 года, г. Санкт-Петербург); XI научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках мероприятий по проведению в Российской Федерации Года науки и технологий в 2021 году «Неделя науки-2021» (с международным участием) (7-9 апреля 2021 года, г. Санкт-Петербург); Всероссийская научная конференция с международным участием «Традиции и Инновации», посвященная 193-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (1-3 декабря 2021 года, г. Санкт-Петербург); XIII научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки-2023» (11-13 апреля 2023 года, г. Санкт-Петербург); XIV научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых имени профессора, Лауреата Государственной премии СССР А.С. Дудырева «Неделя науки -2024. Творчество молодежи – будущему России» (с международным участием)

(22-24 апреля 2024 года, г. Санкт-Петербург); XX Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки» (10 марта 2025 года, г. Пенза).

Реализация результатов работы. Работа проводилась при поддержке грантов:

1. Грант УМНИК от Фонда Содействия инновациям (договор № 75ГУЭС8-D3/56411 с 21.12.2019 г. по 17.09.2021 г.);
2. Грант Президента Российской Федерации (договор № 459-м с 30.12.2020 г. по 31.08.2022 г.);
3. Грант Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга (распоряжение комитета № 200 от 05.10.2021 г.).

Личный вклад автора. Автором получены исходные данные для анализа объекта, разработаны: математическая модель электрооптических процессов в электрохромных устройствах; программные, алгоритмические и приборные средства автоматизированного контроля и диагностики; метод оценки технического состояния.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 18 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье - в издании, входящем в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 3 патента на изобретение и 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 151 наименование, и 12 приложений. Диссертация изложена на 167 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описана структура ЭХУ, материалы и существующие методы и средства контроля и диагностики. Установлено,

что единственным методом контроля остаются разрушающие циклические испытания, параметры которых не всегда коррелируют с реальным ресурсом. Существующие методы не позволяют минимизировать влияние переходных процессов и краевых эффектов.

Во второй главе представлена математическая модель электрооптических процессов на основе законов Фарадея, Бугера-Ламберта-Бера и Вант-Гоффа. Гипотеза подтверждена экспериментальными данными, рентгенофазовым и дифференциально-термическим анализами. Предложены методы диагностики структуры и однородности материала по коэффициентам интеркаляции.

Третья глава посвящена программным, алгоритмическим и аппаратным средствам контроля. Разработанные схемотехнические решения минимизируют переходные процессы при смене полярности и компенсируют краевой эффект крупногабаритных изделий, что повышает достоверность оценки и увеличивает эксплуатационный ресурс ЭХУ.

В четвертой главе предложен метод оценки технического состояния на базе сокращенных циклических испытаний. Введен коэффициент электрооптической стабильности, позволяющий ускорить технический контроль.

В заключении отражены обобщённые выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решёнными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Математическая модель обработки результатов регистрации вольтамперных и спектрально-оптических характеристик электрохромных устройств, базирующаяся на объединении законов Фарадея, Бугер-Ламберта-Бера и уравнения Вант-Гоффа, позволяющая автоматизировать диагностику изделий путем определения фазового состава и качественной оценки однородности электрохромного материала без проведения рентгенофазового анализа.

Для обработки результатов регистрации вольтамперных и спектрально-оптических сигналов ЭХУ разработана математическая модель, устанавливающая зависимость оптической плотности от удельного электрического заряда. В основу модели положены оптический закон Бугера–Ламберта–Бера и закон электролиза Фарадея;

поправочные температурные коэффициенты рассчитаны по эмпирическому уравнению Вант-Гоффа (1-3):

$$D_\lambda(t) = \frac{Q_{уд.}(t)}{P_{\lambda 0} \cdot \alpha_{\lambda 1} + k_\lambda \cdot \alpha_{\lambda 2} \cdot Q_{уд.}(t)} \quad (1)$$

где $D_\lambda(t)$ - величина изменения оптической плотности на длине волны λ (нм), за период времени t (с); $P_{\lambda 0}$ (мКл/см^2) и k_λ – коэффициенты математической модели, рассчитываемые по выражениям (2) и (3) соответственно; $\alpha_{\lambda 1}$ и $\alpha_{\lambda 2}$ – поправочные температурные коэффициенты, рассчитываемые по уравнению Вант-Гоффа; $Q_{уд.}(t)$ (мКл/см^2) - величина изменения удельного электрического заряда за период времени t (с).

$$P_{\lambda 0} = \left(\frac{1}{D_{\lambda 1}} - k_\lambda\right) \cdot Q_{уд.1} \quad (2)$$

$$k_\lambda = \frac{D_{\lambda 1} \cdot Q_{уд.2} - D_{\lambda 2} \cdot Q_{уд.1}}{D_{\lambda 1} \cdot D_{\lambda 2} \cdot (Q_{уд.2} - Q_{уд.1})} \quad (3)$$

где $D_{\lambda 1}$ и $D_{\lambda 2}$ - величины оптической плотности на длине волны λ (нм) в начальный и конечный периоды времени t (с) соответственно; $Q_{уд1}$ и $Q_{уд2}$ (мКл/см^2) - величины удельного электрического заряда в начальный и конечный периоды времени t (с) соответственно.

Экспериментальная проверка модели проводилась на четырех сериях ЭХУ, изготовленных на основе органических и неорганических электрохромных материалов. Температурные испытания проводились в диапазоне от -20 до +60 °С с шагом 20 °С.

В ходе электрооптических испытаний были получены зависимости оптической плотности от удельного электрического заряда для стадий окрашивания и обесцвечивания четырех серий образцов ЭХУ на длинах волн 680 нм и 840 нм при разной температуре. Полученные зависимости были аппроксимированы с помощью выражения (1). Для исследуемых образцов коэффициент детерминации (R^2) находился в диапазоне от 0,92 до 0,99, а относительная ошибка аппроксимации (А, %) не превышала 7,84 %. Средняя погрешность температурных коэффициентов (ε) составила 3,85 %. Полученные значения подтверждают высокую адекватность и универсальность модели для различных типов электрохромных материалов в широком диапазоне температур.

На основании теоретических расчетов установлено, что коэффициент $P_{\lambda 0}$ пропорционален количеству электронов, участвующих в реакции, и обратно пропорционален оптическому коэффициенту экстинкции. Это позволяет интерпретировать его как коэффициент инициальных потерь, характеризующий электрические потери на границе раздела фаз. Экспериментально выявлено, что $P_{\lambda 0}$ возрастает с температурой отжига электрохромного материала (для WO_3-покрытия) и обратно пропорционален его толщине (рисунки 1 и 2). При этом коэффициент корреляции Пирсона составляет -0,997. Это объясняется усадкой WO_3-покрытия при переходе из аморфного в кристаллическую фазу при температуре отжига выше 410 °С. Установлено, что для аморфной фазы WO_3 коэффициент $P_{\lambda 0}$ менее 14 мКл/см^2, а для кристаллической более 20 мКл/ см^2. При этом наличие кристаллической фазы снижает ресурс изделий на 20–25 %.

Коэффициент k_λ отражает изменение эффективности интеркаляции ионов по мере заполнения материала: при $k_\lambda \approx 0$ структура однородна, при $k_\lambda < 0$ происходит ускорение интеркаляции в объеме, при $k_\lambda > 0$ – её замедление. Совокупный анализ $P_{\lambda 0}$ и k_λ позволяет идентифицировать фазовый состав и оценивать однородность покрытия непосредственно по электрооптическим измерениям, не прибегая к рентгенофазовому анализу.

2. Программные, алгоритмические и приборные средства автоматизированного контроля и диагностики электрохромных устройств, включающие специализированные узлы формирования и регистрации процессов заряда-разряда приэлектродных областей, обеспечивающие снижение деградационного воздействия и увеличение эксплуатационного ресурса изделий в среднем в 2 раза с повышением достоверности оценки технического состояния.

Для контроля и диагностики ЭХУ разработан программно-технический измерительный комплекс спектрально-оптических, температурных и вольтамперных характеристик (рисунок 3). Отличительной особенностью комплекса является наличие зарядно-разрядного блока и блока стабилизированной токовой нагрузки.

Управление комплексом осуществляется с помощью прикладного программного обеспечения (ПО), разработанного на языке VB.Net. ПО обеспечивает взаимодействие оператора с комплексом,

регистрацию экспериментальных данных, их визуализацию, аппроксимацию и автоматический контроль ЭХУ по заданным параметрам в соответствии с разработанными алгоритмами.

На сегодняшний день стандартный режим контроля ЭХУ заключается в проведении циклических испытаний при регулярной смене полярности электропитания, что вызывает резкий перезаряд приэлектродных областей. Данный процесс сопровождается скачкообразным увеличением плотности тока, не связанным с полезным изменением оптических характеристик, и приводит к ранней деградации электрохромного материала. Это, в свою очередь, сказывается на достоверности получаемых экспериментальных данных.

Для решения данной проблемы разработано алгоритмическое и схемотехническое решение, позволяющее минимизировать влияние переходных процессов при проведении контрольных испытаний. Алгоритмическая составляющая характеризуется следующими стадиями: окрашивание – разряд приэлектродных областей – обесцвечивание – разряд приэлектродных областей. Схемотехническая составляющая реализуется благодаря блоку стабилизированной токовой нагрузки, минимизирующему накопленный в приэлектродных областях ЭХУ электрический заряд.

Экспериментальное подтверждение осуществлялось с помощью циклических испытаний в соответствии с ГОСТ Р 56759-2015. Образцами служили ЭХУ, изготовленные на основе WO_3-покрытий с активной площадью 0,05 м^2. Температура отжига ЭХ-материала составляла 350 °С при скорости подъема температуры 2,5 °С/мин. В качестве контрольных использовались стандартные режимы испытаний: гальваностатический и потенциостатический. Регистрация оптических характеристик проводилась в максимуме поглощения на длине волны λ=840 нм (рисунок 4).

На основании полученных результатов установлено, что предложенное решение обеспечивает увеличение количества циклов испытаний в среднем в 1,3 раза по сравнению с гальваностатическим режимом и в 2,3 раза по сравнению с потенциостатическим режимом.

Однако предлагаемое решение не позволяет решить проблему краевого эффекта – неравномерного распределения электрического

заряда по активной площади ЭХУ. Это, в свою очередь, вносит систематическую погрешность в результаты контроля электрооптических характеристик.

Для компенсации данного эффекта разработано алгоритмическое и схемотехническое решение, обеспечивающее зарядно-разрядный режим (ЗРР) работы средства контроля с регулируемой частотой. Схемотехническая составляющая реализует попеременное, с заданной частотой, подключение ЭХУ к источнику стабилизированного тока (заряд) и стабилизированной токовой нагрузке (разряд) через зарядно-разрядный блок. Алгоритмическая составляющая обеспечивает подбор рабочей частоты по критерию минимизации разности оптических контрастов между центром и краем изделия.

Разработанное решение экспериментально проверено на промышленных крупногабаритных образцах ЭХУ на основе органических электроинициируемых материалов с активной площадью 0,25 м^2. Регистрация спектрально-оптических характеристик производилась в максимуме оптического поглощения (λ = 680 нм) в двух точках: у токоподводящей шины и в центре ЭХУ.

Установлено, что по сравнению с гальваностатическим режимом (ГСТ) разработанное решение позволяет снизить разность оптических контрастов примерно в 47 раз, а по сравнению с импульсным методом (ИМ) – в 13,7 раза, при этом рабочий оптический диапазон ЭХУ практически не изменился (рисунок 5).

3. Метод оценки технического состояния электрохромных устройств, основанный на определении коэффициента электрооптической стабильности, характеризующего степень изменения электрохромного материала относительно исходного состояния и позволяющего прогнозировать остаточный ресурс изделий с сокращением времени контроля с нескольких суток до 1 часа.

Суть разработанного метода оценки технического состояния заключается в проведении сокращенных циклических испытаний до момента стабилизации электрооптических характеристик ЭХУ. Испытания проводятся в рабочих диапазонах напряжений и плотностей тока с параллельной регистрацией оптической плотности в максимуме оптического поглощения и удельного электрического заряда. Для минимизации влияния переходных процессов с помощью разра-

ботанного программно-технического комплекса используется следующий алгоритм циклических испытаний: окрашивание – разряд приэлектродных областей – обесцвечивание – разряд приэлектродных областей. Для стадии окрашивания первого и последнего циклов определяется коэффициент инициальных потерь $P_{\lambda 0}$, после чего рассчитывается коэффициент электрооптической стабильности (4):

$$K_{эс} = 100 - \frac{| P_{\lambda 0(1)} - P_{\lambda 0(2)} |}{P_{\lambda 0(1)}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $P_{\lambda 0(1)}$, $P_{\lambda 0(2)}$ – коэффициенты инициальных потерь, определенные на стадии окрашивания первого и последнего циклов соответственно, Кл/см^2.

Предложенный коэффициент электрооптической стабильности характеризует свойство архитектурного электрохромного изделия сохранять в процессе циклических испытаний исходные электрооптические характеристики.

Экспериментальное подтверждение проводилось в гальваностатическом режиме при 100 мкА/см^2 в безопасных диапазонах окислительно-восстановительного потенциала с помощью серии образцов ЭХУ, изготовленных на основе субмикронных покрытий WO_3 с варьированием температуры отжига от 200 до 450 °С и скорости ее подъема от 2,5 до 10,0 °С/мин.

В ходе проведения эксперимента установлено, что у описанных выше образцов стабилизация электрооптических характеристик происходила к 5 циклу. Контрольным методом служили циклические испытания, регламентируемые ГОСТ Р 56759-2015 (рисунок 6). Установлено, что предложенный коэффициент электрооптической стабильности существенно коррелирует с эксплуатационным ресурсом ЭХУ, характеризуемым количеством циклов (рисунки 6 и 7). Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,978, что свидетельствует о высокой степени их взаимосвязи. При этом время оценки технического состояния сократилось с нескольких суток до 1 часа, а сам способ не приводит к выходу из строя ЭХУ и не имеет ограничений на их площадь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена задача разработки методов и средств контроля и диагностики электрохромных

устройств, обеспечивающих ускоренную оценку технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса изделий на основе анализа их электрооптических характеристик, что имеет важное значение для повышения качества и конкурентоспособности электрохромной продукции.

Результаты работы:

1. Проведен анализ существующих методов и средств контроля и диагностики ЭХУ. Установлено, что существующие подходы имеют ряд ограничений по площади объектов, требуют длительных циклических испытаний и не всегда коррелируют с эксплуатационным ресурсом.

2. Исследованы электрооптические процессы в ЭХУ. Разработана математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между удельным электрическим зарядом, оптической плотностью и температурой ЭХУ (среднее значение коэффициента детерминации 0,98). Отличительной особенностью предлагаемой модели являются коэффициенты, характеризующие интенсивность интеркаляции ионов электролита в поверхностный слой электрохромного материала и в его объем. Для системы «WO_3 – электролит» установлены референсные значения $P_{\lambda 0}$: менее 14 мКл/см^2 – аморфная фаза, более 20 мКл/см^2 – кристаллическая. Модель обеспечивает идентификацию фазового состава электрохромного материала и качественную оценку однородности покрытия без проведения рентгенофазового анализа.

3. Разработаны программные, алгоритмические и приборные средства автоматизированного контроля и диагностики ЭХУ. Экспериментальная апробация подтвердила повышение достоверности оценки технического состояния и увеличение эксплуатационного ресурса изделий в среднем в 2 раза за счет снижения деградационного воздействия средства контроля на объект измерений.

4. Разработан метод оценки технического состояния ЭХУ на основе коэффициента электрооптической стабильности, обеспечивающий прогнозирование остаточного ресурса изделий (коэффициент корреляции Пирсона 0,978) при сокращении времени контроля с нескольких суток до 1 часа.

5. Разработанные электрооптические методы и средства контроля и диагностики состояния ЭХУ внедрены в опытную эксплуатацию АО «Октогласс» (акт о внедрении от 09.09.2026 г.) и в ООО «Фотофизикс» (акт о внедрении от 22.09.2026 г.).

Перспективы развития темы связаны с общими тенденциями эволюции электрохромной отрасли, ключевыми направлениями которой сейчас являются: расширение сфер применения, интеграция с системами сбора и хранения энергии, а также создание мультиспектральных модуляторов. Предлагаемые в диссертационной работе электрооптические методы и средства контроля и диагностики ЭХУ создают предпосылки для перехода от контроля единичных изделий к управлению качеством на уровне партий и производственных линий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Лебедев, С.О.** Разработка метода ускоренного контроля качества электрохромных устройств / **С.О. Лебедев**, Л.А. Русинов, В.В. Кравченко, Д.П. Княжев, К.С. Новикова, Д.Д. Бернт // Аналитика. – 2025. – Т. 15, №1. – С.50-56. DOI: 10.22184/2227-572X.2025.15.1.50.56.

2. **Лебедев, С.О.** Разработка низкочастотного зарядно-разрядного метода управления архитектурными электрохромными окнами / **С.О. Лебедев**, Л.А. Русинов, В.В. Кравченко, Д.П. Княжев, К.С. Новикова, Д.Д. Бернт // Приборы. – 2025. – № 2(296). – С. 42-47.

3. **Лебедев, С.О.** Разработка зарядно-разрядного метода управления крупногабаритными электрохромными устройствами / **С.О. Лебедев**, Л.А. Русинов, В.В. Кравченко, Д.П. Княжев, Д.Д. Бернт // Аналитика. – 2025. – Т. 15, № 3. – С. 230-234. – DOI 10.22184/2227-572X.2025.15.3.230.234.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. **Lebedev, S.O.** Effect of the electrical formation of electrochromic devices based on tungsten oxide / **S.O. Lebedev**, V.F. Borodzyulya // Journal of Optical Technology. – 2021. – Vol. 88, Issue 12. - P. 746-750. DOI: 10.1364/JOT.88.000746.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663124 Российская Федерация. Программный комплекс для автоматизированного управления параметрами электрохромных устройств. Заявка № 2020662461 : заявл. 16.10.2020: опубл. 22.10.2020; заявитель/правообладатель **Лебедев С.О**. – 53 МБ.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663357 Российская Федерация. Программа для автоматизированного расчета и визуализации электрооптических характеристик электрохромных устройств. Заявка № 2020662423: заявл. 16.10.2020: опубл. 27.10.2020; заявитель/правообладатель **Лебедев С.О**. – 69 МБ.

7. Патент на изобретение № 2758579 Российская Федерация, МПК G02F 1/163 (2006.01). Способ и программно-технический комплекс для управления электрохромными устройствами. Заявка № 2020107206: заявл. 17.02.2020: опубл. 29.10.2021; заявители/патентообладатели **Лебедев С.О.**, Бородзюля В.Ф., Трухман Г.П. – 16 с.: ил.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664079 Российская Федерация. Программа для циклических испытаний электрохромных устройств. Заявка № 2021663228: заявл. 19.08.2021: опубл. 30.08.2021; заявители/правообладатели Кошельков В.С., **Лебедев С.О.** – 650 КБ.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663924 Российская Федерация. Программа для автоматизированного управления «умными окнами». Заявка № 2021663230: заявл. 19.08.2021: опубл. 26.08.2021; заявители/правообладатели Кошельков В.С., **Лебедев С.О.** – 350 КБ.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617958 Российская Федерация. Программа для автоматического экспресс-исследования электрохромных устройств. Заявка № 2022616939: заявл. 18.04.2022: опубл. 27.04.2022; заявитель/правообладатель **Лебедев С.О.** – 420 КБ.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617962 Российская Федерация. Программа

для математического моделирования процессов окрашивания/обесцвечивания электрохромных устройств. Заявка № 2022616937 : заявл. 18.04.2022: опубл. 27.04.2022; заявитель/правообладатель **Лебедев С.О.** – 380 КБ.

12. Патент на изобретение № 2839673 Российская Федерация, МПК G01N 27/416 (2006.01), G02F 1/15 МПК (2006.01). Способ определения эксплуатационной надежности архитектурных электрохромных окон. Заявка № 2024137412: заявл. 11.12.2024: опубл. 07.05.2025; **Лебедев С.О.**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)». – 18 с. : ил.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662023 Российская Федерация. Программный комплекс для управления архитектурными электрохромными окнами. Заявка № 2025660769: заявл. 28.04.2025: опубл. 16.05.2025 / **Лебедев С.О.**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)». – 1,5 МБ.

14. Патент № 2864674 Российская Федерация, МПК G02F 1/163 (2006.01). Способ управления архитектурными электрохромными окнами. Заявка № 2025106286: заявл. 17.03.2025: опубл. 25.06.2026 / **Лебедев С.О.**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)». – 16 с. : ил.

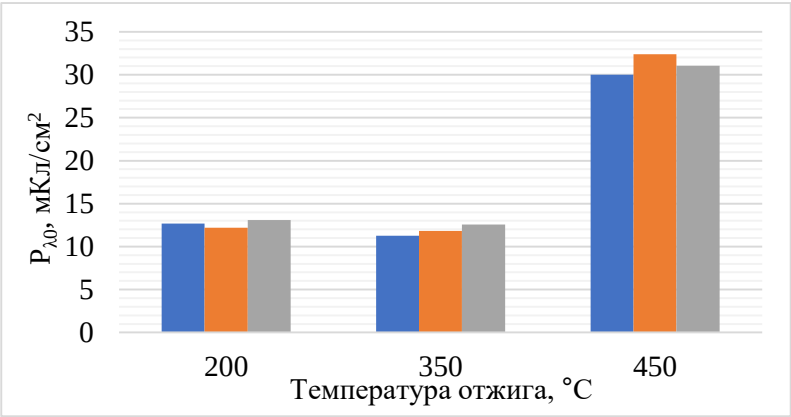


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента $P_{\lambda 0}$ от технологических особенностей изготовления электрохромных устройств, где цветом обозначены скорости подъема температуры при отжиге: - 2,5°С/мин; - 5°С/мин; - 10 °С/мин

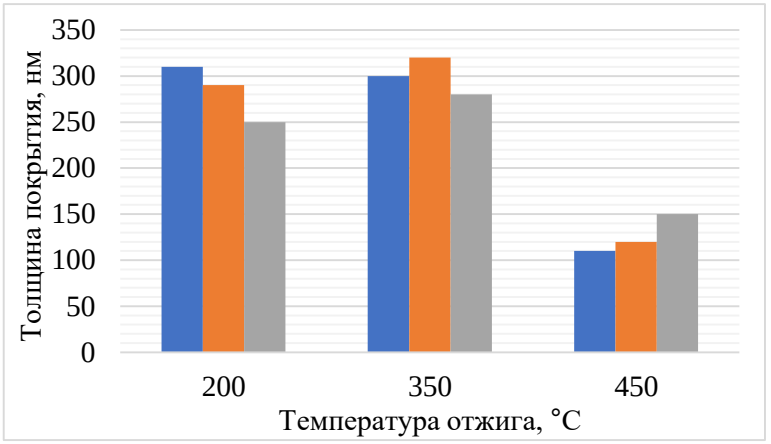


Рисунок 2 - Зависимость толщины покрытия от технологических особенностей изготовления электрохромных устройств, где цветом обозначены скорости подъема температуры при отжиге: - 2,5°С/мин; - 5°С/мин; - 10 °С/мин

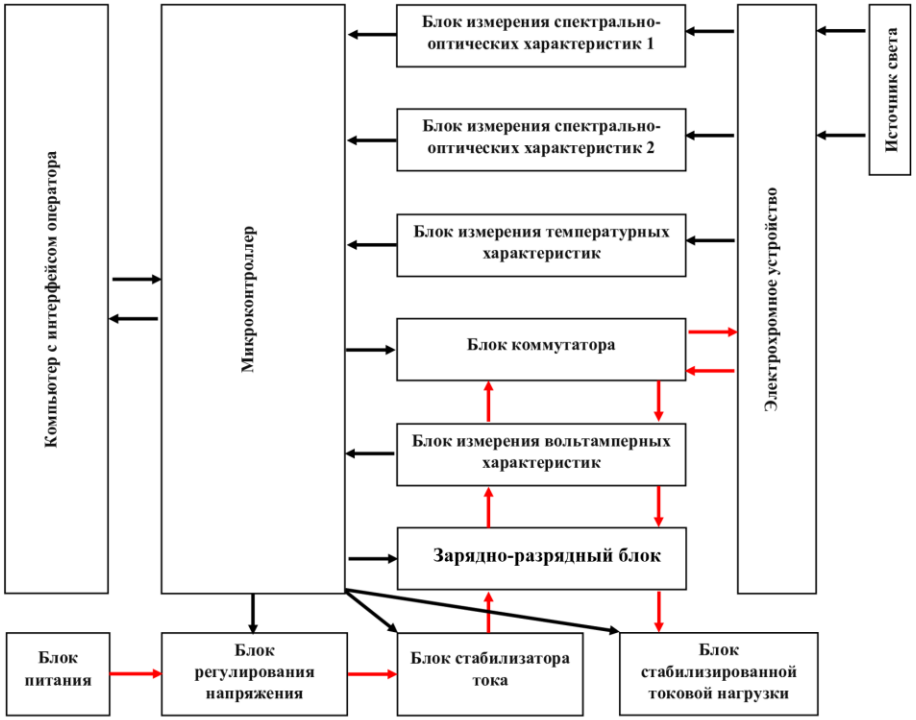


Рисунок 3 - Блок-схема разработанного программно-технического комплекса

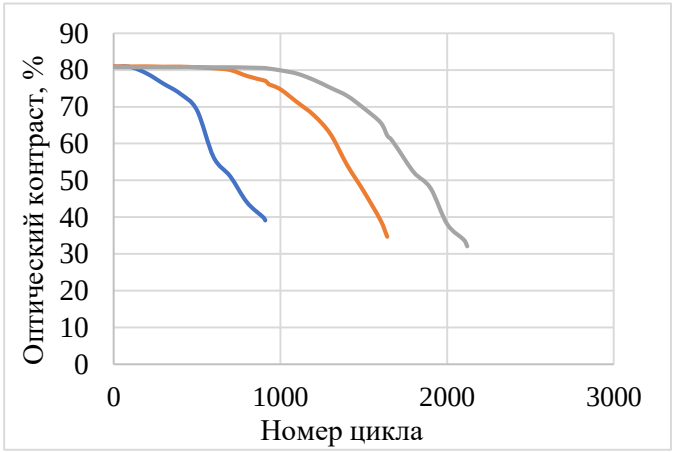


Рисунок 4 - Зависимость оптического контраста [%] от номера цикла для серии электрохромных устройств, где: - потенциостатический режим; – гальваностатический режим; – предложенное решение

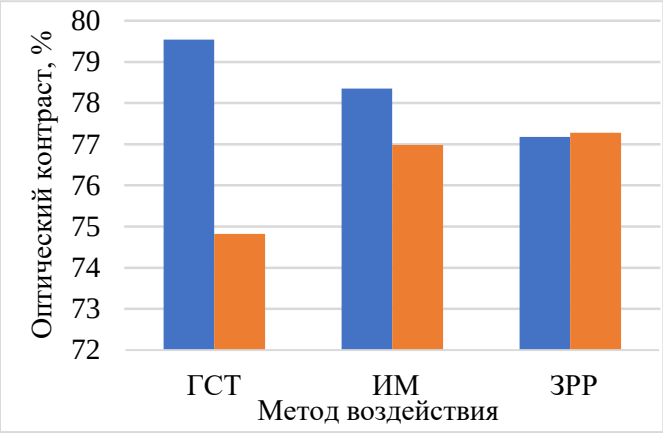


Рисунок 5 - Оптический контраст электрохромных устройств при различных режимах контроля, где - контраст на краю, около токоподводящей шины; - контраст в центре

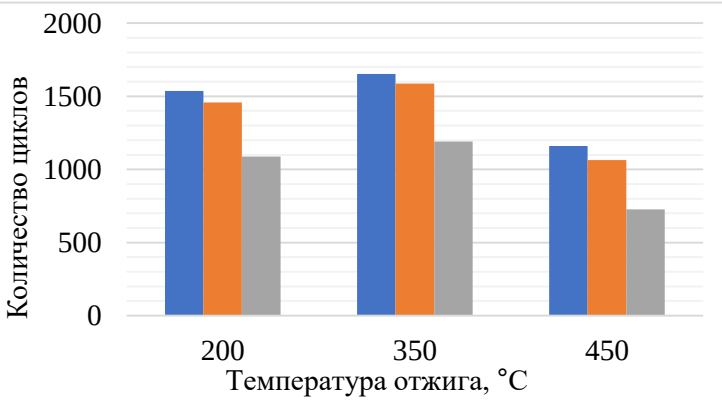


Рисунок 6 - Зависимость эксплуатационного ресурса (в циклах) электрохромных устройств от технологических режимов их изготовления, где цветом обозначены скорости подъема температуры при отжиге: - 2,5°С/мин; - 5°С/мин; - 10 °С/мин

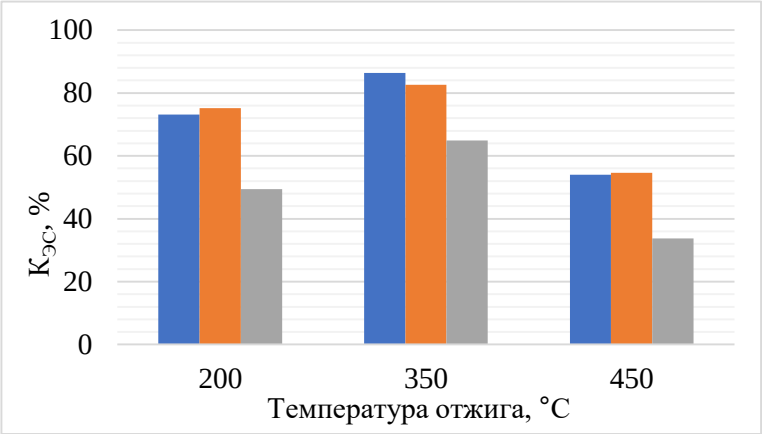


Рисунок 7 - Зависимость коэффициента электрооптической стабильности электрохромных устройств от технологических режимов их изготовления, где цветом обозначены скорости подъема температуры при отжиге: - 2,5°С/мин; - 5°С/мин; - 10 °С/мин