

На правах рукописи



ВОЛЧАНИН Георгий Викторович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР С
ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

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

Омск 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС (ОМИИТ)).

Научный руководитель: **Кузнецов Андрей Альбертович**
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Бехер Сергей Алексеевич**
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск, профессор кафедры «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физические методы контроля качества».

Окунев Александр Владимирович
кандидат технических наук,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск.

Защита состоится 25 декабря 2024 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.omgtu.ru> Омского государственного технического университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (при наличии), просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.01. Тел. +7 (3812) 62-85-58, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.350.01, кандидат
технических наук, доцент



С. А. Завьялов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Надежная и безаварийная эксплуатации элементов железнодорожного транспорта соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, согласно Указу Президента РФ от 16.12.2015 № 623, в котором отмечено направление и критическая технология «21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». В результате диагностирования техногенных объектов выявляются их предаварийные состояния, а выход их из строя способен нанести значительный материальный ущерб или негативное воздействие на окружающую среду.

К другим приоритетным направлениям относится «3. Информационно-телекоммуникационные системы» и критическая технология «13. Технологии информационных, управляющих, навигационных систем». Современные системы диагностирования должны строиться на основе современных информационных технологий и входить в состав систем более высокого уровня для своевременного принятия управляющих решений по их эффективному функционированию.

Опоры контактной сети играют важную роль в электроснабжении железнодорожного транспорта, включающих обеспечение электрической мощностью электроподвижной состав. Особенностью системы электроснабжения железнодорожного транспорта является его протяженность, поэтому для эффективной эксплуатации и диагностирования следует рассматривать отдельные участки и применение простых в обращении мобильных диагностических комплексов.

Современные системы диагностирования железобетонных опор контактной сети включают в свой состав большое число методов и технических средств, среди которых наибольшую эффективность показали электрохимические, акустические и визуальные средства диагностирования.

Каждый из приведенных методов имеет достоинства и недостатки, в то же время использование комплексного контроля повышает достоверность правильного диагноза. Развитие визуальных методов диагностирования получило новый импульс с появлением переносных видеоэндоскопических систем. Однако для различных объектов диагностирования (ОД) необходимо совершенствовать информационное обеспечение, развитие физических принципов взаимодействия средств диагностирования с ОД, выявление новых информативных параметров, связанных с состояниями нормальной работы.

Таким образом, создание технических средств, методик и алгоритмов функционирования мобильных автоматизированных систем диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения (тема НИР № г.р. АААА-А18-118091790073-6), а также при финансовой поддержке Регионального фонда «УМНИК» в рамках научного проекта, договор № 15660ГУ/2020 от 09.07.2020.

Степень разработанности темы диссертации. Исследования надежности и работоспособности, элементов систем электроснабжения железных дорог проводились научными коллективами ВНИИЖТа, РУТ(МИИТа), ДВГУПСа, ПГУПСа, УрГУПСа, ОмГУПСа, ОмГТУ, КГЭУ, НГТУ. Значительный вклад в

повышение надежности функционирования элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта внесли Российские ученые: Бардушко В. Д., Гречишников В. А., Гук Ю. Б., Жарков Ю. И., Закарюкин В. П., Ким К. К., Косарев А. Б., Крюков А. В., Ли В. Н., Львов Ю. Н., Марквардт К. Г., Молин Н. И., Пантелеев В. И., Тихомиров П. М., Фигурнов Е. П., Христинич Р. М., Худоногов А. М., Черемисин В. Т. и др.

Вопросам диагностирования элементов контактной сети посвящены работы Бессонова В. А., Буркова А. Т., Вайнштейна А. Л., Галкина А. Г., Ефимова А. В., Кандаева В. А., Котельникова А. В., Ли В. Н., Мироноса А. Н., Москвина В. М., Окунева А. В., Подольского В. И., Семенова Ю. Г., Сидорова О. А., Смердина А. Н.

Среди зарубежных ученых, внесших вклад в совершенствование технических средств и методов диагностирования железобетонных конструкций электротехнических комплексов внесли такие исследователи как С. Andrade, Y. Chen, B. Fink, F. Kiessling, S. Millar, M. Motamedi, J. Ozbolt, A. Schmieder, R. C. Sriramadasu, H. Tessun, T. Usuda, G. Wang, G. Wilsch,.

Несмотря на накопленный опыт создания высокоэффективных средств диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор остается актуальным совершенствование мобильных средств диагностирования на основе визуального контроля, повышение уровня их автоматизации для формирования достоверных диагнозов и принятия решений по своевременному техническому обслуживанию или замене дефектных объектов.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности технических средств диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети системы электроснабжения железных дорог на основе разработки методики визуального контроля, обработки изображений, и регистрации развития параметров коррозии во времени.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Произвести анализ методов и технических средств диагностирования железобетонных опор контактной сети системы электроснабжения железных дорог, с целью выявления степени коррозии, а также недостатков и достоинств существующих методов, обоснования применения оптических методов в зависимости от особенностей объекта контроля.

2. Исследовать причины возникновения токов утечки, влияющих на развитие коррозии в железобетонных опорах контактной сети постоянного тока с описанием физической модели и использованием компьютерного моделирования.

3. Выполнить экспериментальные исследования на образцах железобетона с имитацией электрокоррозии, вызванной прохождением различного количества электричества по конструкции арматуры с регистрацией изменения цвета поверхности.

4. Разработать технические средства диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор с использованием мобильного мехатронного видеондоскопического комплекса.

5. Разработать методику диагностирования железобетонных опор на основе визуальных средств контроля и информационной системы хранения и обработки данных диагностирования.

6. Разработать методику оценки снижения несущей способности железобетонных опор по результатам обработки оптического изображения участков поверхности, содержащей продукты коррозии.

Объект исследования – технические средства и методики диагностирования железобетонных опор контактной сети системы электроснабжения железных дорог.

Направление исследований – разработка методического, математического, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель возникновения токов утечки, обусловленных токами, наведенными в арматуре железобетонных опор со стороны тягового тока в контактной сети с обоснованием аппарата наведения токов утечки в арматуре со стороны квази-постоянного тягового тока. Приведены выражения для количественной оценки токов утечки в случае квази-постоянного тягового тока и его разложения с учетом гармонического состава. Показана связь накопительного действия токов утечки на развитие процесса коррозии и изменения оптических свойств поверхности бетона с различным уровнем коррозии.

2. Разработана методика определения концентрации продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий, с использованием визуальных средств контроля и последующей обработкой изображений, и получением достоверных результатов о количественном содержании продуктов коррозии с определением геометрических размеров дефектных областей с точностью, не уступающей точности используемых приборов контроля.

3. Сформирован алгоритм диагностирования железобетонных конструкций с использованием разработанного мобильного мехатронного комплекса визуального контроля, позволяющего производить оценку динамики развития коррозионного состояния опор контактной сети.

4. Разработана математическая модель неразрушающего контроля предельного коррозионного износа арматурных стержней под защитным слоем бетона по параметрам обработки визуального изображения с использованием основных положений теории диффузии и конвекции веществ в композитных средах.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработана математическая модель, учитывающая количество электричества, прошедшего через железобетонную конструкцию, вызывающего изменение коррозионного состояния, позволяющая разделять составляющие токов утечки, наводимые со стороны квази-постоянного тягового тока контактной сети и изменения переходного сопротивления.

2. Разработана математическая модель неразрушающего контроля предельного коррозионного износа арматурных стержней под защитным слоем бетона по параметрам обработки визуального изображения с использованием основных положений теории диффузии и конвекции веществ в композитных средах, адекватность которой подтверждена в эксперименте с использованием экспертного метода рентгеновского контроля.

3. Предложена методика оценки коррозионного состояния железобетонных опор по изменению концентрации продуктов коррозии на их поверхности, при этом информативным параметром являются данные визуального контроля с последующей обработкой изображений, позволяющие получать результаты количественного содержания продуктов коррозии по точности сравнимые с

традиционно используемыми методами определения количественного состава продуктов коррозии.

4. Разработаны технические средства диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор с регистрацией и обработкой изображения исследуемой поверхности, с использованием разработанного мобильного мехатронного комплекса визуального контроля, позволяющего получать панорамное изображение с привязкой к координатной сетке, определять координаты и размеры предполагаемых дефектов коррозии.

5. Сформирован алгоритм диагностирования железобетонных конструкций с использованием информационной системы хранения и обработки изображений, позволяющий определять динамику развития коррозионного состояния опор контактной сети.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач теоретические и экспериментальные исследования проведены на основе законов и методов расчета электрических цепей, теории электромагнитного поля, законов электрохимии, диффузионного переноса веществ и математического моделирования с применением программных продуктов на ЭВМ. Разработано программное обеспечение по обработке изображений с обучением на образцах сравнения с известным содержанием продуктов коррозии. Экспериментальные исследования проведены с использованием сертифицированного диагностического оборудования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель изменения коррозионного состояния железобетонных опор от количества электричества, прошедшего через железобетонную конструкцию с разделением причин возникновения и учетом вклада составляющих токов утечки, вызванных электромагнитной индукцией токов в арматуре и деградацией сопротивления изоляторов контактной подвески, способствующих ускорению процесса коррозии и изменению оптических параметров поверхности бетона.

2. Методика оценки коррозионного состояния объекта контроля по предложенным параметрам визуального контроля, основанного на обработке изображений образцов сравнения с известным содержанием в них продуктов коррозии, построением шкалы изображений и определением концентраций продуктов коррозии в объекте контроля с использованием пороговых значений и определением геометрических размеров дефектных областей.

3. Информационная система и алгоритм диагностирования железобетонных конструкций с использованием разработанного мобильного мехатронного комплекса визуального контроля, отличающегося возможностью регистрации координат предполагаемых дефектов и оценкой, динамики развития коррозионного состояния опор контактной сети.

4. Математическая модель неразрушающего контроля предельного коррозионного износа арматурных стержней под защитным слоем бетона по параметрам обработки визуального изображения с использованием основных положений теории диффузии и конвекции веществ в композитных средах.

Реализация результатов работы.

Методика оценки коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети в процессе эксплуатации, выявляющая динамику развития коррозионного состояния и позволяющая повысить достоверность диагностирования за счет обработки и хранения оптических изображений прошла

испытания в Омской дистанции электроснабжения – структурном подразделении Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД».

Степень достоверности научных положений и результатов диссертационной работы подтверждена экспериментальными исследованиями, выполненными на сертифицированном и поверенном оборудовании, практической реализацией и основана на корректном использовании положений теорий электромагнитного поля, электрических цепей, обработки изображений и математического моделирования. Адекватность предложенных решений подтверждена достаточно высокой степенью согласования теоретических результатов расчета концентрации продуктов коррозии с экспериментальными данными, полученными на образцах сравнения (расхождение составляет не более 10 %).

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: 61 Международной научно-технической конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов, студентов «Научно-инновационные технологии: идеи, исследования и разработки», Бишкек 2019; десятом международном симпозиуме «Элтранс-2019», ПГУПС Императора Александра I, С.-Петербург. 2019; четвертой всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» ОмГУПС. Омск, 2020; Polish Journal of Science № 42, 2021; международной научно-практической конференция «Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика» ОмГУПС. Омск. 2021; шестнадцатой научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте», посвященной Дню Российской науки 8 февраля 2022 г. ОмГУПС. Омск. 2022; Материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщ. Омск, 2022 г.; VII международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения», Омск, ОмГТУ, 16–17 мая 2023 г.; международной научно-технической конференции «Автоматизация» «RusAutoCon», Южно-Уральская группа IEEE; Сочи, 11-15 сентября 2023 г. На заседании кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС (Омск, 2022); на заседании постоянно действующего научно-технического семинара Омского государственного университета путей сообщения по экспертизе и обсуждению диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук по научным специальностям технических отраслей науки (Омск, 2022); Региональном конкурсе «УМНИК» 2020, 2021, 2022.

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 14 научных работ, в том числе три научные статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, две статьи в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus, и один патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 190 страницах основного текста, содержит 14 таблиц, 94 рисунка, список использованных источников из 140 наименований и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, значимость выбранной темы диссертации, её научное и практическое значение, сформулированы цель и задачи исследований и основные научные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел посвящен обзору методов диагностирования коррозионного состояния железобетонных конструкций, статистическому анализу и техническому обслуживанию опор контактной сети при эксплуатации.

Наибольшее количество событий, связанных с нарушением безопасности движения поездов в хозяйстве электрификации и электроснабжения происходит из-за отказов в работе устройств контактной сети. В 2019 году в результате отказов устройств контактной сети допущено 132 транспортных события (95,7 %), электроснабжения СЦБ – 4 (2,9 %) и тяговых подстанций – 1 (1,4 %).

Наиболее частыми причинами отказов устройств контактной сети в 2019 году, влияющими на безопасность движения в хозяйстве электрификации и электроснабжения, являются перекрытие и разрушения изоляторов контактной сети (18 %), которые могут сопровождаться токами утечки. Отказы опор контактной сети, сопровождающиеся потерей несущей способности в результате коррозионных разрушений, составили 2%, однако ущерб от выхода их строя опоры существенно выше, чем вышеперечисленные отказы, что свидетельствует о важности своевременного диагностирования и проведения технического обслуживания.

Основными источниками коррозионных разрушений железобетонных опор контактной сети являются блуждающие токи, стекающие по арматуре вследствие неисправности изолирующих частей каркаса опоры. По этой причине основные повреждения находятся в подземной части опоры и могут принимать разнообразные виды и формы.

Рассмотрены методы контроля коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети и линий электропередач, применяемые в настоящее время. К основным методам диагностирования можно отнести следующие акустический, электрохимический, визуальный, определение продуктов коррозии спектральными методами анализа, вибрационный и др. Приведены достоинства и недостатки существующих методов.

Отмечено, что все приведенные методы являются косвенными – измеряют параметры, зависящие от степени коррозии, которые могут реагировать на помехи. Откопка снаружи и осмотр требуют больших затрат. Выдвинуто требование документального подтверждения, повышающего достоверность контроля. Таким требованиям отвечают визуальные методы контроля с использованием видеоэндоскопических систем.

Второй раздел посвящен разработке математической модели возникновения токов утечки в железобетонных опорах, способствующих усилению коррозии. Рассмотрены основные виды изолирующих элементов, причины возникновения токов утечек при их повреждениях, произведен расчет токов наведенных в арматуре железобетонных опор со стороны тягового тока в контактной сети.

Основными причинами повреждения изоляторов являются: низкое качество изготовления тарельчатых фарфоровых изоляторов, применяемых на КС. Характерными видами повреждений в изоляторах являются: перекрытия по поверхности; вырыв пестика из заделки; механическое разрушение изолятора;

образование микротрещин под шапкой изолятора от воздействия солнечных лучей; пробой изолятора; перекрытия изолятора птицами, зверьками; набросы и другие.

Для создания виртуальной модели устройства диагностирования изоляторов была выбрана программа Multisim 12.0. С тестового генератора высоковольтных прямоугольных импульсов подается сигнал амплитудой 1000 В и частотой 1 Гц.

В качестве тестовых воздействий выбраны прямоугольные импульсы, имеющие непрерывный спектр высших гармоник. Поскольку объект диагностирования представлен комплексным сопротивлением, каждая из составляющих гармоник входного напряжения будет по-разному влиять на форму выходного сигнала.

Существенным фактором коррозии и как следствие трещинообразования в железобетонных опорах контактной сети является электромагнитное поле контактной подвески, которое воздействует на спиральную часть арматуры.

Электромагнитное поле, воздействуя на спиральную часть стальной арматуры опоры, индуцирует в ней электрический ток, который, стекая по арматуре в грунт, способствует возникновению коррозии.

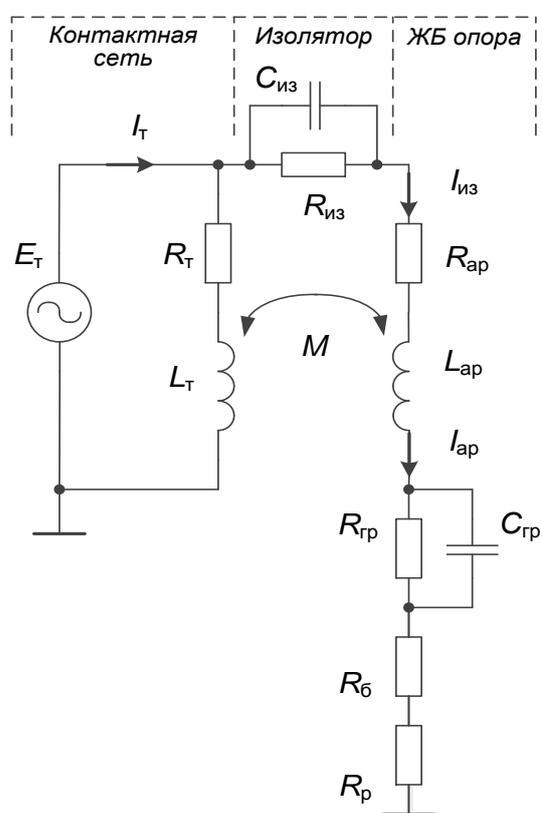


Рисунок 1 – Схема замещения ЖБ опоры с наведенным током в арматуре

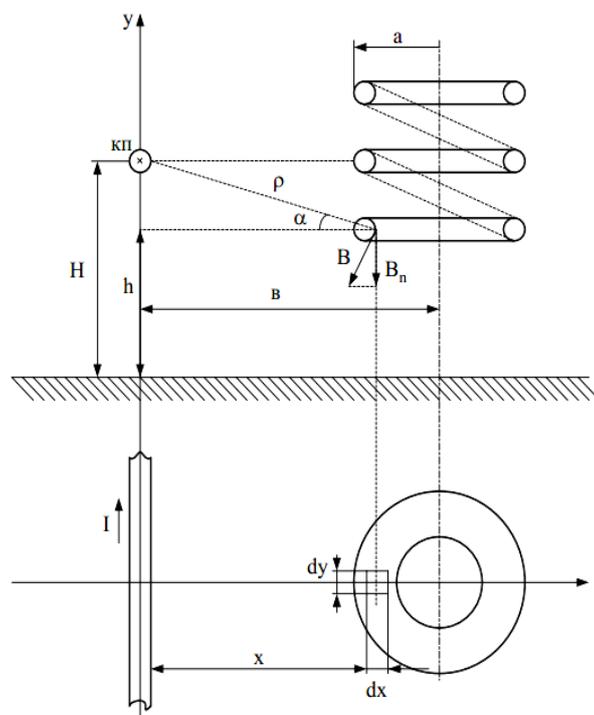


Рисунок 2 – Расчётная схема для определения наведенных токов в спиральной арматуре ЖБ опор

Упрощенная схема замещения возникновения тока, индуцируемого в арматурных элементах железобетонной опоры представлена в рисунке 1.

Величины токов арматуры будут зависеть от величины влияющего тягового тока протекающего по контактной подвеске, удаления опоры от контактной сети, от электрического сопротивления арматуры и от геометрических параметров

арматуры. Расчетная схема воздействия тягового тока на спиральную арматуру опор показана на рисунке 2.

Индукция магнитного поля в витке спиральной арматуры железобетонной опоры зависит от тягового тока и геометрических параметров расположения взаимодействующих элементов

$$B_n = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot \rho} \cdot \cos \alpha = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot x}{2\pi [x^2 + (H-h)^2]}, \quad (1)$$

где I – тяговый ток; $x, H, h, \rho, \alpha, a, b$ – геометрические параметры, представленные на рисунке 2, тогда магнитный поток определяется выражением

$$\Phi = \iint_S \frac{\mu_0 \cdot I \cdot x \cdot dx dy}{2\pi [x^2 + (H-h)^2]}. \quad (2)$$

Взаимная индуктивность так же определяется геометрическими параметрами контуров

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{b-a}^{b+a} \frac{x \sqrt{a^2 - (x-b)^2}}{x^2 + (H-h)^2} \cdot dx. \quad (3)$$

Так как $a \ll b$, то для практических расчётов можно считать $x \approx b$, тогда

$$M = \frac{\mu_0 \cdot b \cdot a^2}{2[b^2 + (H-h)^2]}. \quad (4)$$

В случае тяговой сети постоянного тока рассмотрим ток электровоза в виде набора гармонических составляющих за время прохождения относительно рассматриваемой опоры (рисунок 3).

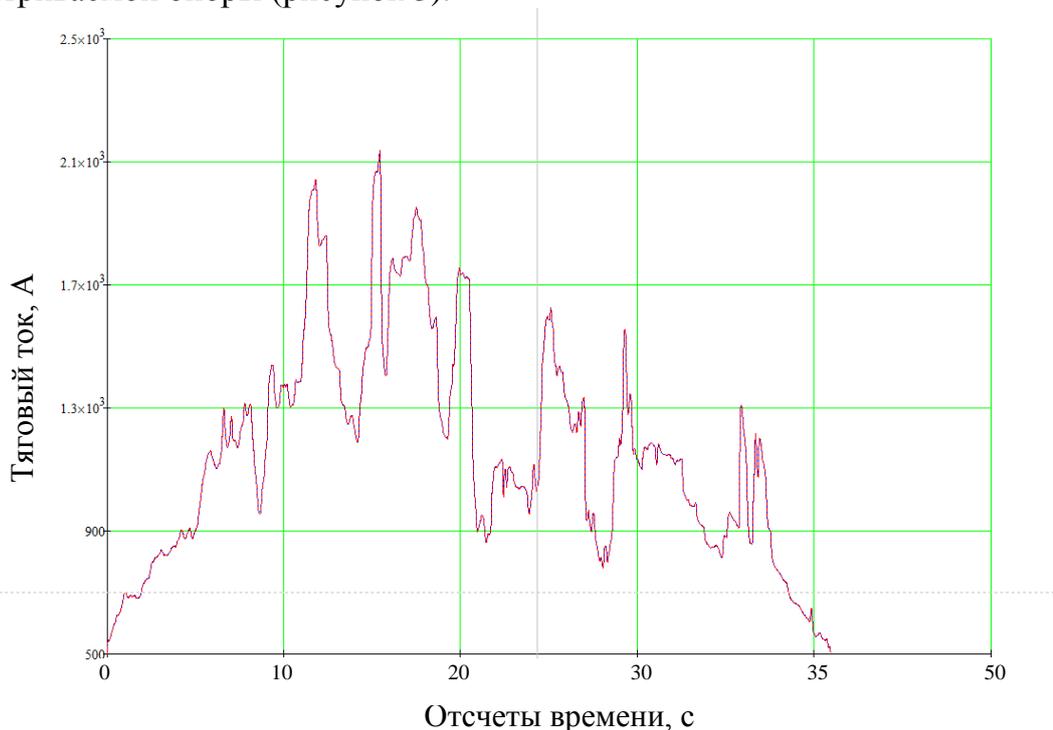


Рисунок 3 Тяговый ток на фидере ТП при прохождении электровоза.

Тяговый ток на рисунке 3 является квази-постоянным, поскольку изменяется во времени в зависимости от режимов ведения поезда. Ток представлен дискретными значениями, общее время регистрации фрагмента тягового тока

составляет 40,96 с. Таким образом, наведенную ЭДС можно представить совокупностью значений от гармонических составляющих тягового тока по выражению

$$E = \sum_{k=1}^n (I_k \omega_k M), \quad (5)$$

где I_k, ω_k – действующее значение и угловая частота гармоник тягового тока.

Амплитуды гармоник для квази-постоянного тока по выражению (5) получали при помощи процедуры $FFT()$ в программном комплексе *MathCad*.

Приведенные расчеты показывают, что на появление электрокоррозии существенное влияние оказывают токи, наводимые в арматуре железобетонных опор со стороны тяговой нагрузки. Постоянный тяговый ток может быть представлен в виде совокупности переменных гармонических составляющих, которые индуцируют ток в арматуре железобетонных опор. Степень развития электрокоррозии будет определяться количеством электричества, прошедшего за рассматриваемый временной период. Дальнейшие исследования будут проведены в направлении поиска зависимости количества электричества на развитие коррозии и изменениях оптических параметров поверхностного слоя бетона.

В третьем разделе приведена математическая модель переходного сопротивления, определяющего стекание тока с арматуры железобетонной опоры в грунт. Представлены экспериментальные исследования по созданию армированных железобетонных образцов с геометрическими параметрами, соответствующими толщине стенки опоры. Отмечено изменение цвета на участках поверхности железобетона, подверженные коррозии арматуры. Приведена схема замещения границы раздела бетон-арматура-грунт. Выполнено экспериментальное и имитационное моделирование процессов на границе раздела металл-бетон-грунт. В программе *Multisim* исследованы временные параметры коммутационного устройства, задающего поляризацию железобетонной опоры.

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы, представляющие собой бетонные блоки размером 200×60×60 мм с металлической арматурой в центре диаметром 10 мм и длиной так же 200 мм. Арматура выходит от верхней поверхности бетонного образца на 30 мм.



Рисунок 4 – Образцы 1В4О, 1В2О после испытаний

В некоторых образцах были выполнены отверстия диаметром 2 мм от поверхности до арматуры, моделирующие трещины в бетоне.

Образцы подключались к внешнему источнику напряжения, что соответствует реальным условиям эксплуатации опор контактной сети. В трех ваннах, заполненных 3% раствором *NaCl*, находилось по четыре образца, арматура которых соединялась электрическим проводником.

Положительный потенциал источника питания подключался к арматуре, а отрицательный к пластине, находящейся в ванне.

Подключение внешнего источника питания позволяет имитировать воздействие токов утечки и блуждающих токов от электрифицированного рельсового транспорта. Место стекания электрического тока с арматуры является анодом – на нем происходит окисление железа. Слой бетона будет выступать в качестве электролита, насыщенного различными ионами, где будет проходить процесс электролиза.

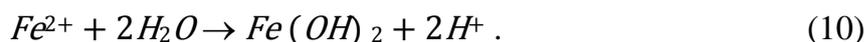
В качестве катода выступает медная пластина. Отмечено изменение цвета продуктов коррозии на поверхности в зависимости от количества электричества, прошедшего через образцы.

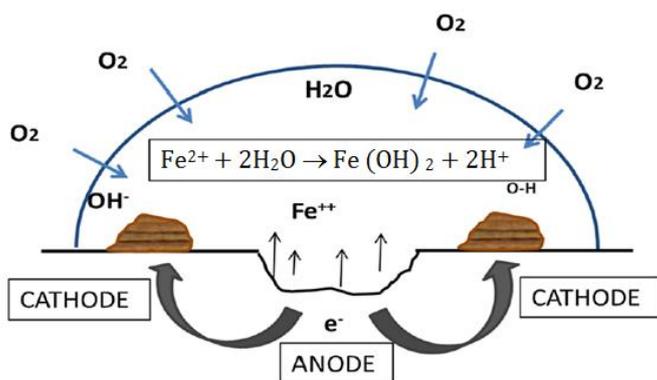
Как видно из рисунка 4 продукты коррозии, выступившие на поверхности, распространялись от открытой части арматуры сверху, а также из отверстий, имитирующих трещины в средней части бетона.

Сопротивление $R_{гр}$ характеризует интенсивность окислительного процесса. Емкость $C_{гр}$ создается на границе раздела «металл-электролит». Одной обкладкой является металл арматуры, другой – жидкий приэлектродный слой из диссоциированных и полярных молекул. Сопротивление бетона $R_б$ – сопротивление от границы раздела «арматура-бетон» до внешней границы опоры определяется параметрами бетона и внешней среды. Сопротивление растеканию R_p замещаемой площади опоры определяется параметрами земли. Так как арматурный каркас опоры состоит из отдельных элементов, которые в свою очередь состоят из отдельных прутков арматурной стали или отдельных прядей (проволоки арматурной стали различного сечения), имеющих между собой электрический контакт, то схема замещения будет представлять собой одну ячейку с эквивалентными параметрами.

Из работ, полученных ранее, показана взаимосвязь коррозионного состояния железобетонных опор линий электропередач и контактной сети от количества электричества, прошедшего через металлическую арматуру в грунт. При этом коррозия развивается от арматуры к поверхности, и сопровождается возникновением трещин и изменением цвета поверхности.

В четвертой главе представлено моделирование деградации арматурных стержней и распространения продуктов коррозии в железобетоне. Показано, что коррозия бетона – это электрохимический процесс, поскольку он включает в себя как химические реакции, так и циркуляцию электрического тока, в которой реагентами являются электрические заряды (электроны и ионы). Коррозия начинается на атомном уровне с образования микроячеек как схематично показано на рис. 5. Ячейка, образующаяся в центре коррозии, является анодной, поскольку она содержит меньше кислорода, чем ее граница, которая становится катодной. Коррозия всегда влечет за собой локальное окисление железа в зонах воздействия.





a)

б)

Рисунок 5 – Основные реакции начальной коррозии в каплях, образование гидроксид-ионов в катодной зоне (а), образование питтинговой коррозии в арматуре (б)

Поскольку продукты реакции могут широко варьироваться и включать множество промежуточных соединений, установление основного механизма требует весьма специфических исследований, которые мало применимы для использования в бетоне. Не следует упускать из виду сложность, обусловленную многочисленными стадиями и промежуточными видами продуктов коррозии с дисбалансом зарядов и растворенными ионами, окруженными различными пропорциями молекул воды. К описываемым в литературе видам продуктов коррозии относятся:

$[Fe(OH)^+]$, $[FeCl^+]$, $[Fe(OH)_2]$, $[Fe_3O_4]$, $[\gamma-Fe_2O_3]$, $[\gamma-FeOOH]$ или гели зелёной ржавчины переменного состава. Наиболее устойчивыми ржавчинами являются смеси гидроксидов и оксидов (называемые оксигидроксидами). Распространение продуктов коррозии происходит от арматурного стержня к поверхности бетона от места возникновения питтинговой коррозии.

Когда ржавчина полностью заполняет пространство между бетоном и арматурой, последующий рост коррозии приведет к появлению растягивающих напряжений. Массу продуктов коррозии W_{rust} можно определить измерением плотности тока коррозии I_{corr} , $\mu A/cm^2$, и рассчитать по выражению (11):

$$W_{rust} = \left(\int_0^t 0,098 \frac{1}{\alpha_r} \pi D I_{corr} dt \right)^{1/2}, \quad (11)$$

где W_{rust} – масса продуктов коррозии, вызывающих напряжение; ρ_{rust} – плотность продуктов коррозии, α_r – коэффициент типа продуктов коррозии, ρ_{st} – плотность стали.

Разработанная математическая модель с учетом хемо-гигро-термомеханических явлений сочетает в себе физические и электрохимические процессы при механическом поведении бетона в процессе повреждения. Модель переноса капиллярной воды описывается с точки зрения объемной доли влаги в порах бетона:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w (\theta_w) \nabla \theta_w], \quad (12)$$

где θ_w – объемная доля поровой воды (объем воды/м³ бетона); $D_w(\theta_w)$ – капиллярный коэффициент диффузии воды (м²/с), описываемый нелинейной функцией содержания влаги.

Распространение хлорид ионов через ненасыщенный бетон происходит в результате конвекции, диффузии, и процесса физического и химического связывания продуктом гидратации цемента:

$$\theta_w \frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_c(\theta_w, T) \nabla C_c] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_c - \frac{\partial C_{cd}}{\partial t}, \quad (13)$$

где C_c – концентрация хлорид ионов, растворенных в поровой воде (кг/м³ порового раствора), $D_c(\theta_w, T)$ – эффективный коэффициент диффузии хлоридов (м²/с), выраженный как функция содержания воды и бетона при температуре T , C_{cb} – концентрация связанного хлорида (кг/м³ бетона).

Согласно кинетике Батлера – Фольмера, современной модели кинетики реакций на катодной и анодной поверхностях можно оценить по формулам:

$$i_c = i_{0c} \frac{C_0}{C_{ob}} e^{2,3(\Phi_{0c} - \Phi)/\beta_c}; \quad i_a = i_{0a} e^{\frac{2,3(\Phi - \Phi_{0a})}{\beta_a}}, \quad (14)$$

где C_{ob} – концентрация кислорода на поверхности бетонного элемента, подвергающейся воздействию морской воды (кг/м³), Φ – электрический потенциал в поровом растворе вблизи поверхности арматуры (В), i_{0c} и i_{0a} – плотность тока обмен катодной и анодной реакции (А/м²), Φ_{0c} и Φ_{0a} – катодный и анодный равновесный потенциал (В), β_c и β_a – наклон Тафеля для катодной и анодной реакции (В/дек), соответственно.

Выполнены исследования по созданию регрессионной модели, связывающей влияющие факторы с выходным параметром – уменьшением площади сечения арматурного стержня под действием коррозии.

Наглядное изображение значимости влияющих факторов показано на диаграмме Парето для уровня значимости $p = 0,05$. Результирующая линейная модель зависимости площади пятна коррозии (y_{pred}) от четырех факторов: сила тока (x_1), время (x_2), наличие трещины (x_3), концентрация агрессивной среды (x_4) может быть представлена выражением:

$$y_{pred} = 0,840 - 0,038x_1 - 0,010x_2 - 0,095x_3 + 0,008x_4 - 0,003x_1x_2 - 0,018x_1x_3 - 0,005x_1x_4. \quad (15)$$

Качество полученной математической модели представлено остаточным членом (дисперсией) по всем анализируемым опытам составила $SS = 0,0009$, а остаточная дисперсия отклонений ($\delta_{ад} = 2,12\%$). Таким образом, показана связь концентрации продуктов коррозии на поверхности с изменением сечения арматурных стержней при их коррозии.

В пятой главе представлены результаты разработки и исследования технических средств оптического контроля коррозионного состояния по параметрам внутренней поверхности полый железобетонной опоры.

Устройство диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор содержит систему управления перемещением оптического зонда видеоэндоскопа внутри железобетонных опор контактной сети с регистрацией координат предполагаемых дефектов и получения изображений таких дефектов с указанием их размеров и координат расположения.

Видеоэндоскоп включает в себя гибкий оптический зонд с короткофокусным объективом и систему подсветки. Гибкий оптический зонд имеет возможность перемещения за счет применения шагового двигателя и поворота дистальной части в четырех направлениях, изображение через объектив попадает на оптоэлектронный преобразователь, затем сигнал по кабелю передается в блок преобразования, и выводится на монитор. Техническим результатом является обеспечение возможности проведения панорамного сканирования внутренней части железобетонной опоры контактной сети, а для получения данных о состоянии опор используется управляющий персональный компьютер и алгоритм обработки полученных изображений с дефектами.

На рис. 6 изображены: видеоэндоскоп 1 с гибким оптическим зондом 2, направляющий трос 3 с грузом 4, фиксирующие кольца 5, направляющая трубка 6 с ограничительным кольцом 7, управляющий персональный компьютер 8, шаговый двигатель 9, микроконтроллер 10, приводной ролик 11, прижимной ролик 12, катушка направляющего троса 13. Гибкий оптический зонд 2 видеоэндоскопа 1 соединен с направляющим тросом 3 при помощи фиксирующих колец 5.

При помощи гибкого зонда эндоскопа с управляемой видеоголовкой, длиной 3 м проводилась съемка внутренней поверхности опоры на глубине ниже 1,5 м от уровня земли и до вентиляционного отверстия, расположенного на 1,5 м выше уровня земли.

При фиксации изображения внутренней поверхности опоры с помощью одной камеры важно охватить всю исследуемую поверхность. Это позволило соединить несколько снимков в единый панорамный снимок, что в свою очередь позволило проводить более полный и точный анализ результата осмотра внутренней поверхности опоры.

Для проверки работоспособности мехатронного комплекса и получения панорамного изображения был изготовлен макет полый железобетонной опоры, в виде цилиндра высотой 160 см, диаметром 40 см.

Квадрату со стороной 10 см соответствует поворот на 30 угловых градусов. В качестве технических средств визуального контроля использовался видеоэндоскоп типа *JProbe-VE* с гибким зондом диаметром 6 мм и длиной 3 м, с возможностью управления дистальной частью.

В результате проведенных исследований разработан макетный образец мехатронного комплекса для визуального контроля дефектов коррозии полых железобетонных опор. Разработана информационная система обработки и хранения панорамного изображения внутренней поверхности опоры. Панорамное изображение получено с учетом разрешающей способности и угла обзора камеры видеоэндоскопа. Описанная система позволяет выявлять дефекты с размерами не менее 1 мм и определять их координаты.

Для определения коррозионного состояния строилась градуировочная шкала изменения концентрации определяемых элементов от изменения цветового изображения поверхности бетона. Далее определялась зависимость изменения площади поперечного сечения арматурных стержней от концентрации продуктов коррозии на поверхности бетона.

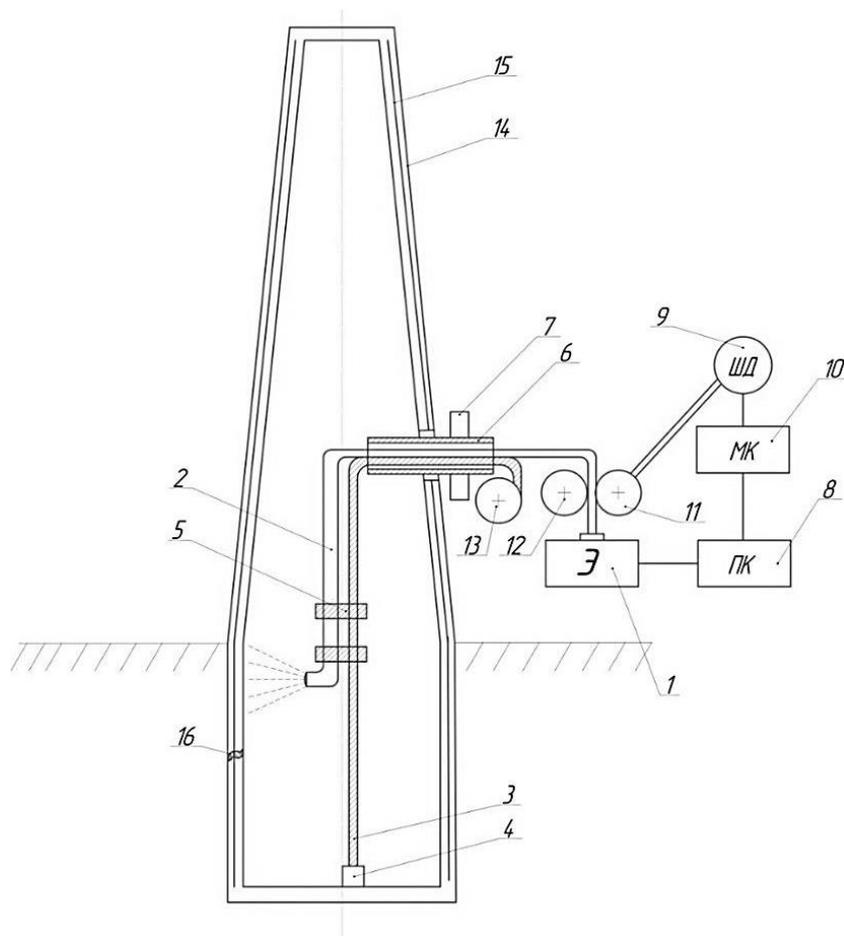


Рисунок 6 – Устройство диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети

Эксперимент по определению продуктов коррозии на поверхности железобетонной опоры проведен на образцах с заданным количеством хлорида железа. Таким образом, для анализа изменения цвета поверхности использовались образцы с известной концентрацией продуктов коррозии в виде $FeCl_3$, имитирующего разложение арматурных стержней.

Для обработки изображений использовался векторный анализ, в основу которого положен переход от трехкомпонентного представления цвета в системе RGB к векторному, которое является аналогом HSI -представления. На основе векторного представления выполняется кластеризация изображения по цветам.

Изображения поверхности образцов с низким и высоким содержанием $FeCl_3$, и гистограммами разложения по цветам представлены на рисунках 7 и 8. С увеличением концентрации продуктов коррозии изменяется цвет поверхности.

Выбрав из гистограммы для каждого из исследуемых образцов по два характерных цвета получим шкалу, соответствующую изменению количественного содержания примеси $FeCl_3$. Для построения цветовой шкалы использованы изображения восьми образцов, концентрация хлорида железа в которых изменялась от 0 до 7,8 %.

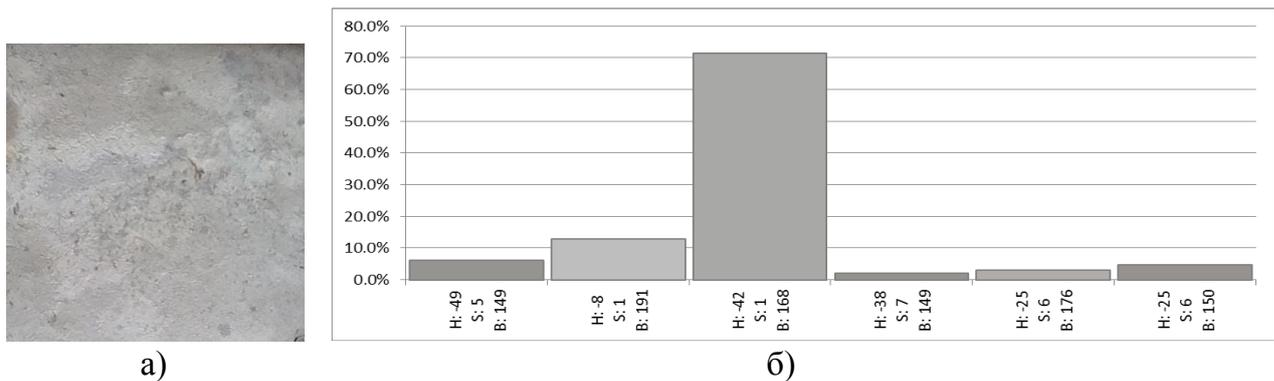


Рисунок 7 – Изображение поверхности а) и гистограмма цветов б) образца №1.

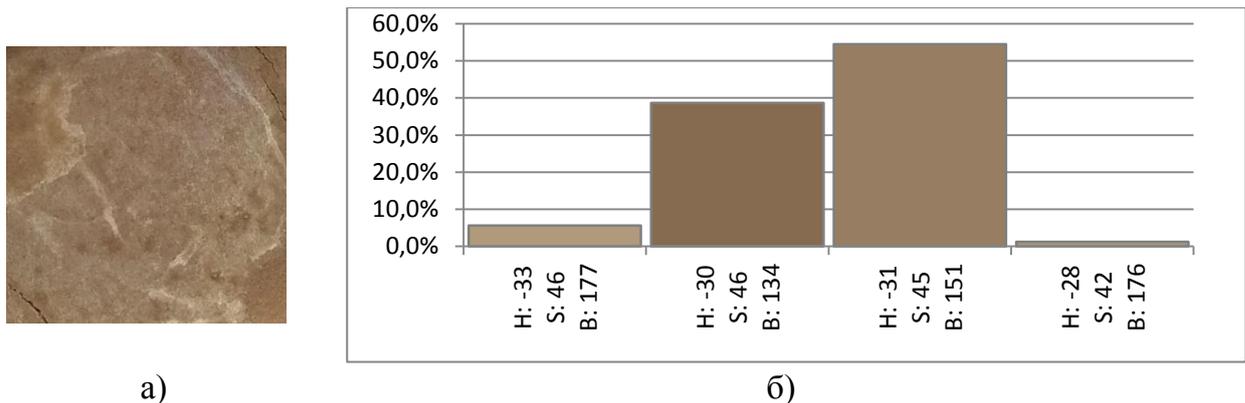


Рисунок 8 – Изображение поверхности а) и гистограмма цветов б) образца №13.

Идентификация коррозии на изображении в цветовом пространстве RGB требует больших вычислительных мощностей, поскольку хроматическая составляющая изображения может быть получена только с использованием информации от всех трех каналов, а именно красного, зеленого и синего. Была разработана компьютерная программа для обработки изображений и поиска участков коррозии. Изображение в оттенках серого не может быть легко использовано для идентификации коррозии в цветовом пространстве. Данное изображение преобразуется в HSI (оттенок (H), насыщенность (S) и интенсивность (I)) цветное пространство, в котором можно легко различить хроматические и ахроматические компоненты изображения. Компонент насыщенности изображения может быть легко использован для обнаружения коррозии. Например, исходное изображение в пространстве RGB , приведенное на рис. 9(а), преобразовано в HSI -параметры, по результатам обработки, которых все участки изображения категоризируются по степени коррозионных отложений (рис. 9(б), где черный цвет максимальная степень коррозии, а белый – отсутствие коррозионных отложений).

Преобразование изображения из цветового формата RGB в цветное пространство HSI осуществляется с использованием уравнений, приведенных ниже

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{if } B < G; \\ 360 - \theta, & \text{if } B > G, \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{где } \theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\};$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)]; \quad (16)$$

$$I = \frac{1}{3} (R + G + B) \quad (17)$$

Значения *RGB* должны быть нормализованы до диапазона [0, 1], а угол измеряется относительно красной оси цветового пространства *HSI*.

По заданным пороговым значениям программа выделяет области изображения с заданным уровнем содержания продуктов коррозии. Выполняя сопоставление порогового значения с цветовой шкалой концентраций, определяется количественное содержание коррозии в выделенной области. Кроме того, зная координаты пикселей на выделенной области, определяются координаты и размер дефектов коррозии. Алгоритм, определения размеров дефектов заданного уровня коррозии показан на рисунке 9.

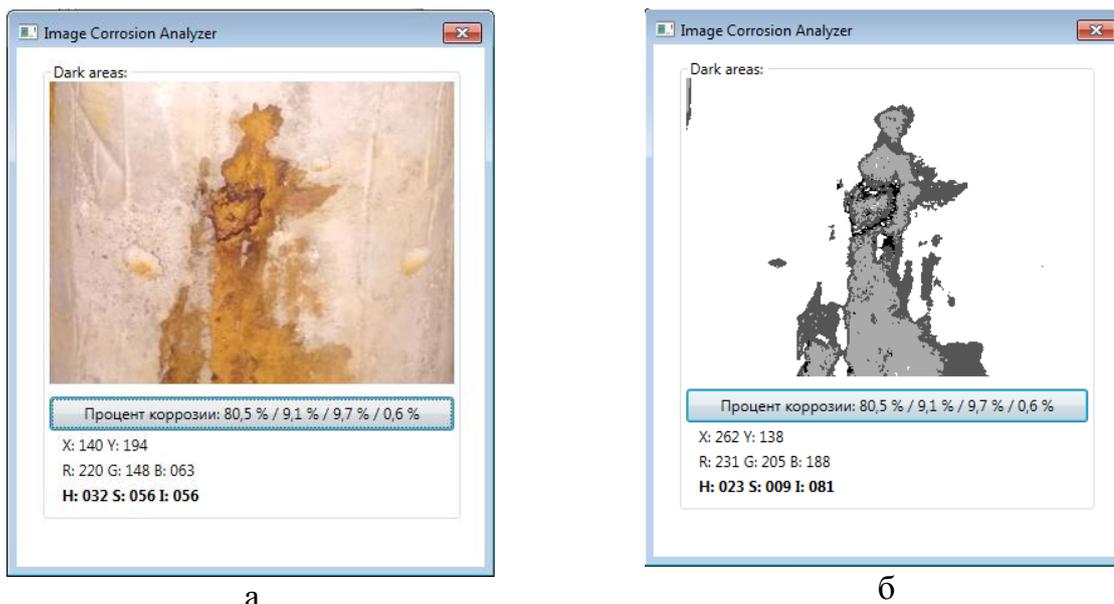


Рисунок 9 – Параметры исходного изображения (а); результат программной обработки изображения (б)

Например, на рисунке 10 а, показан результат программной обработки изображения участка бетона со следами электрокоррозионного разрушения с неизвестным составом продуктов коррозии на поверхности. На рисунке 10 б показан результат обработки данного изображения в виде гистограммы основных присутствующих на фото цветов.

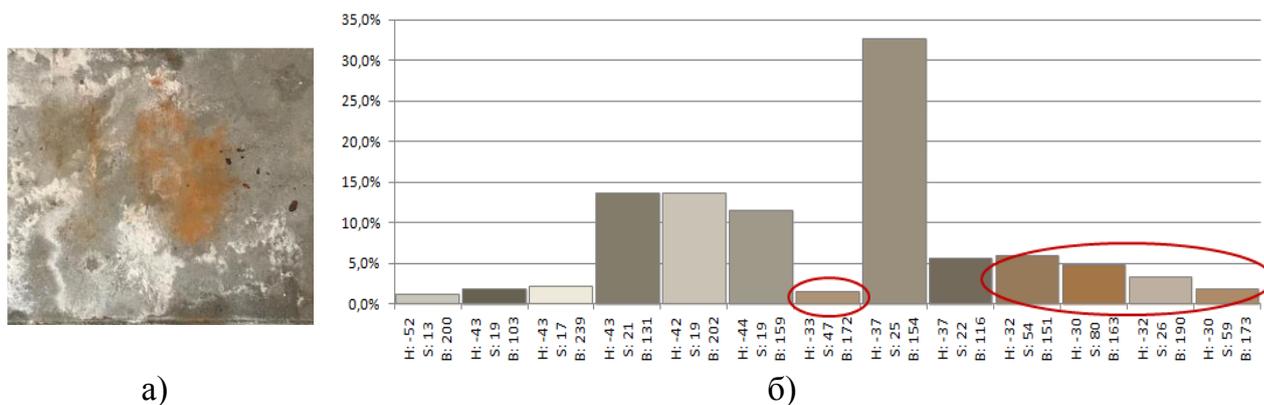


Рисунок 10 – Изображение исследуемой поверхности а) и результат ее обработки б)

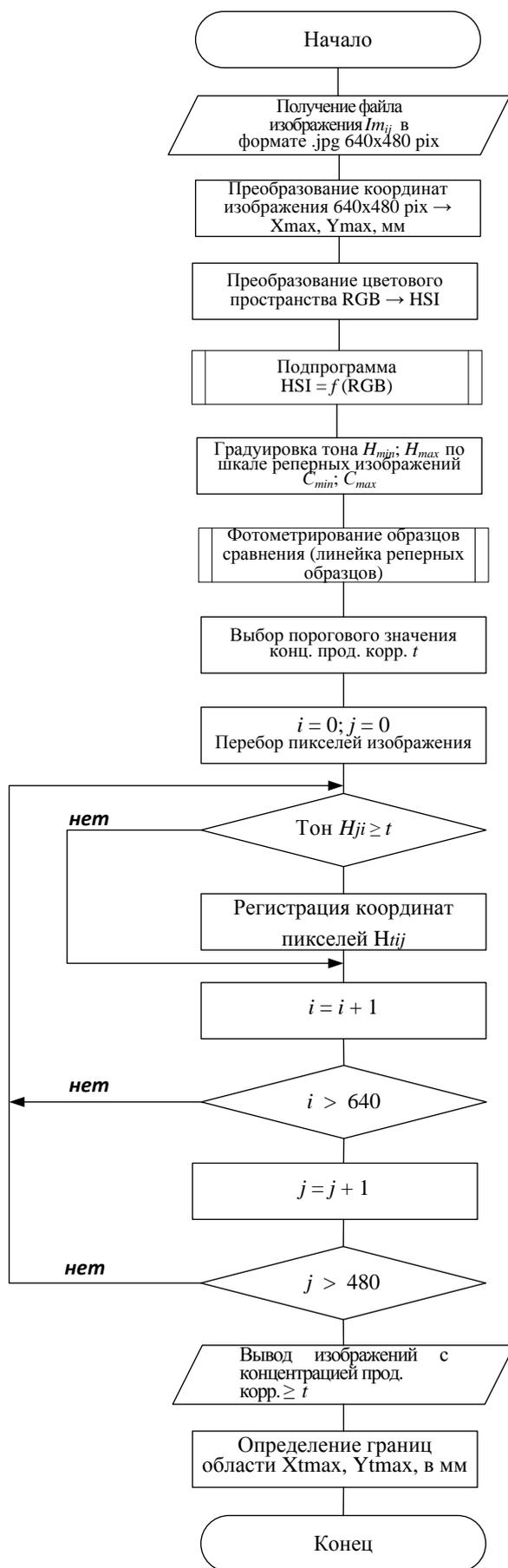


Рисунок 11 – Алгоритм, определения размеров дефектов заданного уровня коррозии

Выделенные пять участков показывают примерное процентное соотношение поверхности со следами коррозии по отношению к общей площади фотографируемой поверхности. В данном случае продукты коррозионного разрушения занимают около 18% поверхности, причем наиболее яркие проявления коррозии видны на 4,8% поверхности.

Алгоритм, определения размеров дефектов заданного уровня коррозии представлен на рисунке 11.

Для определения объема продуктов коррозии в бетоне над арматурным стержнем нужно вычислить объем фигуры, сверху ограниченной площадью коррозионного пятна, а снизу площадью арматуры, подверженной коррозии, как показано на рисунке 12.

$$V = \Delta S \cdot h = \frac{\sqrt{2}\sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{R^2 - r^2}{4}\right) \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b}}{R} = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot (R^2 - r^2)}{2 \cdot R}. \quad (18)$$

Потеря диаметра арматурного стержня после воздействия коррозии, определится выражением (D , D_k – диаметр арматуры до и после коррозии):

$$(D - D_k) = \frac{V \cdot C \cdot S_{\text{корр}} \cdot k_{\text{стр}}}{\rho_{\text{ст}} \cdot L_k}, \quad (19)$$

где C – измеренная концентрация продуктов коррозии; V , $S_{\text{корр}}$, L_k – объем, площадь, длина пятна продуктов коррозии бетона; $\rho_{\text{ст}}$, $k_{\text{стр}}$ – плотность стали и коэффициент структуры продуктов коррозии.

Таким образом, измерив, площадь продуктов коррозии на поверхности, определив концентрацию продуктов коррозии с принятыми допущениями можно определить изменение сечения арматурного стержня.

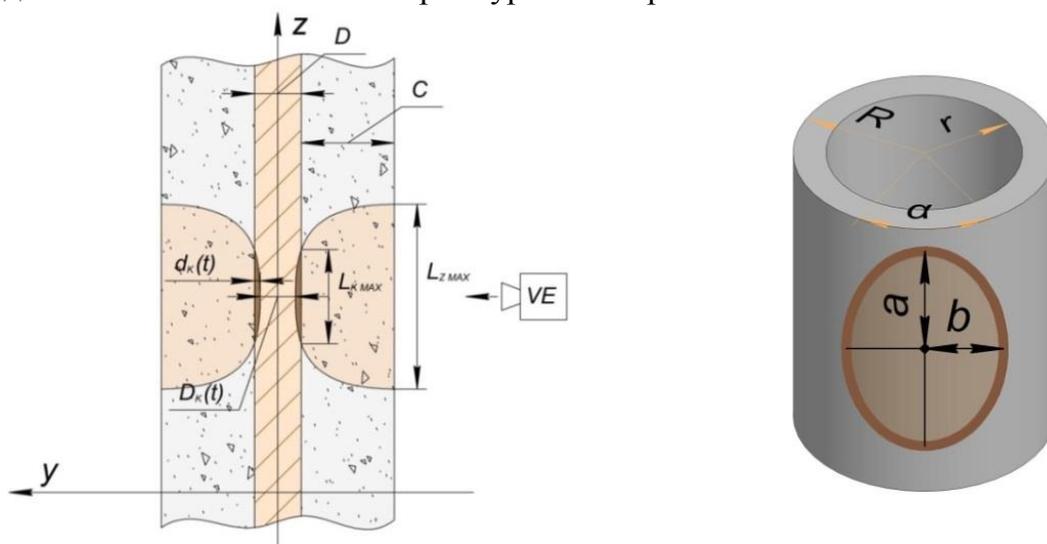


Рисунок 12 – Схема и обозначения для определения объема продуктов коррозии

В результате проведенных исследований разработаны относительно простые технические средства, позволяющие методами неразрушающего контроля определять изменения сечения арматурных стержней полых железобетонных опор под защитным слоем бетона, которые определяют их несущую способность. В этом случае можно воспользоваться Указаниями по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций ОАО «РЖД», для которых определено снижение на 20% сечения открытых металлических конструкций, с возможностью их инструментального обследования, для признания их острodefектными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности технических средств и методов диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор системы электроснабжения железных дорог на основе разработки методики визуального контроля с последующей обработкой изображений.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. В результате анализа существующих методов и технических средств диагностирования железобетонных опор контактной сети системы электроснабжения железных дорог, с целью выявления степени коррозии, а также недостатков и достоинств существующих методов, обосновано применение оптических методов в зависимости от особенностей объекта контроля. Применение оптического контроля совместно с алгоритмами обработки изображения повышает быстродействие и снижает затраты на проведение контроля без потери точности.

2. Сформирована математическая модель определения токов утечки в железобетонных опорах системы электроснабжения. Исследованы различные причины возникновения токов утечки в железобетонных опорах контактной сети постоянного тока на основе учета токов утечки в изоляторах, изменения сопротивления металл-бетон-грунт, а так же составляющей, вызванной воздействием тягового тока на арматуру. Показан вклад образования продуктов коррозии на поверхности железобетонных опор в зависимости от количества электричества, прошедшего через арматурные стержни. Результаты эксперимента отличаются от теоретических расчетов ($\delta_{ад}$) не более 3 %.

3. Разработан опытный образец технических средств диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор с использованием мобильного мехатронного видеозендоскопического комплекса, позволяющего регистрировать и обрабатывать изображения исследуемой поверхности с указанием координат дефектов и параметров цвета. Выполнен теоретический расчет применяемой оптической системы для получения непрерывного панорамного изображения диагностируемой поверхности.

4. Разработана методика диагностирования на основе визуальных средств контроля и информационной системы хранения и обработки данных диагностирования, с возможностью измерения геометрических параметров дефектов, а также оценки степени развития коррозии по анализу количества продуктов коррозии на поверхности. Выполнена градуировка, и получена цветовая шкала сравнения на основе испытания образцов с известным содержанием продуктов коррозии в бетоне в интервале концентраций от 0,5 до 8,0%, позволяющая определять границы с заданным количественным содержанием продуктов коррозии в неизвестных образцах.

5. Разработан алгоритм определения границ поверхности бетона с заданным уровнем продуктов коррозии на основе предложенного метода пороговых значений изображений сравнения, отличающийся от известных значений порогового уровня и наличием соответствующего ему изображения сравнения. Относительная погрешность определения концентрации продуктов коррозии на поверхности

бетона предложенным методом не превышает 10% по сравнению с экспертным спектральным методом.

б. На основании теории электрохимии, конвекции, диффузии, и процессов тепло – массо обмена, приведены выражения для определения уменьшения сечения арматурного стержня под защитным слоем бетона по результатам определения концентрации продуктов коррозии и форме пятна на поверхности бетона в расчетной области. Приведена геометрическая модель распространения продуктов коррозии к поверхности защитного слоя бетона. Таким образом, представлены технические средства и методика неразрушающего контроля определения деградации стальных арматурных стержней железобетонных опор. Получен относительно простой и достоверный способ определения снижения несущей способности железобетонных опор в процессе их эксплуатации.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается проведение исследований эффективности алгоритмов диагностирования на основе обработки выходных данных различных видов контроля коррозионного состояния железобетонных опор. Определение прочностных характеристик опор в зависимости от положения и параметров дефекта.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Кузнецов, А. А. Диагностирование электрокоррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. Г. Зверев, **Г. В. Волчанин**. – DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-50-55 // Омский научный вестник. – 2021. № 5 (179). С. 50–55.

2. Кузнецов А. А. Определение электрокоррозионного состояния железобетонных конструкций по параметрам изменения цвета на видеоизображении / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. Ю. Кузьменко, **Г. В. Волчанин**. – DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-75-79 // Омский научный вестник №3 (183) 2022. С. 75-79.

3. **Волчанин, Г. В.** Обнаружение и количественная оценка коррозии на поверхности железобетона с помощью анализа изображений / Г. В. Волчанин, А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев // Приборы. 2023. №6 (276). С. 35-42.

б) научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus

1. Kuznetsov, A. A. Image Processing for Visual Inspection of Hollow Reinforced Concrete Supports' Inside Surfaces / A. A. Kuznetsov, A. V. Ponomarev, K. I. Fomichenko, A. D. Gritsutenko, **G.V. Volchanin**. – DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012014 // Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Natures (4) 2022. p. 54-60.

2. Kuznetsov, A. A. Corrosion Quantification on Reinforced Concrete Surfaces Using Image Analysis / A. A. Kuznetsov, A.V. Ponomarev, **G. V. Volchanin**. – DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446410 // RusAutoCon - 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Xplore: 11-15 September 2023. pp. 80-84.

в) интеллектуальная собственность

1. Патент № 207785 Российская Федерация, МПК G01 N17/00, G01 N21/88. Устройство диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети : № 2021121614: заявл. 20.07.2021: опубл. 16.11.2021. / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, **Г. В. Волчанин**, К. И. Фомиченко, А. С. Брюхова.

г) научные работы, опубликованные в других изданиях:

1. Кузнецов, А. А., Совершенствование методов диагностирования железобетонных конструкций в системе электроснабжения железных дорог в полевых условиях / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, Н. В. Волкова, **Г. В. Волчанин**. // 61 Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов, студентов «Научно-инновационные технологии: идеи, исследования и разработки», часть II – Технологический парк Издательский центр «Техник» 2019. Бишкек 2019. – С. 62-71.

2. **Волчанин, Г. В.** Применение акустической эмиссии для диагностики железобетонных опор контактной сети / Г. В. Волчанин. // Десятый междунар. симпозиум «Элтранс-2019», посвященный 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России – Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. – Санкт Петербург: Петербургский гос. университет путей сообщения. – 2019. С. 78-83.

3. **Волчанин, Г. В.** Моделирование режимов работы генератора импульсов электрохимического устройства диагностирования коррозионного состояния железобетонных конструкций / Г. В. Волчанин, А. А. Кузнецов, В. А. Кандаев // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. С. 121-128.

4. Кузнецов, А. А. Формирование панорамного изображения цилиндрической поверхности для управляемого эндоскопа / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, **Г. В. Волчанин**, А. В. Фоменко. // Polish Journal of Science № 42, 2021. – С. 76-79.

5. Кузнецов, А. А. Обработка изображений визуального контроля внутренних поверхностей полых железобетонных опор / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, **Г. В. Волчанин**, К. И. Фомиченко // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2022. – № 3(6). – С. 70-76.

6. Кузнецов, А. А. Определение коррозионного состояния железобетонных конструкций по параметрам обработки видеоизображения / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. А. Запрудский, **Г. В. Волчанин** // Материалы шестнадцатой научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте», посвященной Дню Российской науки 8 февраля 2022 г. ОмГУПС. Омск. 2022. С. 251-257.

7. Кузнецов, А. А. Влияние тягового тока на процесс коррозии железобетонных опор в сетях постоянного тока / А. А. Кузнецов, А. Г. Зверев, **Г. В. Волчанин** // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщ. Омск, 2022. С. 191-199.

8. **Волчанин, Г. В.** Анализ изображений поверхности железобетонных образцов подверженных коррозии / А. А. Кузнецов, Г. В. Волчанин // Проблемы машиноведения: Материалы VII Международной научно-технической конференции, Омск, 16–17 мая 2023 года. Науч. редактор Ю. А. Бурьян. – Омск: Омский государственный технический университет, 2023. – С. 26-31.