

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Омский государственный университет путей сообщения»
(ОмГУПС (ОМИИТ))

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Кузнецов Андрей Альбертович

ОМСК 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	13
1.1 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ	13
1.2 АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	23
1.3 СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	31
1.4 ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	32
1.5 ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	35
1.6 ВЫВОДЫ.....	37
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТОКОВ УТЕЧКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	38
2.1 СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ ВЫЗВАННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ В ИЗОЛЯТОРАХ.....	38
2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЧАСТКА КОНТАКТНОЙ СЕТИ.....	43
2.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОГРАММЕ MULTISIM	46
2.4 СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ НАВОДИМЫЕ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ В АРМАТУРЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ.....	50
2.5 ВЫВОДЫ	59
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ ПЕРЕХОДА АРМАТУРА-БЕТОН	61
3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СРАВНЕНИЯ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ КОРРОЗИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА	61
3.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗИ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА.....	68

3.3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ-БЕТОН-ГРУНТ	76
3.4 ВЫВОДЫ	82
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОНЕ.....	83
4.1 РОЛЬ КИСЛОРОДА В ДЕПАССИВАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ КОРРОЗИИ	85
4.2 СОСТАВ ОБРАЗОВАВШЕЙСЯ РЖАВЧИНЫ	87
4.3 ХИМИКО-ГИГРО-ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕТОНА.....	91
4.4 ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ	95
4.5 ВЫВОДЫ	113
5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.....	115
5.1 РАЗРАБОТКА МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ	115
5.2 ФОРМИРОВАНИЕ ПАНОРАМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ	127
5.3 РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ	131
5.4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ.....	136
5.5 ВЫВОДЫ	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	166
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	169
Приложение А	187
Приложение Б.....	188
Приложение В.....	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Актуальность темы исследования. Надежная и безаварийная эксплуатация 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 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., Митрофанова Н. В., Москвина В. М., Подольского В. И., Семенова Ю. Г., Сидорова О. А., Смердина А. Н. и др.

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. Ožbolt, 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 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 расширенном заседании кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПСа (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, ученой степени 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.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В процессе эксплуатации оборудования контактной сети проводят: ежедневное наблюдение за их состоянием, капитальный ремонт (КР), обновление и реконструкцию (ОР) – восстановление или реконструкция (ВР). При техническом обслуживании устройств контактных сетей осуществляются регулярные осмотры, обходы (объезды) ТО – 1; диагностические испытания и измерения ТО-2; технические обследования ТО-3. [34-36, 112-117].

ТО-1 проводят с целью своевременного выявления неисправностей или отклонений от рабочего состояния контактной сети. ТО-2 производится с целью обнаружения различных неисправностей, а также установления необходимости их ремонта. Наблюдения за работой устройств контактной сети осуществляют специальные инженеры-испытатели на специально обученном персонале при помощи вагонов – лаборатории, приборов технического диагностирования

При ТО-3 проводится тщательное обследование всех обслуживаемых устройств, а для контактной подвески — с площадки автотрисы или съемного вышки (верховой осмотр), определение объемов и видов ремонта не выявленных в результате ремонтно-монтажных работ. С целью уточнения сроков выполнения технического обслуживания устанавливают по результатам проверочных обследований, проведенных при проведении двух предыдущих планов: техническое состояние системы устройства и их отдельных узлов и элементов.

В хозяйстве электрификации и электроснабжения наибольшее количество происшествий, связанных с безопасностью движения поездов в 2019 году произошло из-за отказа устройств контактной сети, в связи с этим

произошло 132 транспортных события (95,7%), электроснабжения СЦБ – 4 (2,9 %), тяговых подстанций – 1 (1,4 %) [37]. На рисунке 1.1 представлена диаграмма событий, произошедших на электрифицированной железной дороге



Рисунок 1.1 – диаграмма событий, произошедших на электрифицированной железной дороге в 2019 году

Согласно с распоряжению ОАО «РЖД» от 29.05.2007г. № 987р «Об утверждении функциональной стратегии обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в ОАО «РЖД» задача снижения количества отказов технических средств решается в хозяйстве на основе анализа баз данных отказов технических средств (КАС АНТ и АСУ Э) с применением методики Менеджмента качества и выполнения статистического анализа нарушений нормальной работы элементов системы тягового электроснабжения, отказы которых определяют динамику отказов и состояние безопасности движения в целом по хозяйству.

Статистический анализ отказов элементов системы тягового электроснабжения является важным инструментом для определения динамики отказов и обеспечения безопасности движения в транспортной системе. На рисунке 1.2 представлен анализ отказов устройств контактной

сети в 2019 году, а также данные за период с 2008 по 2019 год [38-47]. Результаты статистического анализа помогают определить причины отказов и разрабатывать меры по их устранению, обеспечивая более надежное и безопасное функционирование системы.

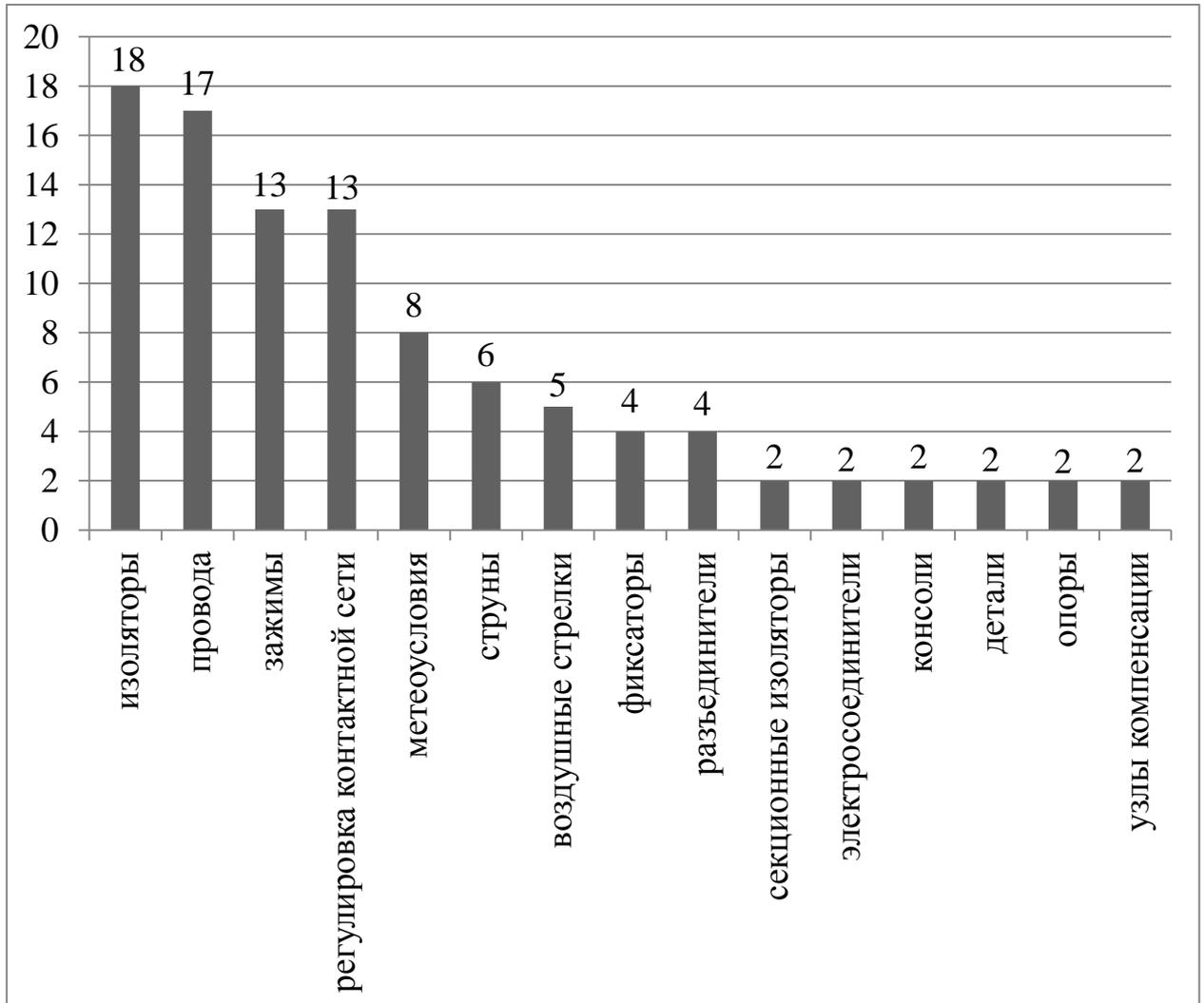


Рисунок 1.2 – Статистический анализ отказов элементов системы тягового электроснабжения в 2019 г.

На железнодорожном транспорте часто возникают проблемы с устройствами контактной сети. Это может вызвать задержки и отмены рейсов, что негативно сказывается на пассажирах и стоимости перевозок. Исследования показали, что основными причинами отказов являются недостаточная сила зажимов (13%), нарушения регулировки контактной сети (13%), метеоусловия (8%) и обрывы струн (6%). Статистика по

распределению основных причин отказов устройств контактной сети за период с 2008 по 2019 годы сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Распределение отказов устройств контактной сети за период 2010 – 2019 гг.

Год	Устройства контактной сети					
	Изоляторы, %	Провода и тросы, %	Зажимы к.с., %	Регулировка к.с., %	Обрывы струн, %	Опоры, %
2010	17,7	27,3	14,4	-	9,7	1
2011	16	29,5	14,7	-	7,2	1,5
2012	11,8	30,5	16,2	-	8,4	0,4
2013	14,0	31,2	14,0	-	10,0	0,8
2014	15,7	13,3	13,5	21,4	5,7	–
2015	15	7	10	20	7	2
2016	21	11	10	13	7	2
2017	17	17	8	15	8	1,3
2018	21	19	11	10	7	2
2019	18	17	13	13	6	2

Как видно из данной таблицы, доля повреждаемости изоляторов, относительно остальных отказов, всегда оставалась высокой и за последние шесть лет вышла на первое место по этому показателю. Процентное отношение отказов опор контактной сети значительно меньше, однако нужно иметь ввиду, что затраты на восстановление отказа подобного рода гораздо выше. Поэтому важно этот показатель удерживать на минимальном уровне или свести его к нулю.

В 2019 году основными причинами нестабильной работы устройств контактной сети были неудовлетворительное качество обслуживания и ремонта устройств электроснабжения 12 отказов (18%), заводской брак 10 отказов (8%), нарушение технологии работ 9 отказов (14%),

неудовлетворительное качество осмотров устройств электроснабжения 9 отказов (14%), старение устройств 7 отказов (11%), дефекты монтажа 5 отказов (8%), нарушение сроков обслуживания и ремонта устройств электроснабжения 5 отказов (8%), влияние метеоусловий 4 отказа (6%), влияние посторонних предметов 2 отказа (4%), ошибки персонала 1 отказ (2%) и прочие причины.

Компания ОАО «РЖД» эксплуатирует около 1500 тысяч железобетонных опор. Опоры отличаются большим разнообразием типов и конструкций, продолжительностью в эксплуатации на железной дороге. Это приводит к существенной неопределенности их коррозионного состояния, от которого напрямую зависит несущая способность опоры.

Основные типы железобетонных опор, применяемые на железнодорожном транспорте, представлены ниже. Опоры с ненапряжённой арматурой типа ЖБК (конические) изготавливались в первые годы массовой электрификации по проектам, разработанным Гипропром-трансстроем в 1955 г. и 1957 г. В обоих проектах предусматривалось изготовление опор двух типов: отдельные и нераздельные. Первые устанавливали на блочные бетонные фундаменты (соединение опоры с фундаментом было болтовое). Проектная толщина стенок опор с ненапряжённой арматурой составляла 50 мм. Изготовление предусматривалось из бетона марки 400. Проектная толщина защитного слоя до рабочей арматуры с наружной стороны составляла 17-19 мм, а с внутренней – 18-22 мм. Фиксацию положения арматурного каркаса в опалубочной форме предусматривалось производить с помощью прокладок. Сборка каркасов и навивка спиралей производилась на специальном кондукторе. Монтажные кольца ставились с шагом 750 мм. Их предусматривалось делать из полосы 4x16 мм или круглой стали диаметром 6 мм. Спиральная арматура навивалась с шагом 125 мм. Диаметр продольной арматуры, количество стержней и марка стали определялись в зависимости от требуемой мощности опор [1].

В 1955-1957 годах по проектам, разработанным Гипропром-трансстроем началось изготовление опор с ненапряжённой арматурой типа ЖБК (конические). Не все стержни данного вида опор имели длину равную длине опоры. Только 50 % стержней у опор, изготовленных в 1955 закладывались до конца, а у опор, изготовленных по проекту 1957 года до верха доходили все кроме двух стержней (тяга консоли).

По проектам 1956 г. и 1960 г. были изготовлены опоры УЖБК, ГК с предварительно напряжённой арматурой. Основное отличие опор ЖБК от УЖБК, ГК, что у вторых арматура предварительно растягивалась на станках и после закладывалась в бетон. Арматура находилась в напряжённом состоянии до схватывания бетона.

Опоры типа СЖБК поступили в производство в 1957 г. Отличались они от опор типа УЖБК выбранными материалами и способе изготовления.

В 1966 г. был изобретен новый вид опор СК, отличительной особенностью от других опор являлась большая длина, так же в конструкции опоры использовалась более прочная проволока периодического профиля.

В 1970 г. – производство опор СКУ, с увеличенной толщиной стенки.

В 1976 г. появились опоры типа СКЦ, в которых выше уровня заделки появились 8 вентилируемых отверстий.

В 1983 г. вступил в силу новый стандарт ГОСТ 19330-81 «Стойки железобетонные для опор контактной сети железных дорог. Технические условия». Термин «опора» в новом стандарте изменил смысл (с закладными деталями, консолью и др.), изделие из бетона и стальных прутьев приобрело новое название – «стойка».

В данном стандарте описывались два основным вида стоек:

Тип С – с напряжённой арматурой, использовались на участках железных дорог переменного тока.

Тип СО – с напряжённой арматурой и не напряжённой в фундаменте, использовались на участках дороги постоянного тока.

Стойки типа СС начали применяться в 1993 г. в них использовалось смешанное армирование или ограничение уровня натяжения арматурных стержней (с проволочной напряженной, со стержневой не напряженной по всей длине). В настоящее время изготовление стоек регламентируется ГОСТ [2].

На стойках заводского исполнения должны отсутствовать продольные и поперечные трещины. На поверхности должны отсутствовать пятна ржавчины. Армирование осуществляется по ГОСТ [3].

Для долговечной эксплуатации стоек всех марок и защиты от коррозии арматуры защитный слой бетона до арматуры должен быть не менее 23 мм с погрешностью ± 5 мм.

На рисунке 1.3 представлена схема армирования стоек.

Условное обозначение стоек можно разделить на 3 буквенно-цифровые группы [4]. Первая группа описывает габаритные размеры и тип стойки по исполнению. Вторая группа описывает данные о типе стойки по несущей способности и класс напрягаемой арматуры. Третья группа содержит данные о дополнительной информации.

На рисунке 1.4 представлены основные параметры и размеры стоек типа СС и СП.

В начале пути электрификации в 1960-е гг. применялись экономические методы производства центрифугированных опор с уменьшенным объемом металла. Данные опоры оказались низкого качества и с малым эксплуатационным периодом. Опоры со смешанным армированием оказались более надежными и трещиностойкими.

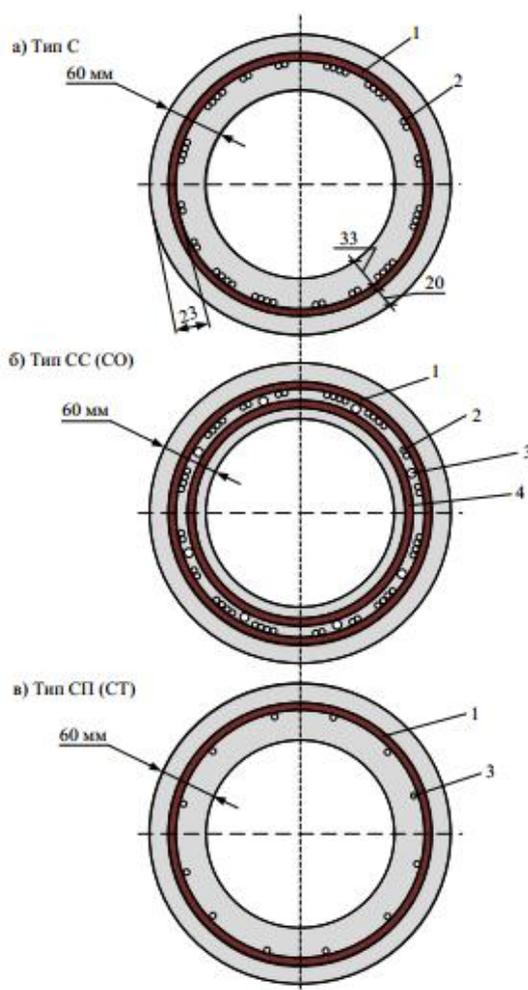


Рисунок 1.3 – Схема армирования различных типов стоек: 1 – спираль; 2 – струны из высокопрочной проволоки; 3 – стержневая арматура; 4 – монтажное кольцо

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.

В условиях существования опасности коррозионного разрушения, эффективность коррозионных обследований становится одним из основных факторов поддержания надежности контактной сети. В итоге приходится проводить целый комплекс измерений и обследований для своевременного выявления дефектных опор контактной сети. Визуальная оценка повреждений арматуры невозможна, поскольку арматура скрыта в слое

бетона. Косвенное определение наличия повреждений арматуры выполняется по деформации бетона. В соответствии с действующей инструкцией по коррозионному обследованию опор контактной сети в первую очередь обследуется подземная часть тех опор, на которых при осмотре надземной части обнаружен выход продуктов коррозии арматуры на поверхность бетона или замечено образование трещин в защитном слое бетона, уходящих в подземную часть.

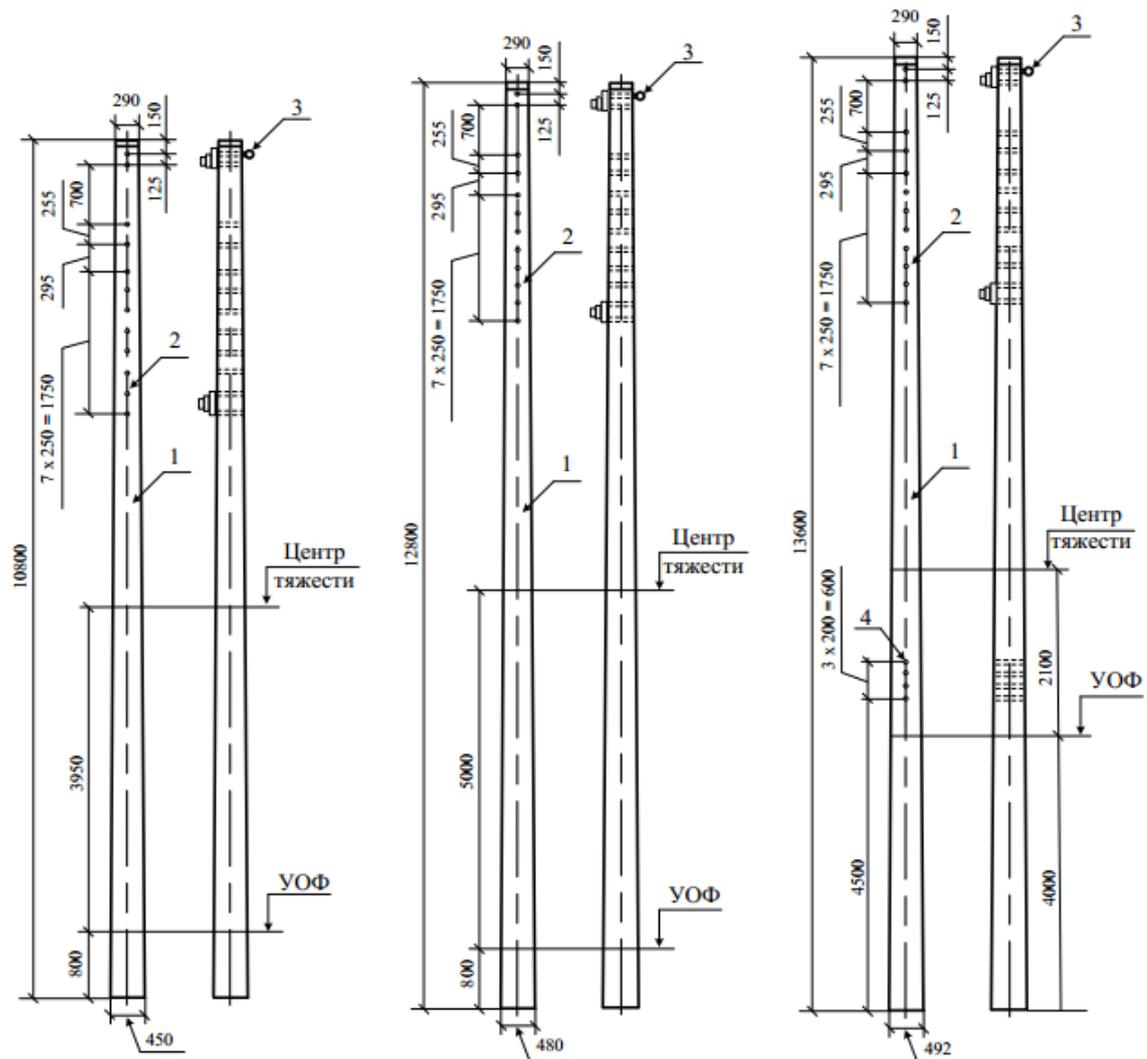


Рисунок 1.4 – Основные размеры центрифугированных стоек СС и СП 1-го типа по исполнению: 1 – стойка; 2 – отверстия для установки закладных изделий; 3 – закладные изделия; 4 – отверстия для вентиляции

Повреждения металлических опорных и поддерживающих конструкций подразделены на четыре основные группы:

- Разрывы из-за механических перегрузок, вызванных ошибками проектирования и монтажа;
- Деформации от наездов, ударов посторонними предметами;
- Хрупкие разрушения при низких температурах, коробление и потеря несущей способности при повышенной температуре;
- Разрушения из-за коррозии.
- Повреждения железобетонных опорных конструкций:
- Коррозия железобетона;
- Электрокоррозионные повреждения, связанные с протеканием тока;
- Механические повреждения (отслаивание бетона, сколы бетона с обнажением арматуры, появление сквозных отверстий в стенке опоры, перенапряжение опоры).

В настоящее время основную часть опорных конструкций контактной сети составляют железобетонные опоры и металлические опоры на железобетонных фундаментах. Рассмотрим диагностику железобетонных конструкций.

Различают два вида диагностики опор: диагностику надземной части и подземной части опор. По результатам диагностики надземной части проводится оценка несущей способности опор, изменение которой должно происходить вследствие старения бетона и уменьшения его прочностных характеристик. Диагностика подземной части опор проводится для оценки состояния проволочной арматуры и уровня снижения несущей способности при электрокоррозии арматуры.

В зависимости от рода тягового тока на электрифицированных участках необходимо проводить следующие виды диагностики:

На участках переменного тока в основном должна проводиться диагностика надземной части. Диагностика подземной части может

проводиться только в исключительных случаях, когда обнаружены коррозионные повреждения бетона в этой части;

На участках постоянного тока обязательно следует проводить диагностику обеих частей опор: надземной и подземной.

Диагностика надземной части опор может проводиться в двух вариантах: она может быть выборочной или сплошной.

Для диагностирования степени электрокоррозии арматуры железобетонных опор применяют методы электрохимический, ультразвуковой, вибрационный, акустический.

1.2 АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Акустической эмиссией (АЭ) называют процесс излучения акустических волн в процессе перестройки структуры материала. Однако не любое изменение структуры приводит к возникновению волн. Так, для появления АЭ необходимо выполнение двух основных условий: – локальности, т.е. ограниченности изменения структуры в пространстве; – динамичности протекающих процессов, при которых переход из одного состояния в другое должен проходить достаточно быстро.

Процесс деформирования различных объектов вызывает образование сигналов АЭ, связанных с ростом дефектов, например, трещин в зонах пластической деформации. Процесс генерации сигналов АЭ и их обнаружение приведено на рис. 1.5. Источник эмиссии вырабатывает сигналы, сопровождающиеся возникновением волн напряжений, которые распространяются в направлении от источника, и достигают преобразователей. По мере увеличения приложенной нагрузки, активизируются многие из имеющихся в материале объекта скрытых дефектов. Акустические сигналы, регистрируемые преобразователями преобразуются в электрические сигналы, усиливаются, регистрируются аппаратурой и подвергаются дальнейшей обработке и интерпретации.

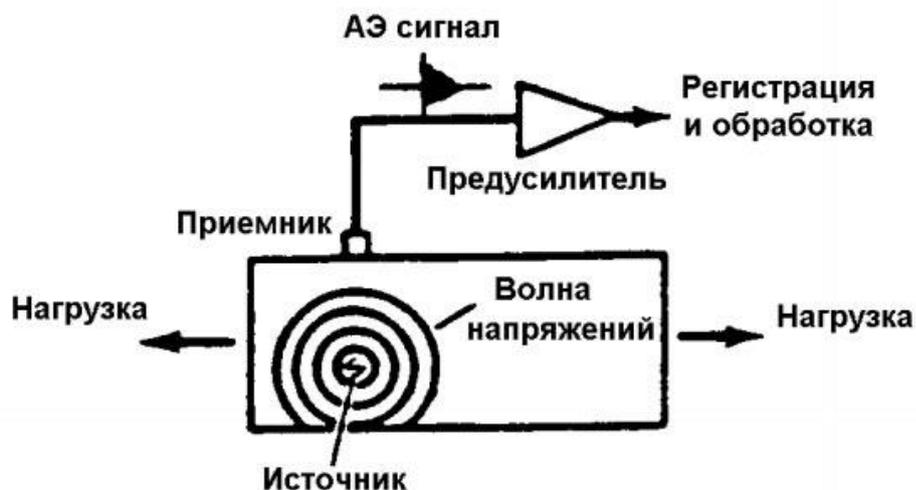


Рисунок 1.5 – Распространение и регистрация акустических сигналов.

Источником акустико-эмиссионной энергии является совокупность упругих напряжений в материале. Эмиссия не возникает без приложенных напряжений, поэтому АЭ контроль проводится путем нагружения объекта испытаний. Чаще всего выполняется проверочный контроль перед запуском объекта, контроль при изменении нагрузки во время работы объекта, испытания на усталость или ползучесть. В производственных условиях конструкция нагружается произвольным способом. В этом случае использование АЭ контроля позволяет получать дополнительную ценную информацию о поведении конструкции под действием нагрузки во время эксплуатации. Так же эмиссию используют в лабораторных условиях; для таких задач разрабатываются специальные процедуры нагружения при испытаниях.

Такой метод является дистанционным, не требует сканирования поверхности объекта обнаружения локальных дефектов. Для проведения контроля необходимо установить заданное число датчиков и интерпретировать сигналы от них для определения координат источника. Преимущества, связанные с дистанционным использованием метода по сравнению с другими методами контроля, заключаются например в отказе от

удаления изоляционных оболочек, освобождения объектов контроля из упаковки, или сканирования больших площадей поверхности.

Пример использования АЭ можно проиллюстрировать в определении местоположения дефектных участков, после чего для уточнения определения координат дефектов используются другие методы неразрушающего контроля.

Акустическая эмиссия наблюдается в различных материалах. Наиболее ярко выраженная АЭ связана с регистрацией сейсмических волн, в то время, как малый уровень эмиссии вызывается дислокационными смещениями в нагруженных металлических материалах. Между этими примерами АЭ лежит широкий диапазон регистрируемых сигналов, от лабораторных испытаний до промышленного применения.

Использование АЭ контроля ставит своей целью изучение процессов деформации и разрушения материала, определения остаточного ресурса. В реальном времени по сигналам эмиссии наблюдается поведение материала при нагружении, изменение акустической активности. Поскольку регистрируемый отклик зависит от структуры материала и режима деформирования, следует, что разные материалы при различных способах нагружения отличаются друг от друга по характеру АЭ поведения. Существует два основных фактора, приводящих к высокой акустической активности – это твердость и неоднородность материала. Вязкие механизмы разрушения, в мягких сталях, напротив, приводят к низкой акустической активности (по амплитуде и числу сигналов).

Акустико-эмиссионная аппаратура является чувствительной к любым видам распространения волн в материальной среде в широком частотном диапазоне (обычно от 30 кГц до 800 кГц). Технические средства способны регистрировать не только рост трещин или развитие пластической деформации, но и процессы затвердевания, кристаллизации, трения, ударов, течеобразования и образования коррозии.

Когда удары, трения, течи и другие дефекты возникают на фоне контроля развития трещин и коррозии, они становятся источниками помех. Предложено множество различных технических решений с целью снижения от подобных шумовых помех. Следует заметить, что шумы являются главной преградой на пути широкого использования АЭ в качестве метода контроля. Одной из основных задач является их исследование и их устранение с целью повышения чувствительности метода [5].

Акустико-эмиссионные испытания проводятся в условиях растущей нагрузки. Начальное приложение нагрузки обычно приводит к возникновению большей эмиссии, чем последующее нагружение. Известен факт, при котором сильно пластические материалы не вызывают никаких сигналов до тех пор, пока не будет превышен порог предыдущей приложенной нагрузки. Такое поведение материалов впервые было отмечено Кайзером еще в середине прошлого века, и оказало огромное влияние на развитие методики АЭ контроля. Было показано, что материалы, для которых должен выполняться эффект Кайзера, появление эмиссии при приложении повторной нагрузки до достижения предыдущего уровня нагрузки соответствует наличию дефекта, проявляющегося между начальной и последующей приложенной нагрузкой. Такой вывод послужил основой для концепции промышленного использования метода АЭ в 80-х годах, когда были впервые проведены АЭ испытания сосудов давления [5].

В некоторых разработках АЭ испытаний большое внимание уделяется наличию эмиссии при повторных нагрузках, а также наличию эмиссии в период выдержки. Алгоритм анализа заключается в том, что такое поведение должно свидетельствовать о существовании макроскопических дефектов в конструкции, в то время как в отсутствие дефектов при выдержке должна происходить ослабление напряжений и через определенное время выдержки материал должен «затихать»; пока повторное нагружение не превысит предыдущий максимальный уровень нагрузки.

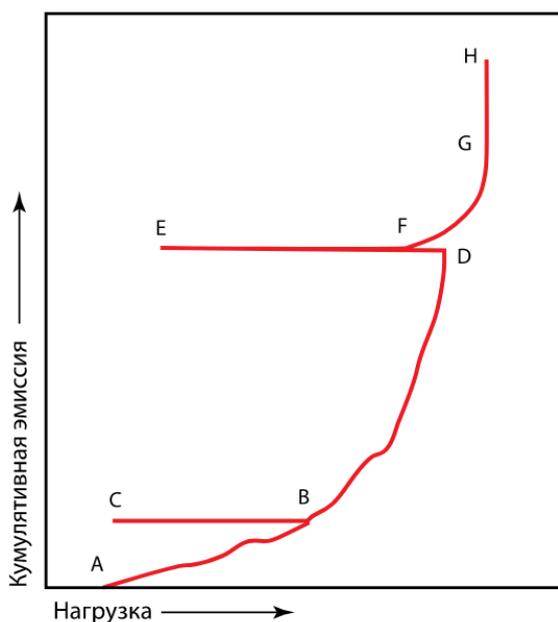
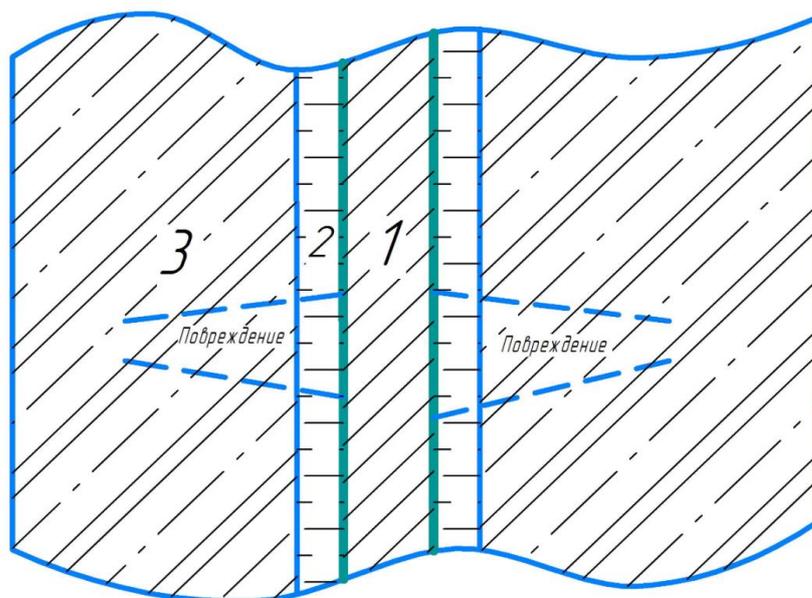


Рисунок 1.6 – График появления эмиссии в момент выдержки

График появления эмиссии от нагрузки показывает различные типы поведения материалов, как показано на рисунке 1.7. При начальном нагружении (от А до точки В) наблюдается акустический сигнал, который, однако отсутствует при разгрузке (от В к С). При последующем нагружении эмиссия не возникает до тех пор, пока вновь не дойдет до точки В; что иллюстрирует проявление эффекта Кайзера. Далее нагрузка растет до D, при этом отмечается генерация акустических сигналов, после чего производится разгрузка. Благодаря высоким уровням нагрузки в точке F (до предыдущей максимальной нагрузки) начинают определяться значительные дефекты, имеющиеся в материале. В случае неравномерного расположения нагрузки при получении акустических сигналов, опора получит дополнительное скручивающее усилие, что приведет к дополнительным помехам и сложностям определения полезных сигналов, связанных с трением внутри опоры песко-бетонной смеси и дополнительных нагрузок на опору, что в свою очередь может привести к разрушению конструкции.



1 – арматура; 2 – водо-воздушная среда; 3 – бетон

Рисунок 1.7 – Железобетонная опора контактной сети с повреждениями.

Железобетонная опора контактной сети состоит из различных материалов: песок, щебень, цемент, стальная арматура, так же в межслоевом пространстве присутствует воздушная и водная среда. Все это препятствует распространению полезного акустического сигнала (преломление и отражение), при его движении внутри опоры и прохождении границ раздела сред. С возможностью полной потери полезного акустического сигнала.

Основным недостатком, ограничивающим широкое распространение метода, является сложность расшифровки результатов контроля, обусловленная тем, что на волновой процесс акустической эмиссии накладываются паразитные акустические параметры многократно отраженных волн, шумов от работы машин, нагружающего тела и окружающей среды. Применение фильтров и систем защиты только частично снижает влияние этого воздействия. Уникальность оборудования и отсутствие его промышленного изготовления не позволяют распространить метод дальше сферы экспериментального применения.

Существует множество методов неразрушающего контроля для диагностики опор контактной сети. Метод акустической эмиссии не получил широкого распространения по причине основного недостатка – наличия шума.

Удаление шумов и помех описываются как правило, простейшими разновидностями амплитудных и частотных фильтров. Сложность распознавания результатов акустического контроля, обусловленная тем, что на волновой процесс накладываются параметры многократно отраженных волн. Применение фильтров и систем защиты частично снижает это воздействие. Для получения более корректных результатов диагностики можно использовать другие методы неразрушающего контроля: электрохимический или ультразвуковой [7-10].

Ультразвуковые приборы УК-1401(УК-14ПМ) применяются для измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых материалах при испытании на заданной длине с целью определения прочности железобетонных опор контактной сети. Заданная длина или база прозвучивания составляет 150 мм, а диапазон измерения времени от 15 до 70 мкс; шаг измерения времени составляет 0,1 мкс; диапазон измерений скорости звука от 2150 до 9900 м/с. Обычно выполняют два измерения продольное и поперечное относительно габаритов опоры.

Определение прочности бетона по скорости распространения ультразвука согласно ГОСТ 17624-87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности». Выполняются следующие процедуры:

- Оценка несущей способности бетонных опор и столбов из центрифугированного бетона через отношение скоростей распространения ультразвука в направлениях вдоль и поперек опоры;
- Поиск приповерхностных дефектов в бетонных сооружениях по аномальному уменьшению скорости или увеличению времени распространения ультразвука в дефектном месте по сравнению с областями без дефектов;
- Оценка сходства или различия упругих свойств материалов или образцов одного материала друг от друга, а также возраста материала при условии изменения его свойств от времени.

Принят следующий порядок измерений:

- Осмотр наружной поверхности опоры, установление имеющихся повреждений, их количества и расположения;

- Определение участков измерения. Число этих участков зависит от типа стойки и степени ее повреждения. Для стоек типа СЖБК, не имеющих отверстий в вершинной части, необходимо не менее двух измерений на высоте от 1,2 до 1,5 м от поверхности земли. В зоне ниже пяты консоли на расстоянии от 0,5 до 0,7 м. Для других типов стоек (типа СК), имеющих отверстия в вершинной части, достаточно одного участка в нижней части опоры;

Измерений должны выполняться в сжатой зоне конструкции, расположенной со стороны пути или в плоскости наибольшего изгибающего момента;

Обязательным является проведение измерений в зоне сетки трещин независимо от места его расположения над землей;

При наличии продольных трещин измерения проводятся между такими трещинами;

В зоне ультразвуковых преобразователей на поверхности бетона не должно быть раковин, выбоин и воздушных пор глубиной больше 3 мм и диаметром больше 6 мм.

Области измерений должны быть очищены от грязи, краски, пыли;

Измерения выполняют, начиная с нижней части опоры;

Измерения необходимо производить в сухую погоду при температуре не ниже +5 °С;

Измерительный преобразователь прикладывается к поверхности бетона с усилием не менее 4 кгс;

Откопку опоры для проведения измерений и определения времени распространения ультразвука проводят до глубины 0,5-0,7 м от поверхности грунта.

Недостаток данного метода – трудоемкий процесс диагностирования подземной части железобетонной опоры за счет ее откопки на 0,5-0,7 м. [7-18].

1.3 СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Одним из перспективных методов диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор в полевых условиях является спектральный анализ материалов. Метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) и комбинационного рассеяния света (КРС), такие методы можно реализовать при помощи портативных приборов с применением оптоволоконных линий доставки излучения [20].

Различием таких методов является то, что в отличие от лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) от приборов спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС) основаны не на атомарной спектроскопии, а на молекулярной. В молекулярной спектроскопии комбинационного рассеяния наблюдаются вибрационные состояния молекул (фотонов) [21]. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия является разновидностью атомно-эмиссионного спектрального анализа, в которой источником возбуждения плазмы является лазер, например Nd: Y A G лазер. Принципиальная возможность изменений с помощью ЛИЭС структуры строительных материалов усложняется из-за коррозии, вызванной атмосферными воздействиями, была продемонстрирована немецкими исследователями. [22-24].

Особенность методов заключается в том, что лазерное излучение, необходимое для возбуждения плазмы, передается к поверхности объекта исследования при помощи оптического канала. Импульс лазерного излучения взаимодействует с поверхностью бетона, содержащей продукты коррозии арматуры. Образуется облако разогретой плазмы, которая отражается и передается обратно в блок спектрометра. Отраженный свет в спектрометре разлагается в линейчатый спектр, далее информация о количественном содержании продуктов коррозии обрабатывается при помощи программного обеспечения персонального компьютера (ПК).

Преимущества метода спектрального анализа:

- точность и простота;
- результаты не только качественные, но и количественные;
- реализация метода в полевых условиях;
- определения остаточной несущей способности железобетонной опоры по концентрации продуктов коррозии на ее поверхности;
- определение коррозионного состояния подземной части железобетонных опор без их откопки;
- метод является практически неразрушающим, после измерений остается незначительное пятно прожога.

К недостаткам метода можно отнести трудность при использовании в полевых условиях и сложность конструкции зонда при доставке излучения к исследуемой поверхности.

1.4 ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Электрохимические методы определения коррозионного состояния позволяют получить информацию о арматуре в надземной и в подземной частях опоры.

Сущность метода заключается в воздействии на арматуру импульсом постоянного тока в течение заданного времени по цепи «арматура – земля – рельс» и анализе длительности переходного процесса потенциала после прохождения импульса. На рисунке 1.8, представлена схема эксперимента. На арматуру подаются импульсы тока от 0,5 до 2 А (в зависимости от типа опоры) в течение 60 секунд, а затем отключают источник и регистрируют уменьшение потенциала, далее изменяют полярность тока и повторяют указанную процедуру. Подключение прибора к металлическому каркасу производят в надземной части через специально встроенный диагностический провод или, пробив отверстия в защитном слое бетона и

обнажив арматуру. Измерения потенциала осуществляют относительно медносульфатного электрода сравнения, устанавливаемого на грунт вблизи опоры.

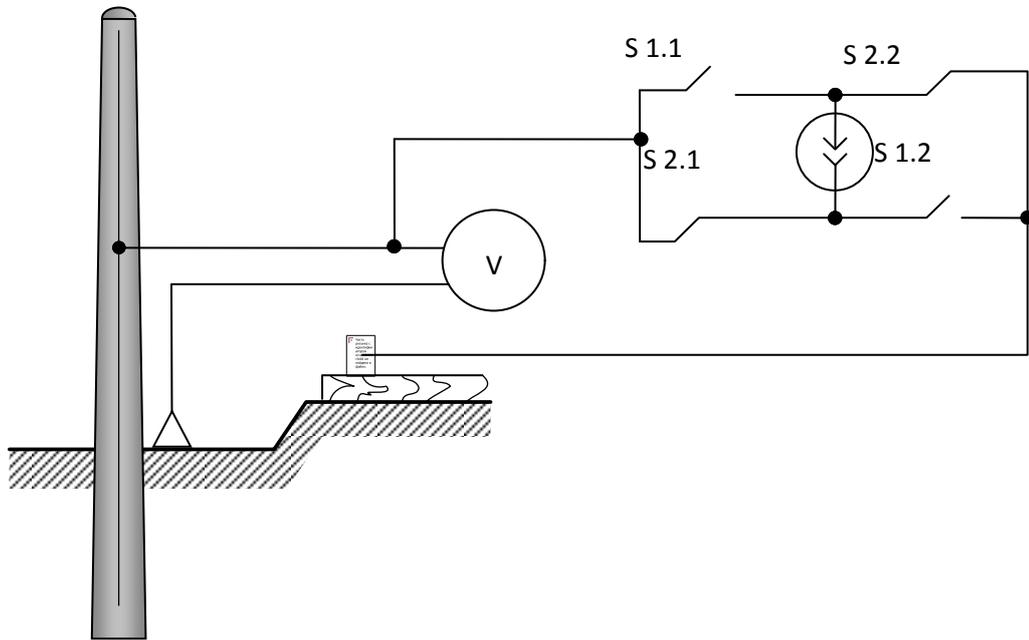


Рисунок 1.8 – Схема измерений

На рисунке 1.9 показано изменение потенциала арматуры во время и после поляризации. В качестве показателя коррозионного состояния подземной части в методе используется так называемый суммарный потенциал $\Delta\phi$, равный сумме $\Delta\phi_{t+}$ и $\Delta\phi_{t-}$. При этом $\Delta\phi_{t+}$ измеряют через 10 с. после отключения источника положительной, а $\Delta\phi_{t-}$ – через 10 с. после отключения источника отрицательной поляризации.[25]

Сущность метода анодной поляризации заключается в воздействии на арматуру железобетонной опоры постоянным током плотностью от 3 до 6 мА/дм² и последующей регистрации изменения потенциала арматуры ϕ . Измеряемым параметром является время достижения указанного потенциала (ϕ) определенного порога, отвечающего началу коррозионного процесса. Такой порог может составлять 0,6 – 0,7 В в зависимости от ряда внешних условий (влажность, температура, содержание кислорода в почве) [7].

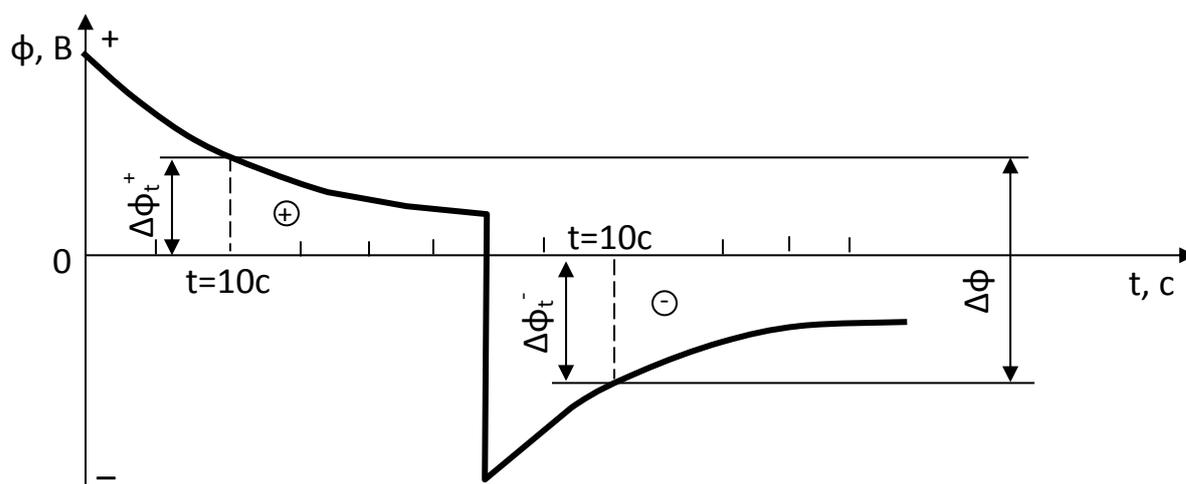


Рисунок 1.9 – Диаграмма изменения потенциала арматуры при ее испытаниях

Время, необходимое для установления порогового значения, при заданных температурно-влажностных условиях, и марках стали, бетона, подчиняются выражению:

$$t = \frac{A}{i^2} \quad (1.1)$$

где A – постоянный коэффициент; i – плотность анодного тока.

Если арматура корродирует, в подземной части опоры имеются как поврежденные (активированные), так и не поврежденные (пассивные) зоны с различными плотностями токов утечки.

Непосредственное измерение плотности тока затруднительно, тогда в методе анодной поляризации используется такой параметр, как длительность переходного процесса, который заключается в постепенном росте потенциала «арматура – грунт». При лабораторной анодной поляризации двух однотипных опор с одним и тем же током, потенциал «арматура – грунт» будет достигать нормированного значения от 0,6 до 0,8 В и тем дольше, чем больше коррозия. При значительной площади корродированных участков указанные значения потенциала не достигаются, так как эти участки не поляризуются, а ток пассивных участков мал для возникновения реакции выделения кислорода.

Электрохимический метод реализован в аппаратуре АДО-1, АДО-2М. Комплект аппаратуры включает в себя блоки поляризации и измерения.

Достоинством предлагаемого метода является то, что, он позволяет с достаточной точностью определить емкость границы раздела «арматура-бетон» в исследуемом объекте.

К недостаткам метода следует отнести временную нестабильность при изменении параметров в процессе эксплуатации, а также необходимость доступа к металлической части арматуры при испытаниях. [26-28, 111, 118].

1.4 ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Визуальный метод осмотра надземной части опор является необходимым эксплуатации и контроле опор. Он является наименее трудоемким при оценке фактического состояния конструкций, не требует сложной дорогостоящей аппаратуры. Однако такой метод не дает достоверных и надежных результатов без компьютерной обработки.

Обследование подземной части опор производится на глубину до 1 м от уровня грунта, при обнаружении повреждений в подземной части, глубину откопки увеличивают. Для обеспечения устойчивости опор в этих случаях устанавливают оттяжки. Большое внимание уделяется на состояние надземной части на уровне поверхности грунта. Уходящие в грунт трещины, отслоение бетона, выход продуктов коррозии на поверхность, потеря им твердости и глухой звук при простукивании указывают на возможность коррозионных повреждений опор, такие опоры обследуются более тщательно с откопкой на глубину от 0,8 до 1,2 м. Такой метод является малоэффективным по причине высокой трудоемкости, что является большим недостатком его внедрения. Небольшие размеры трещин, или их отсутствие затрудняют визуальный осмотр, поэтому на практике используют сопутствующие признаки коррозии: – глухой звук при постукивании, бурые пятна на поверхности опоры.

Основным недостатком описанного метода является высокая трудоемкость диагностики подземной части опор при необходимости

откопки и фиксации опоры. Тогда обследование подземной части опоры выполняется только при наличии дефектов явно присутствующих в надземной части. Это снижает достоверность полученных результатов, поскольку повреждения в подземной части опоры слабо коррелируют с присутствием повреждений в надземной части.

Определение коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети, основанное на визуальном обследовании подземной части железобетонной опоры, при помощи видеоэндоскопической системы повышает достоверность контроля.

Для определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор линий электропередач и контактной сети, содержащем визуальное обследование подземной части железобетонной опоры, через вентиляционное отверстие внутрь опоры помещают видеоэндоскопический зонд. При этом с помощью системы освещения обеспечивают необходимый уровень освещенности внутренней поверхности опоры, система управления эндоскопом перемещает его таким образом, чтобы обследовать всю внутреннюю поверхность опоры от поверхности грунта до основания опоры. Видеоинформация о состоянии внутренней поверхности выводится на экран оператору, и передает данные в систему обработки изображений для автоматического распознавания дефектов и определения их размеров, и размеру трещин, бурых пятен на внутренней поверхности опоры. По этим признакам судят о коррозионном состоянии подземной части железобетонной опоры.

Недостатком данного метода являлось низкое качество изображения, потеря его резкости, обусловленные отсутствием элементов стабилизации положения видеоэндоскопической системы, в результате чего возникали колебания длинного оптического зонда при его перемещении в вертикальном направлении для обследования внутренней поверхности полый железобетонной опоры. Кроме того, не предусмотрена регистрация расстояния, на которое перемещается зонд видеоэндоскопической системы [29-33].

Дальнейшее развитие визуальных методов должно быть связано с автоматизацией управления оптического зонда, регистрации координат зарегистрированных изображений и выявленных дефектов, обработка изображений с целью измерения геометрических параметров дефектов, а также оценка степени развития коррозии по анализу их количества на поверхности бетона.

1.6 ВЫВОДЫ

1. Исследована статистика состояния железобетонных опор контактной сети железных дорог постоянного тока. Показаны технические средства и методы диагностирования их электрокоррозионного состояния.

2. Показана структура железобетонной опоры с геометрическими размерами, положением армирующих элементов, что важно знать при описании физических процессов, вызывающих коррозию и последующей разработке эффективных средств диагностирования.

3. Показаны достоинства и недостатки основных применяемых средств технического диагностирования (ультразвуковые, вибрационные, визуальные, акустической эмиссии, электрохимические), применяемые на железных дорогах и перспективные методы (спектрального анализа, в том числе лазерные, автоматизированные системы контроля и диагностирования).

4. Приведены направления дальнейшего развития методов диагностирования, основанных на визуальном контроле. Повышение достоверности диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор должно быть связано с автоматизацией управления оптического зонда, регистрацией координат зарегистрированных изображений и выявленных дефектов, обработкой изображений с целью измерения геометрических параметров дефектов, а также оценки степени развития коррозии по анализу количества продуктов коррозии на поверхности.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТОКОВ УТЕЧКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

2.1 СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ ВЫЗВАННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ В ИЗОЛЯТОРАХ

Основные причины выхода из строя изолирующих элементов: не качественное производство изоляторов тарельчатого типа из фарфора, применяемых на контактной сети железных дорог; монтаж изоляторов в устройствах электроснабжения без испытаний; несвоевременные дефектировка и замена дефектных изоляторов, также является одной из причин их повреждения. Грозовые перенапряжения, несоосность пестика и шапки, высокая механическая нагрузка изоляторов в узлах анкеровки контактной подвески тоже являются причинами повреждения изолирующих элементов. На рост повреждения изоляторов оказывают влияние различные факторы: частая и продолжительная вибрация; запылённость окружающей среды от проходящего подвижного состава и промышленных предприятия, расположенные вблизи железной дороги; не правильная транспортировка, выгрузка и хранение; несоответствие числа изоляторов в гирлянде степени загрязнённости атмосферы или нормативной особенности пути тока утечки; коррозия пестика на участках железной дороги постоянного тока; старение изоляторов и другие факторы [35, 49, 50, 51, 52, 53].

Основные виды повреждений в изоляторах: перекрытия по поверхности; вырыв пестика из заделки; механическое разрушение; появление под шапкой микротрещин от воздействия солнца: пробои; перекрытия птицами, зверьками; набросы и другие [54-57].

Проанализировав отказы в узлах изоляции в течение суток, большее количество отказов происходит в дневное время, то есть когда осуществляется повышение температуры от солнца, а затем охлаждение

материалов изолятора, имеющих различные коэффициенты линейного расширения [56, 57, 51, 52]. Согласно опытной эксплуатации, срок безаварийной работы стержневого и подвесного фарфорового изолятора составляет около 15-21 года, после чего требуется замена, в связи со снижением механической прочности фарфора, что приводит к изломам изолятора.

В случае нарушения технологии при сборке изолирующего элемента и металлической арматуры, наличие механических ударов, образуются сколы фарфора и микротрещины под шапкой изолятора. В результате образования микротрещин, в них попадает влага, что в свою очередь ведет к повышению токов утечки. Снижается электрическая прочность фарфора и происходит пробой или перекрытие одного, или всей гирлянды изоляторов [54-57, 51-55, 58-60].

Одна из основных возможных причин разрушения стеклянных изоляторов – поверхностные частичные разряды (ПЧР). Причиной возникновения разрушений может быть загрязнение и увлажнение поверхности изолятора. Изолятор разрушается в результате воздействия на него механических напряжений, нагрева стекла током ПЧР до пластического состояния и охлаждения. В большинстве случаев ПЧР зажимаются на границе сухого и влажного слоев загрязнения, т.е. в областях с максимальной напряженностью электрического поля [54-57].

Причины выхода из строя секционных изоляторов: повреждение изоляционных свойств вставки; излом изоляторов в месте заделки его в оконцеватель; перекрытия изолятора в несущем тросе из-за отсутствия нейтральной вставки; нарушение регулировки скользунов для прохода полоза токоприемника ЭПС.

Причины выхода из строя стержневых изоляторов: не высокая механическая прочность при ударных нагрузках; быстрое старение при низких температурах окружающего воздуха; несовершенство конструкций, фиксирующих узлов; нарушение норм содержания; другие случаи, которые

не связаны с эксплуатацией. Стержневые изоляторы имеют низкую механическую прочность, что приводит к их разрушению при заземлении или ударных нагрузках. При длительной эксплуатации некоторых изоляторов происходит снижение их механической прочности из-за возникновения напряжений в месте соединения фарфора, цементной заделки и металлической арматуры из-за различных коэффициентов температурного расширения этих материалов. В результате в фарфоре появляются трещины, которые со временем становятся все больше и снижают общую механическую прочность изолятора. Максимальное снижение прочности наблюдается при низких температурах. Изоляторы теряют свою прочность из-за постоянных ударных нагрузок, которые возникают в процессе эксплуатации. В результате таких нагрузок на поверхности фарфоровых изоляторов могут появляться скрытые трещины, которые со временем только увеличиваются [54].

Однако самым опасным случаем повреждения изолятора является его полное повреждение и утрата изоляционных свойств. Это приводит к короткому замыканию и выводу контактной сети из эксплуатации. Из теории известно, что при наличии достаточно сильного электрического поля между двумя электродами, разделенными изолятором, на поверхности или внутри изолятора образуется электропроводный слой, в рамках которого возникает и развивается электрический разряд, иначе называемый стримером [54-57]. Возникновение и развитие разряда сопровождается генерацией колебаний в широком диапазоне частот (в инфракрасном, т. е. тепловом, звуковом, ультразвуковом диапазонах частот, в видимом спектре и в широком диапазоне радиочастот). Отсюда очевидно, что приемная часть устройства диагностики должна обнаруживать то или иное из перечисленных следствий образования и развития стримера. Возникновение и развитие разряда сопровождаются генерацией осцилляций в широком диапазоне частот: от инфракрасных до ультразвуковых, а также в видимом спектре и в области радиочастот. Исходя из этого, ясно, что детектор, используемый для

диагностики, должен способен обнаруживать одно или несколько из этих проявлений, возникающих в результате образования и развития стримера.

Известно, что ионизация воздуха и образование поверхностных частичных разрядов (ПЧР) могут произойти, например, при фотоионизации. Чтобы воздействие излучения привело к ионизации воздуха, должно выполняться условие: При фотоионизации происходит ионизация воздуха и образование ПЧР. Излучение приводит к ионизации при условии:

$$\lambda \leq \frac{c \cdot h}{W_u}, \quad (2.1)$$

где c — скорость света; λ — длина волны излучения; h — постоянная Планка ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); W_u — энергия ионизации [54].

Согласно формуле 2.1, длина волны излучения будет равна, $\lambda \approx 10^{-7}$ м. Даная длина волны лежит на границе ультрафиолетового и рентгеновского излучений, видимый же свет не может привести к ионизации воздуха.

Тепловое воздействие, а именно термическая ионизация, также может привести к образованию проводящего слоя на поверхности изолятора. Однако вероятность термической ионизации воздуха при температуре 20 °С крайне мала. Степень ионизации воздуха, то есть отношение количества ионизированных частиц к общему их числу в единице объема при температуре 10 000 К, составляет всего лишь 0,02 [54, 56]. Поэтому при такой низкой степени ионизации термическая ионизация невозможна. Для образования электропроводного слоя с помощью электростатической эмиссии требуется внешнее электрическое поле с напряженностью в 1000 кВ/см, что на практике наблюдаться не может [54, 56]. Поэтому этот вид эмиссии отсутствует в изоляционных конструкциях контактной сети.

Существует еще один вид ионизации, способный привести к формированию проводящего канала – ударная ионизация. Энергия частицы, движущейся в электрическом поле зависит от:

$$W = q \cdot E \cdot x, \quad (2.2)$$

где q – заряд частицы; E – напряженность электрического поля; x – путь, пройденный частицей перед столкновением [54].

Подставив значение W в условие ионизации ($W \geq W_{и}$) и учитывая, что $W_{и} = qU_{и}$, где $U_{и}$ – потенциал ионизации, который лежит в пределах 10 – 25 В, получим соотношение для $x_{и}$:

$$x_{и} \leq \frac{U_{и}}{E}. \quad (2.3)$$

Таким образом, при потенциале ионизации $U_{и} \approx 15$ В и при напряженности поля $E = 25 \cdot 10^3$ В/см:

$$x_{и} = \frac{15}{25 \cdot 10^3} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}. \quad (2.4)$$

Напряженность электрического поля в реальных конструкциях оказывается значительно меньше по сравнению с теоретическими значениями. Причина заключается в том, что пути утечки электричества у таких конструкций обычно длиннее и варьируются от 255 до 500 мм в зависимости от типов изоляторов. Исходя из этого, напряженности поля составляют соответственно 1,96 и 1,04 кВ/см, а длины пробега частицы до момента столкновения и ионизации равны 0,007 и 0,01 см.

Если рассмотреть длину свободного пробега электрона в воздухе в условиях нормального давления и температуры, то она составляет приблизительно 10–5 м. Из этого можно предположить, что при данных условиях ударной ионизации воздуха не происходит. Заметное ионизирование, которое имеет существенное значение в процессе формирования самостоятельного разряда электричества, происходит только при напряженностях электрического поля, превышающих 30 кВ/см.

Возникновение поверхностных частичных разрядов (ПЧР) на изоляторах более вероятно в случае исправных изоляторов, так как напряжение на дефектных изоляторах значительно ниже. Если изоляторы

или гирлянда изоляторов имеют дефекты, достаточные для образования электропроводного слоя под воздействием приложенного напряжения, то на поверхности или внутри изоляторов происходит возникновение частичных поверхностных разрядов [61, 62].

Однако на практике может возникнуть ситуация, когда в гирлянде из четырех подвесных изоляторов один или даже два из них являются "нулевыми" изоляторами, тогда как остальные изоляторы способны выдерживать приложенное напряжение. В этом случае поверхностный разряд не возникает. Для участков с постоянным током методы определения ПЧР не распространены из-за сложностей выявления разрядных эффектов. Таким образом, разработка эффективных методов дистанционной диагностики на участках с постоянным током остается актуальной [63, 64].

2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЧАСТКА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Создание теории дистанционного диагностирования изоляторов на участке контактной сети постоянного тока требует тщательного учета всех характеристик данного участка и особенностей его конструкции. При рассмотрении контактной сети постоянного тока с изолирующими элементами, ее можно представить в виде линии с распределенными параметрами [65-67]. На рисунке 2.1 приведена схема замещения.

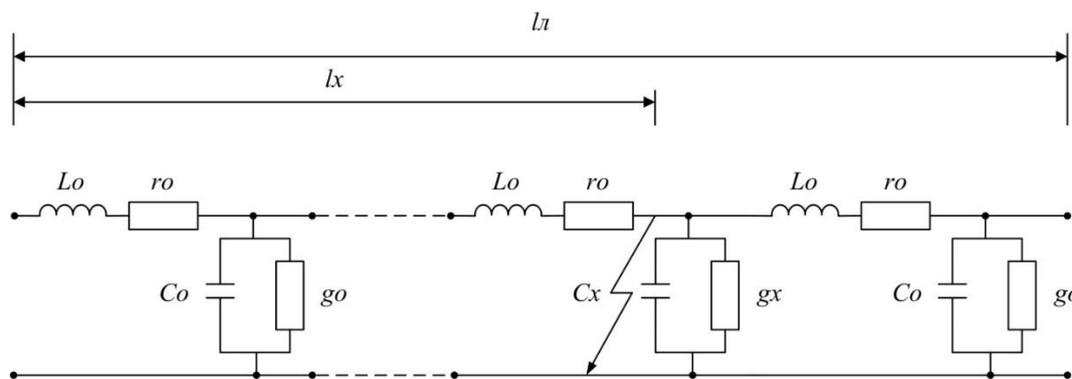


Рисунок 2.1 – Схема замещения контактной сети

На данной схеме представлены следующие параметры:

$L_{д}$ – длина линии;

L_x – расстояние до места повреждения;

L_0, r_0, C_0, g_0 – первичные параметры линии;

C_x, g_x – параметры поврежденной гирлянды изоляторов.

Величины напряжений и токов в каждом отрезке линии зависят не только от момента времени, но и от его координаты. Линии, имеющие распределенные параметры, представляются в расчетах с учетом количества активного сопротивления проводов r_0 на единицу длины, их индуктивности L_0 , емкости проводов C_0 и активной проводимости изоляции g_0 [65].

В некоторых практических случаях можно не учитывать некоторые первичные параметры. Например, для короткого отрезка линии с работающей изоляцией практически всегда достаточно предположить $g_0=0$. Схема замещения участка линии бесконечно малой длины dx приведена на рисунке 2.2.

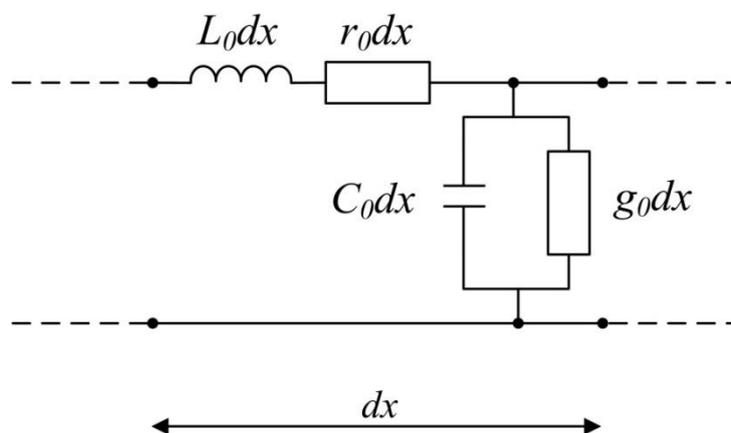


Рисунок 2.2 – Схема замещения участка линии

Параметры электромагнитной волны в линии связаны ее волновыми параметрами – волновым сопротивлением Z_B и коэффициентом распространения волны γ . Волновое сопротивление показывает отношение напряжения $\dot{U}_B(x)$ и тока $\dot{I}_B(x)$ бегущей волны в любом сечении линии с координатой x и определяется первичными параметрами [65]:

$$\underline{Z}_B = \frac{\dot{U}_B(x)}{\dot{I}_B(x)} = \sqrt{\frac{R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0}{g_0 + j \cdot \omega \cdot C_0}}, \quad (2.5)$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – циклическая частота волны, рад/с; f – частота волны, Гц.

Коэффициент распространения волны показывает в логарифмических единицах изменение величины напряжения бегущей волны, а также его фазовый сдвиг на единицу длины линии:

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta = \ln \frac{\dot{U}_B(x)}{\dot{U}_B(x+1)} = \sqrt{(R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0) \cdot (g_0 + j \cdot \omega \cdot C_0)}, \quad (2.6)$$

где α – коэффициент ослабления линии на единицу длины для бегущей волны, Нп/м; β – коэффициент фазы линии на единицу длины для бегущей волны, рад/м.

Волновые параметры можно определить экспериментально по результатам измерения входного сопротивления линии при холостом ходе \underline{Z}_X и коротком замыкании \underline{Z}_K на ее выходе [65, 66]:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{Z}_K \cdot \underline{Z}_X}, \quad (2.7)$$

$$\text{или } th(\gamma l) = \sqrt{\frac{\underline{Z}_K}{\underline{Z}_X}}. \quad (2.8)$$

Для определения $\gamma = \alpha + j \cdot \beta$ можно применить выражение:

$$e^{2\gamma l} = e^{2\alpha l} \cdot e^{j2\beta l} = \frac{1 + th(\gamma l)}{1 - th(\gamma l)} = \frac{\sqrt{\underline{Z}_X} + \sqrt{\underline{Z}_K}}{\sqrt{\underline{Z}_X} - \sqrt{\underline{Z}_K}} = M \cdot e^{j\varphi}, \quad (2.9)$$

где M – модуль комплексного числа; φ – аргумент комплексного числа, рад.

Тогда коэффициенты ослабления и фазы на единицу длины:

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot l} \ln M \quad (2.10), \quad \beta = \frac{\varphi + 2 \cdot \pi \cdot n}{2 \cdot l} \quad (2.11),$$

где n – целое число полувольт на длине линии.

Зная приближенно фазовую скорость v_ϕ волны в линии на частоте f , определяют приближенно число полувольт на длине линии $n' = \frac{2 \cdot l \cdot f}{v_\phi}$, которое округляют до ближайшего целого числа n .

Первичные параметры определяются из совместного решения уравнений 2.5 и 2.11:

$$R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0 = \gamma \cdot \underline{Z}_B, \quad (2.12)$$

$$g_0 + j \cdot \omega \cdot C_0 = \frac{\gamma}{\underline{Z}_B}. \quad (2.13)$$

Таким образом, можно определить неизвестные параметры участка контактной сети расчетным методом. Но данный расчет справедлив для участка с однородной распределенной нагрузкой по всей длине линии. В реальных же условиях, все участки контактной сети неоднородны и имеют отличные друг от друга параметры. На основе рассмотренных выражений можно провести исследование изменения свойств изоляторов, разделяющих опоры с контактной сетью [68].

2.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОГРАММЕ MULTISIM

При моделировании возникновения токов утечки в изолирующих элементах и определения значений сопротивления в элементах схемы замещения было использовано соответствующее программное обеспечение [69]. Создание виртуальной модели схемы замещения устройства [70] и последующего сопоставления с данными эксперимента [64, 71] использовалась программа Multisim. Схема замещения устройства контроля параметров изоляции, в программе Multisim [72-74], показана на рисунке 2.3. Источник испытательного напряжения НВ вырабатывает прямоугольные импульсы с амплитудой 1000 В. Генератор прямоугольных импульсов вырабатывает сигнал прямоугольной формы частотой 1 Гц, который при помощи умножителя напряжения повышается до нужного уровня. Выход I01 подключается к контактной сети. Выход I02 соединен с рельсом. Изолирующие элементы, установленные на опорах, предотвращают прохождение тока по железобетонной опоре, однако со временем возникают токи утечки, которые влияют на ускорение процесса коррозии.

При моделировании выбраны воздействующие сигналы прямоугольной формы, поскольку они представляются бесконечной суммой гармонических

составляющих. В этом случае, изоляцию железобетонных опор можно представить комплексным сопротивлением, тогда каждая из составляющих гармоник испытательного напряжения будет по-разному влиять на форму выходного сигнала. Схема эксперимента, реализованная в программе Multisim, показана на рисунке 2.3. Входное напряжение с выхода прибора IO1 подается в контактную сеть, и соответственно на изолирующие элементы. Гирлянды изоляторов представлены параллельным соединением элементов C9, R7 и C5, R3. На схеме представлены три опоры соединенные участком контактной сети длиной 50 м и элементом длинной линии W. Сигнал регистрируется осциллографом XSC1.

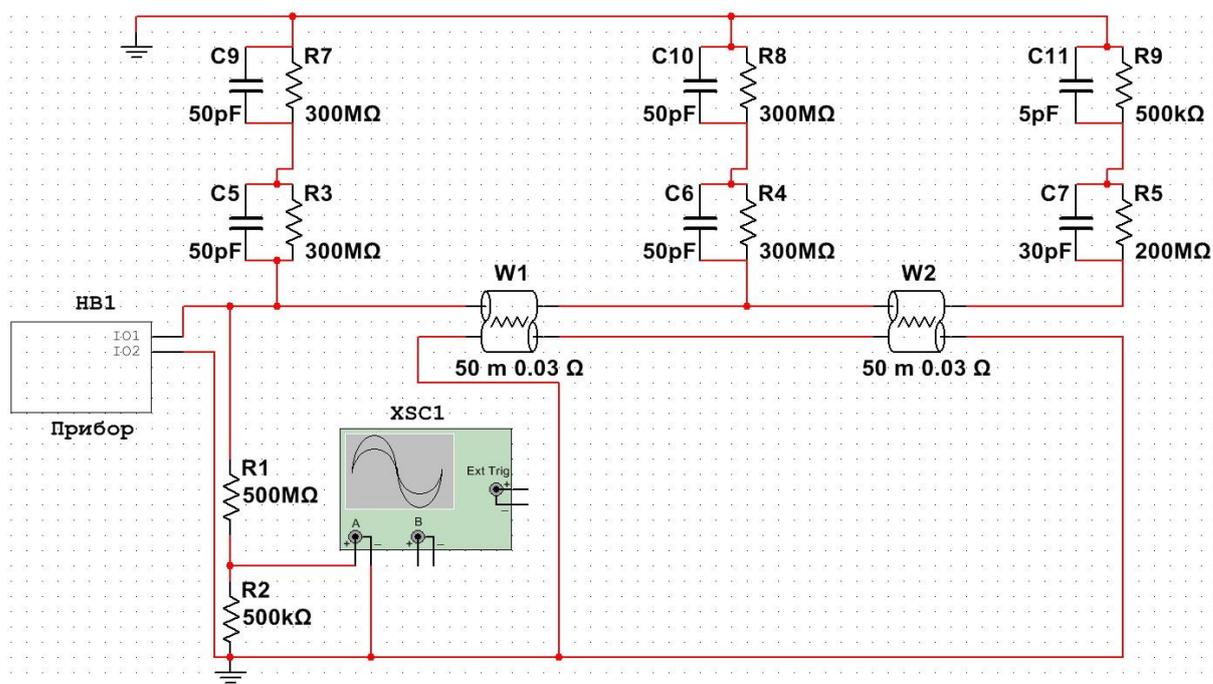


Рисунок 2.3 – Исследование токов утечки изоляторов на опорах в среде Multisim

В модели рассмотрены три смежных опоры, на каждой из которых моделировались параметры дефектных изоляторов. Отдельно был рассмотрен случай, когда верхний (ближайший к консоли) изолятор неисправен, а нижний только начинает терять свои диэлектрические свойства (гирлянда C11, R9, C7, R5 на рисунке 2.3). Сопротивление нижнего изолятора составляет 500 кОм, емкость 5 пФ; сопротивления верхнего

изолятора – 200 МОм и емкость 30 пФ. Параметры длинной линии составляли, длина 50 м и комплексное сопротивление 0,03 Ом [56, 57].

Испытательное напряжение характеризуется следующими параметрами: длительностью, амплитудой и периодом следования прямоугольного импульса. Осциллограмма исправной линии приведена на рисунке 2.4. Каждый изолирующий элемент имел активное сопротивление равное 300 Мом и емкость – 50 пФ [56, 57]. При прохождении прямоугольного импульса по длинной линии, происходит заряд и последующий разряд поперечной емкости.

Результаты моделирования с поврежденными изоляторами в различных точках линии представлены на рисунке 2.5. Рассмотрены следующие случаи: 1 – неисправный изолятор находится в начале линии, 2 – неисправный изолятор находится в середине линии, 3 – неисправный изолятор расположена в конце линии. Из представленных осциллограмм видно, чем дальше находится неисправный изолятор от источника, тем больше наблюдается спад заднего фронта импульса. Что можно обосновать суммарным разрядом всех емкостей изоляторов линии.

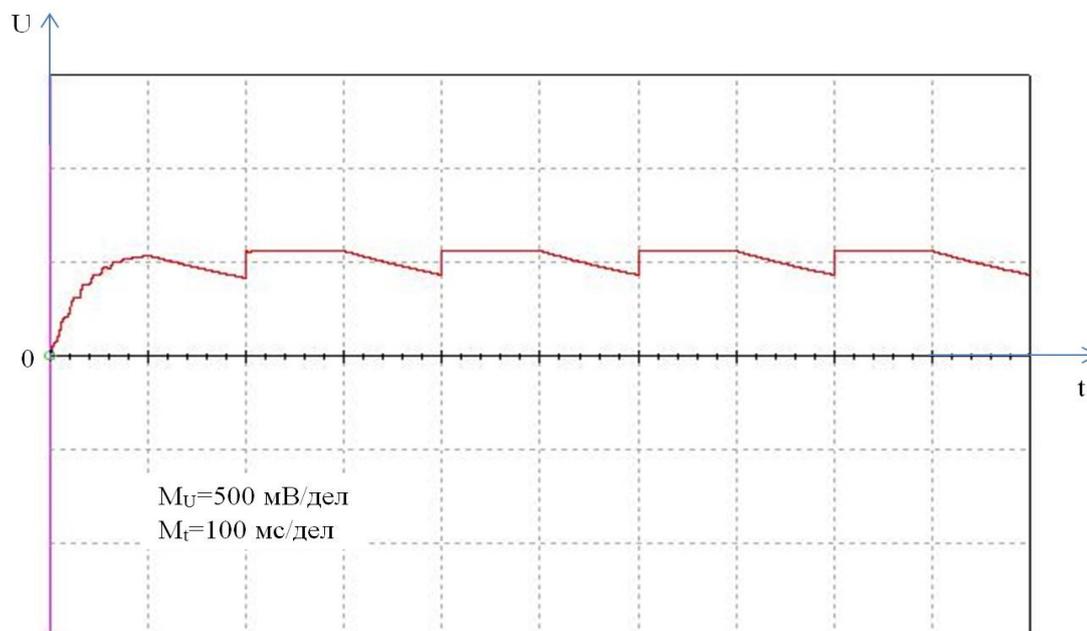


Рисунок 2.4 – Осциллограмма тестового сигнала на участке с исправными изоляторами

Испытательный сигнал будет шунтироваться неисправным изолятором, сопротивление и емкость которого значительно меньше, чем у исправных изоляторов. Поэтому, в случае, когда неисправные изоляторы находятся в начале линии, разряд емкости регистрируемого напряжения происходит значительно быстрее.

Приведенная модель подтверждает положение, что наличие неисправных изоляторов связано с изменением формы тестовых прямоугольных импульсов, а расстояние от источника до неисправного изолятора определяется изменением амплитуды сигнала и длительностью заднего фронта. При этом в опорах, содержащих дефектные изоляторы, могут протекать токи утечки, без срабатывания устройств защиты.

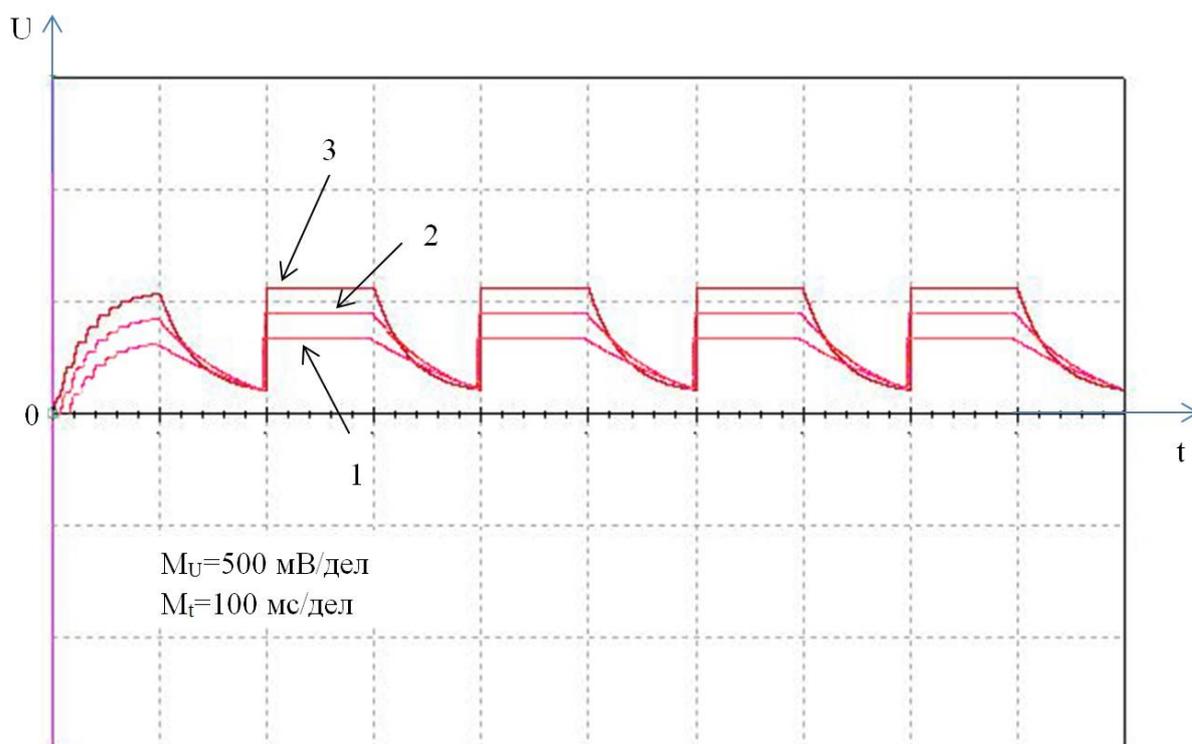


Рисунок 2.5 – Осциллограммы зарегистрированного сигнала в различных точках расположения неисправного изолятора

2.4 СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ НАВОДИМЫЕ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ В АРМАТУРЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Одним из факторов, повышающих скорость протекания коррозии железобетонных опор контактной сети железных дорог, является протекание электрического тока по арматуре, вследствие которого происходит перераспределение электрических потенциалов и изменение электрохимического баланса [89-93].

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

В системах электроснабжения железных дорог переменного тока, процесс индукции тока в арматуре подробно описан в работе [98]. В системах электроснабжения железных дорог постоянного тока предлагается рассмотреть тяговый ток электровоза изменяющимся во времени с оценкой гармонических составляющих, с последующим возникновением тока в арматуре.

Упрощенная схема замещения возникновения тока, индуцируемого в арматурных элементах железобетонной опоры, может быть представлена в следующем виде (см. рис. 2.6). На схеме приняты следующие обозначения: E_T , R_T , L_T – ЭДС, сопротивление и индуктивность в тяговой сети соответственно; $R_{из}$, $C_{из}$ – сопротивление и емкость изолятора контактной подвески; $R_{ар}$, $L_{ар}$ – сопротивление и индуктивность арматуры железобетонной опоры; M – взаимная индуктивность; $R_{гр}$, $C_{гр}$ – активное сопротивление и емкость границы раздела «арматура-бетон»; $R_б$ – сопротивление бетона; R_p – сопротивление растекания тока в грунт [27].

Полное сопротивление току, индуцированному в арматуре железобетонной опоры, будет складываться из составляющих связанных с возникновением ЭДС в витках арматуры и составляющих, связанных с растеканием тока в грунт. Многочисленные эксперименты, проведенные

ранее [28] показывают, что данные составляющие зависят от коррозионного состояния арматуры и внешних условий среды (температура, влажность, агрессивность среды и др.).

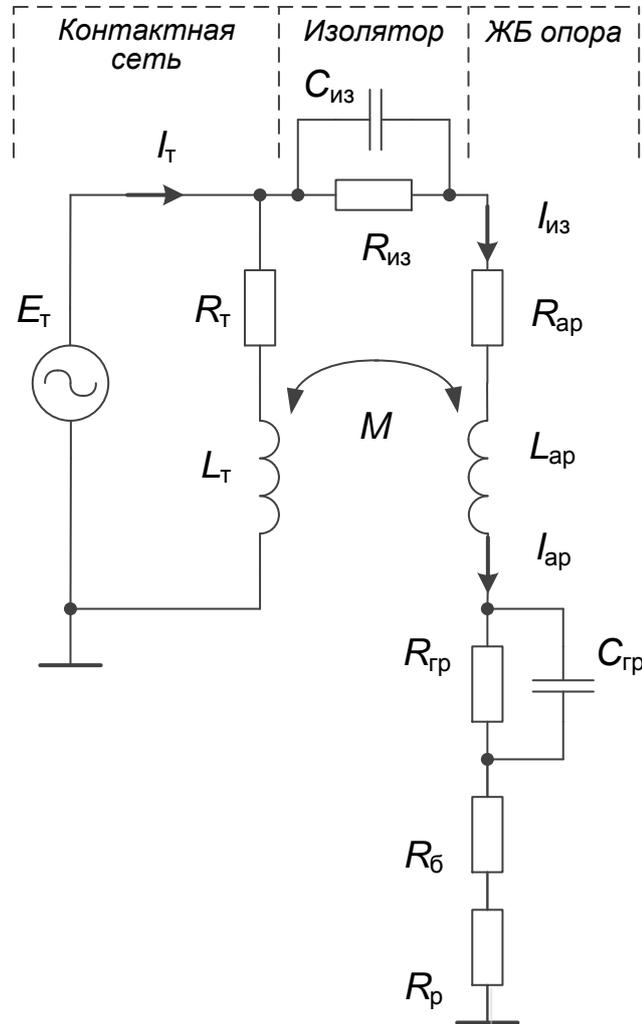


Рисунок 2.6 – Упрощенная схема замещения ЖБ опоры с наведенным током арматуры

Полное сопротивление можно записать в следующем виде:

$$\underline{Z}_k = R_{ap} + j\omega L_{ap} - \frac{R_{ep} \cdot j \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C_{ep}}}{R_{ep} - j \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C_{ep}}} + R_б + R_p \quad (2.14)$$

где $L_{ap} = \sum_{i=1}^n L_i$; – индуктивность спиральной части арматуры;

n – число витков спиральной части арматуры;

k – номер гармоники тягового тока.

Величина индуцируемого тока в арматуре будет зависеть от величины питающего напряжения, расстояния между опорой и контактном проводом, от сопротивления самой арматуры, и, в большей степени от тока, протекающего по контактному проводу.

Для проведения расчётов был принят тип опоры С-136.6, расстояние от контактного провода до центра опоры – 3 м, диаметр опоры в нижней части – 492 мм, верхней части – 290 мм, диаметр проволоки спирального витка арматуры – 3 мм, ток в контактной сети, при прохождении электровоза, принимаем в диапазоне от 100 А до 1000 А с шагом в 100 А. Питание контактной сети осуществлялось от подстанции постоянного тока напряжением 3,3 кВ.

При расчёте индуцированного тока будем пользоваться следующими начальными условиями: спиральная арматура заменяется совокупностью отдельных колец, расположенных на одинаковом расстоянии с шагом равным 0,075 м; кольца соединены между и имеют электрическую связь, тогда ток, индуцированный в кольце будет таким же и во всех остальных кольцах, представляющих спиральную арматуру.

Электрический ток, индуцируемый в спиральной арматуре опоры определится выражением [76].

$$I_{ap} = \frac{E}{Z}, \quad (2.15)$$

где E – ЭДС, наведённая током контактной подвески в арматурном кольце, В;

Z – комплексное сопротивление кольца арматуры, Ом.

Схема расположения элементов при расчете индуцируемого тока приведена на рисунке 2.7.

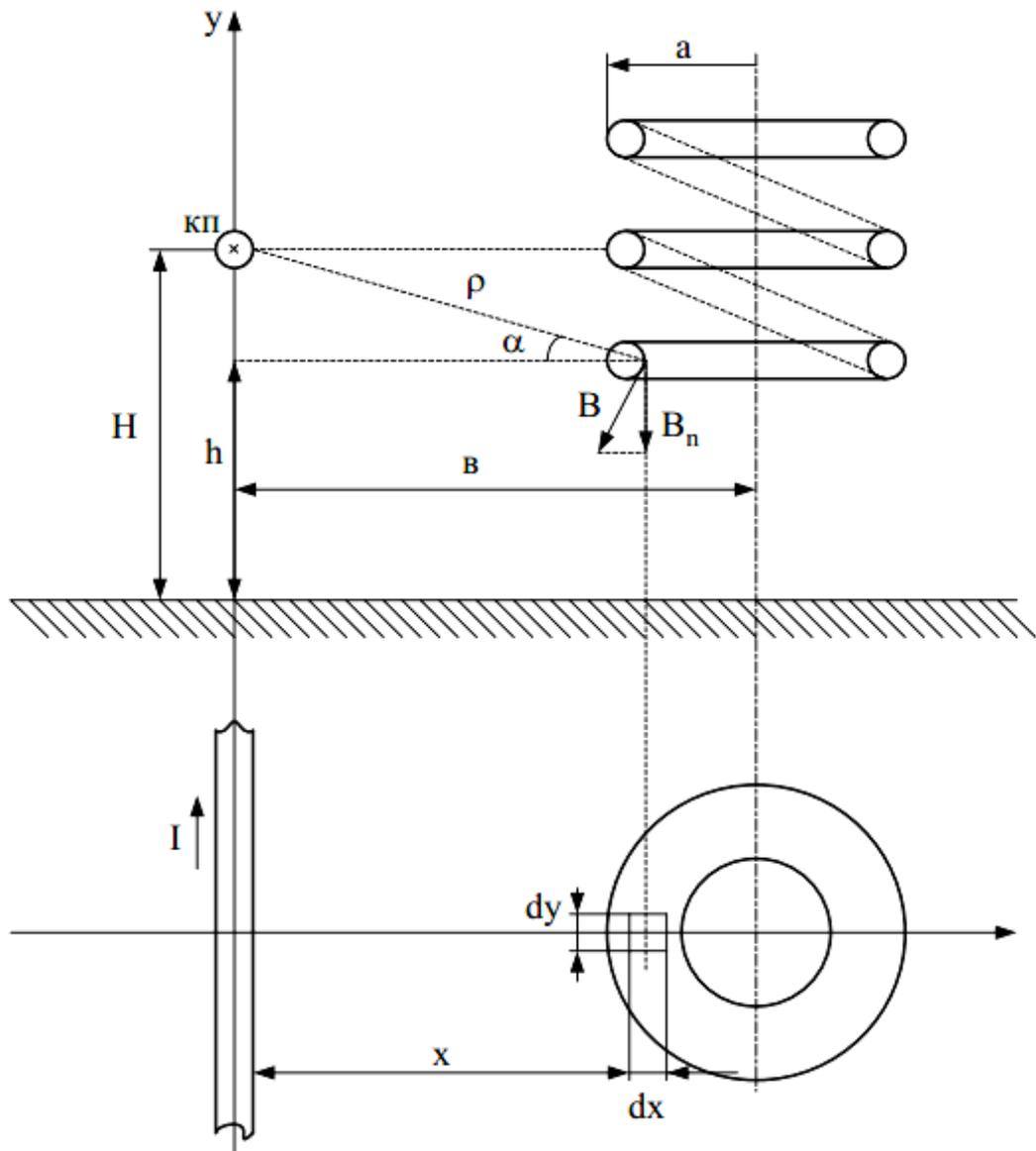


Рисунок 2.7 – Схема для определения индуцируемых токов в спиральной арматуре

На рисунке 2.7 приняты следующие обозначения: H – высота от головки рельса до контактного провода; h – высота от головки рельса до расчетного поперечного кольца арматуры; b – расстояние от оси пути до центра опоры; a – радиус кольца арматуры, перпендикулярный радиусу ρ .

Коэффициент взаимной индукции связан с потоком и током выражением

$$M = \frac{\Phi}{I}, \quad (2.16)$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий площадь S , витка катушки с радиусом a , Вб; I – ток контактной сети, А.

Магнитный поток определим выражением, Вб

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S B_n dx \cdot dy, \quad (2.17)$$

где B – магнитная индукция в расчетной точке с координатой x , перпендикулярная радиусу; B_n – проекция вектора на вертикальную ось y .

При этом

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot \rho}, \quad (2.18)$$

$$B_n = B \cdot \cos \alpha, \quad (2.19)$$

где μ_0 – магнитная постоянная вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Поскольку $a \ll b$, для практических расчетов можно принять $x \approx b$, тогда

$$B_n = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot \rho} \cdot \cos \alpha = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot x}{2\pi [x^2 + (H-h)^2]} = \text{const.} \quad (2.20)$$

Следовательно

$$\Phi = \int_S B_n \cdot dS = B_n \int_S dS = B_n S = \frac{\mu_0 I \cdot b \cdot a^2}{2 [b^2 + (H-h)^2]}, \quad (2.21)$$

и

$$M = \frac{\mu_0 B \cdot a^2}{2[B^2 + (H-h)^2]} \quad (2.22)$$

Электродвижущая сила, наведенная током контактной сети в кольце опоры, будет равна

$$E = \omega \cdot M \cdot I, \quad (2.23)$$

где ω – угловая частота, рад/с.

В работе [75] рассмотрено наведение ЭДС от переменного тока частотой 50 Гц. В случае тяговой сети постоянного тока рассмотрим ток электровоза в виде набора гармонических составляющих за время прохождения относительно рассматриваемой опоры.

Ток электровоза при прохождении мимо тяговой подстанции представляет собой величину, изменяющуюся во времени, как показано на рисунке 2.8.

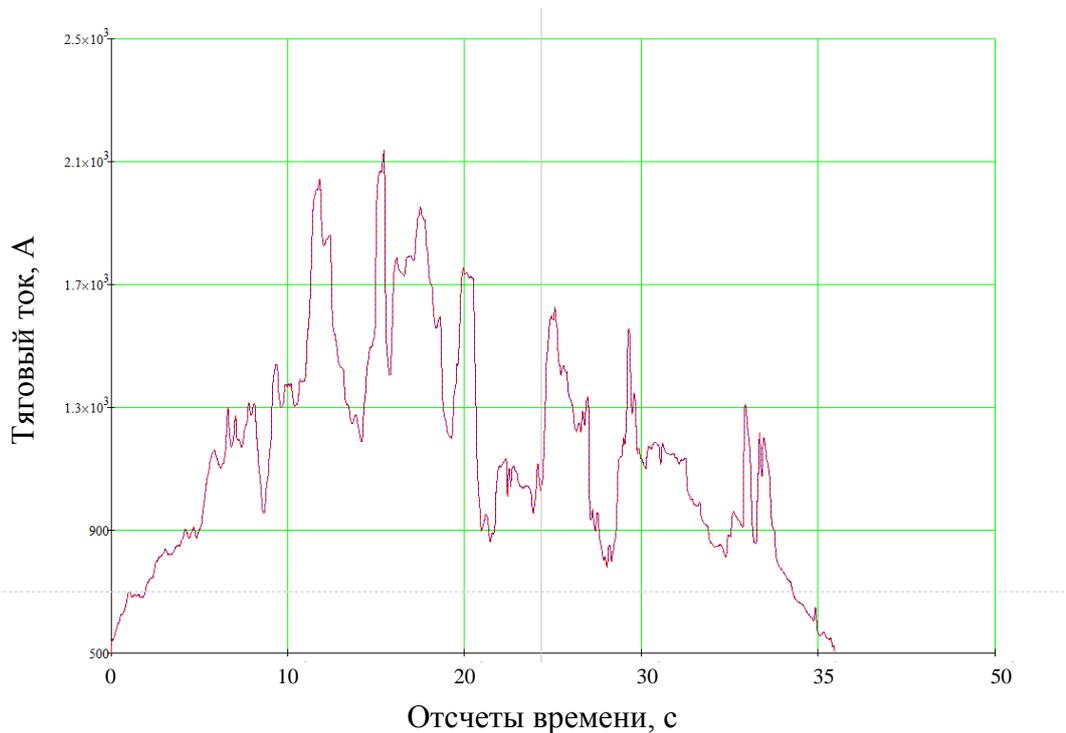


Рисунок 2.8 – Тяговый ток на фидере ТП при прохождении электровоза.

Тяговый ток на рисунке 2.8 представлен дискретными значениями при количестве разбиений $n=4096$. 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

$$E = \sum_{1}^{k} (I_k \omega_k M) \quad (2.24)$$

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

График амплитуд гармоник, полученный при помощи процедуры быстрого преобразования Фурье – FFT() в программном комплексе MathCad приведен на рисунке 2.9, а численные значения амплитуд гармоник и их частотах – в таблице 2.1.

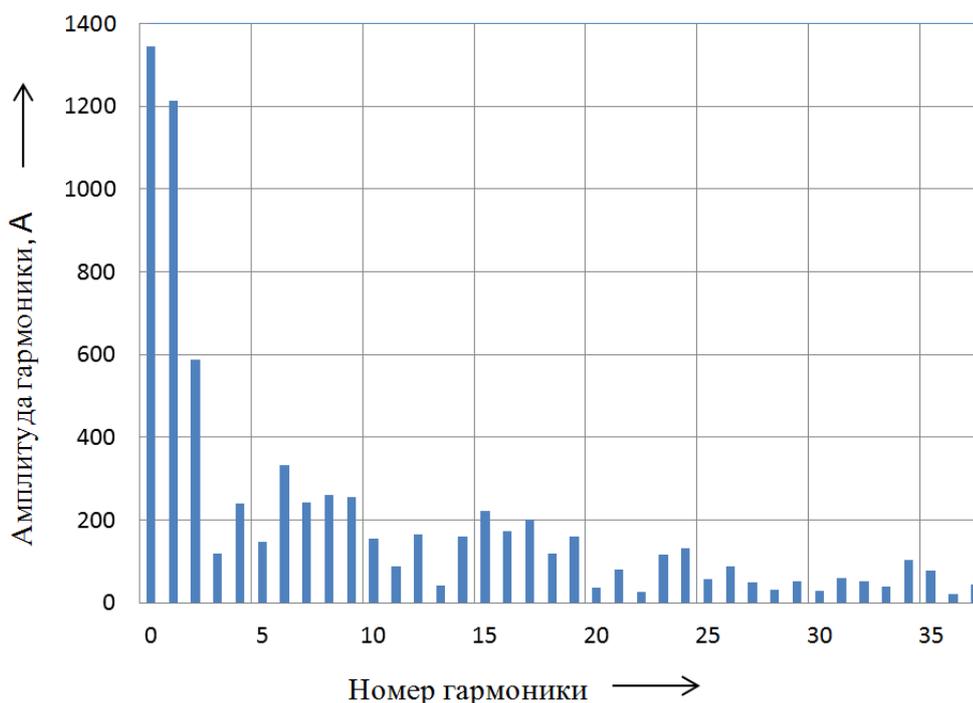


Рис. 2.9 – Амплитудный спектр гармоник тягового тока, А

Таблица 2.1 – Параметры гармоник тягового тока

Номер гарм.	Амплитуда, А	Фаза, град	Период, с	Частота, Гц	Омега, с ⁻¹
0	1346	–	–	0	0
1	1212	16.7	40,96	0.024	0.15
2	589	-15.2	20,48	0.049	0.31
3	120	11.8	13,65	0.073	0.46
4	239	-15.4	10,24	0.098	0.61
5	147	9.5	8,19	0.122	0.77
6	333	-15.9	6,83	0.146	0.92
7	244	7.7	5,85	0.171	1.07
8	259	5.4	5,12	0.195	1,23
9	256	-17.6	4,55	0.220	1.38
10	155	-1.5	4,10	0.244	1.53
...
37	44	17.9	1,11	0.903	5.68
38	47	8.6	1,08	0.928	5.83
39	44	-18.4	1,05	0.952	5.98
40	55	1.1	1,02	0.977	6.14
...
2047	3	-24.3	0,02	50	314.15

Комплексное сопротивление витка

$$Z = R + jx' + jx'', \quad (2.25)$$

где R – активное сопротивление витка, Ом;

x' , x'' – индуктивное сопротивление витка, вызванное внешним и внутренним магнитными потоками.

Активное и индуктивное сопротивление витка на единицу длины запишем согласно [77, 78] в виде, Ом/м:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu \cdot B_0}}{2\pi \cdot r \cdot \gamma \cdot B_1} \cos(\beta_0 - \beta_1 - 45^\circ), \\ X_1' &= \frac{\sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu \cdot B_0}}{2\pi \cdot r \cdot \gamma \cdot B_1} \sin(\beta_0 - \beta_1 - 45^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

где γ – проводимость стали, $0,8 \cdot 10^{-7}$ См/м;

μ – магнитная проницаемость стали $1,256 \cdot 10^{-6}$;

r – радиус провода витка, м.

Как правило, радиус витка много больше радиуса провода, то для нахождения индуктивности можно воспользоваться формулой, Гн

$$L = \mu_0 a \left(\ln \frac{8a}{r} - \frac{7}{4} \right), \quad (2.27)$$

Для расчета гармонических составляющих ЭДС, наводимой в витках арматуры воспользуемся усредненными значениями параметров, полученных для железобетонных опор, находящихся в коррозионно опасном состоянии [27]. Расчетные параметры полного сопротивления железобетонной опоры приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры полного сопротивления железобетонной опоры

Параметр	$R_{ар}$, Ом	$L_{ар}$, мГн	$R_{гр}$, Ом	$C_{гр}$, мкФ	$R_б$, Ом	R_p , Ом	ω , с ⁻¹	k
Значение	0,014	1,31	1,4	1,5	2,4	3,8	0,024	40

При расчете ЭДС, наводимой во всех витках спиральной части арматуры, выполненной в программе MathCad по выражению (11), учитывалось, что она наводится суммой гармоник тока и в ее составе содержится то же количество гармонических составляющих.

В конечном итоге ток в арматуре суммируется по всем виткам спиральной части арматуры с учетом всех гармоник индуцированной ЭДС, по данным, представленным в табл. 2.1, 2.2 :

$$I_{ap} = \sum_1^k \frac{E_k}{|Z_k|} = 5,12 \cdot 10^{-3} \text{ А.} \quad (2.28)$$

Обработка данных по большому количеству железобетонных опор выявила, что расчетные значения тока в арматуре находятся в интервале от 1 до 150 мА. Приведенные расчеты показывают, что на появление электрокоррозии существенное влияние оказывают токи, наводимые в арматуре железобетонных опор со стороны тяговой нагрузки. Количество электричества Q [А·ч], прошедшее за рассматриваемый временной интервал будет влиять на развитие электрокоррозии [27].

Следует отметить, что ток, индуцируемый в арматуре железобетонных опор контактной сети железнодорожного транспорта, приводящий к коррозии, имеет накопительный эффект. Таким образом, следует иметь в виду, что при оценке коррозионного состояния опор необходимо оценивать количество электричества, прошедшее через арматуру и сравнить его с критическими значениями $Q = (40 \dots 60)$ А·ч, приводящим к существенным изменениям коррозионного состояния опоры, с учетом того, что срок службы значительного числа опор на железнодорожном транспорте превышает 30 лет.

2.5 ВЫВОДЫ

1. Приведены основные виды повреждений изоляторов опор контактной сети, как один из источников тока утечки. Физические воздействия приводят к повреждениям изоляторов и снижению его диэлектрических свойств. Климатические условия способствуют возникновению на поверхности изолятора частичных разрядов, что приводит к их поверхностному пробою. Поврежденные изоляторы способствуют возникновению токов утечки, а следовательно влияют на образование коррозии.

2. Представлены преимущества импульсного метода диагностирования, как наиболее подходящего для участков контактной сети постоянного тока. Приведены выражения для определения места повреждения изоляторов и опор контактной сети с повышенными токами утечки.

3. При расчете контактной сети постоянного тока с железобетонными опорами и изоляторами использовался математический аппарат длинной линии. Приведена T-образная схема замещения участка содержащего изоляторы, опоры и контактный провод. При расчете линии с распределенными параметрами учитывались составляющие активное сопротивление проводов r_0 , их индуктивность L_0 , емкость проводов C_0 и активная проводимость изоляции g_0 на единицу длины.

4. Проанализирована работа устройства дистанционного диагностирования изоляторов на основе импульсного метода, отделяющих опоры от контактной сети. В программной среде Multisim 12.0 была смоделирована работа устройства, и проведено сравнение с экспериментом на участке, содержащем три опоры и три изолирующих элемента. Приведены осциллограммы исправной линии и с поврежденными изоляторами в трех различных положениях на участке. Неисправные изоляторы выявляются путем изменения формы диагностирующих импульсов, а расстояние до неисправного изолятора определяется изменением амплитуды и спадающего фронта зарегистрированного сигнала.

5. Произведен расчет токов в арматуре железобетонных опор контактной сети, наведенных тяговой нагрузкой. Взаимное расположение контактного провода и армирующих конструкций показало большее влияние на спиральную арматуру. Количество электричества, прошедшее за рассматриваемый временной период будет влиять на развитие электрокоррозии. Дальнейшие исследования будут проведены в направлении поиска зависимости количества электричества на развитие коррозии и изменениях поверхностного слоя бетона.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ ПЕРЕХОДА АРМАТУРА-БЕТОН

3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СРАВНЕНИЯ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ КОРРОЗИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Диагностирование состояния полых железобетонных конструкций, в том числе опоры контактной сети железных дорог постоянного тока, является важной задачей. В настоящее время насчитывается более 1 миллиона опор, многие из них находятся в аварийном состоянии. Особое значение имеют методы диагностирования, которые позволяют обнаружить дефекты, в первую очередь потерю прочности, вызванную коррозией арматурных стержней и бетона.

Существует некоторое количество неразрушающих методов контроля, основанных на применении ультразвука, электрохимических и визуальных методов контроля. В предлагаемой статье будет обсуждаться использование рентгенографического метода по определению потери металла арматурных стержней, последующее использование приборов лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС) для обнаружения коррозионных продуктов на поверхности железобетона [79]. Также будут рассмотрены вопросы создания лабораторных образцов с различной степенью коррозии. Приведены результаты моделирования прочности элементов железобетонных конструкций с разным диаметром арматурных стержней.

В данной работе исследования проводились на лабораторных образцах бетона. Образцы представляют собой блоки размером 200×60×60 мм, внутри которых имеется металлическая арматура диаметром 10 мм и длиной 200 мм. Арматура выступает на 30 мм от верхней поверхности образца. Для эксперимента были подготовлены два вида образцов: первый вид - без отверстий, а второй вид - с отверстиями диаметром 2 мм, перпендикулярно оси от поверхности до арматуры. Таким образом была выполнена моделировка трещин в бетоне:

- без отверстий (обозначение – БО);
- одно отверстие (обозначение – 1О);
- два отверстия (обозначение – 2О);
- четыре отверстия (обозначение – 4О, см. рисунок 3.1).

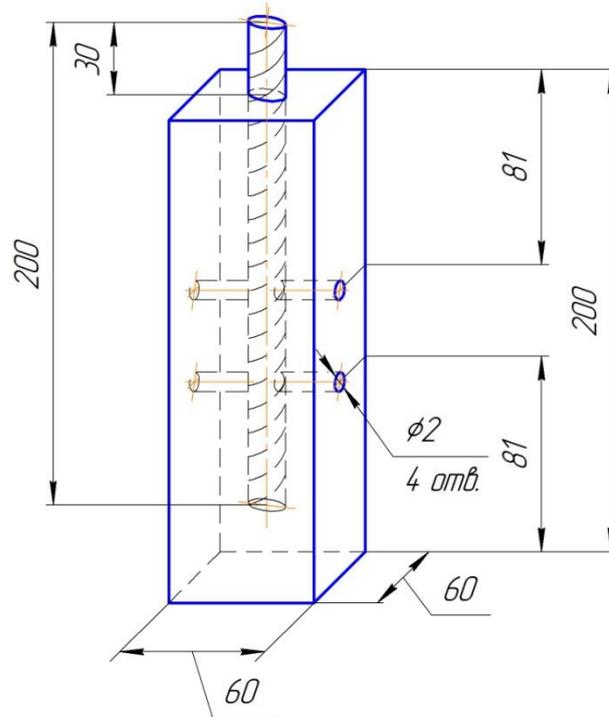


Рисунок 3.1 – Схематичное изображение лабораторного образца с четырьмя отверстиями (4О)

При изготовлении лабораторных образцов использовалась технология изготовления реальных железобетонных опор контактной сети. Марка цемента – М350, класс прочности – В30. Состав бетона: цемент, песок, щебень (керамзит) и воды. В качестве заполнителя использовался ебень и песок, а цемент – связующим веществом. Пропорции замешивания раствора 1/1,9/3,7/0,5 (цемент/песок/щебень/вода). Арматура из стали класса А-III по ГОСТ 5781. Марка арматуры 25Г2С, химический состав которой приведен в таблице 3.1 [80].

Таблица 3.1 – Содержание химических элементов в арматуре, изготовленной из стали марки 25Г2С

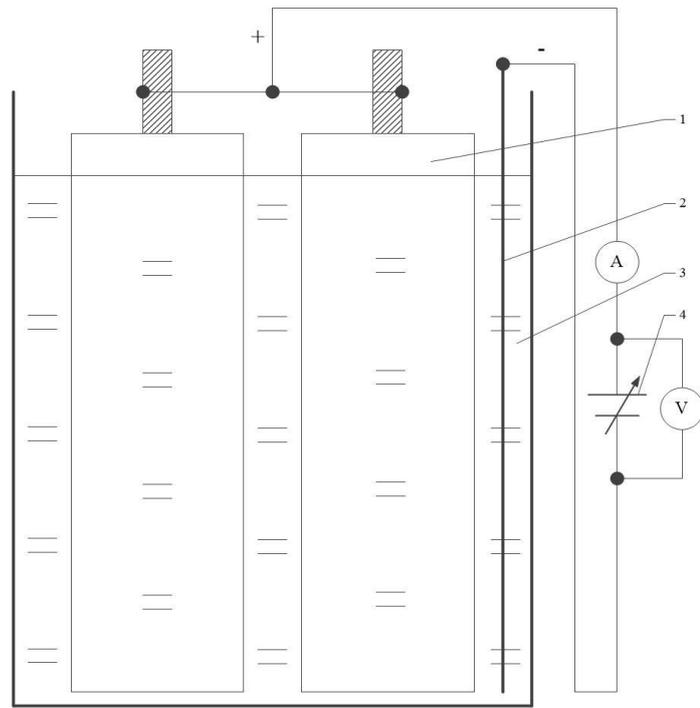
С, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %	Cu, %
0,20-0,29	1,20-1,60	0,60-0,90	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	$\leq 0,045$	$\leq 0,04$	$\leq 0,30$

К внешнему источнику напряжению были подключены образцы, данные условия полностью идентичны реальным условиям эксплуатации железобетонных опор контактной сети. По четыре образца были помещены в ванны, заполненные 3 % раствором NaCl, арматура которых соединялась электрическим проводником. Положительный потенциал источника питания подключался к арматуре, а отрицательный к пластине, находящейся в ванне. Время воздействия электрического тока и параметры источника питания приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные

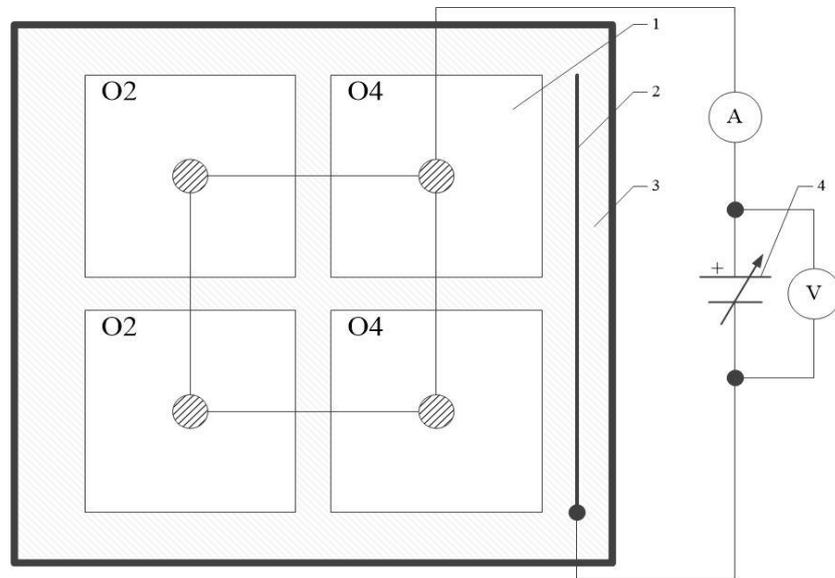
№ ванны	Обозначение образцов	Кол-во образцов	Напряжение источника, В	Среднее значение тока, А	Время включения тока, час
1	1В2О	2	5	0,40	102
	1В4О	2			
2	2В1О	2		0,45	102
	2В2О	2			
3	3ВБО	4		0,30	78

Используя внешний источник питания, мы можем 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 выполняет функцию электролита, насыщенного различными ионами, где проходит электролитический процесс. Пластина из меди выступает в роли катода. Расположение образцов в электролитической ванне изображено на рисунках 3.2, 3.3 [81].



1 – лабораторный образец; 2 – медная пластина; 3 – раствор NaCl ;
4 – регулируемый источник питания постоянного тока

Рисунок 3.2 – Схема проведения электролиза (вид сбоку)



1 – лабораторный образец; 2 – медная пластина; 3 – раствор NaCl ;
4 – регулируемый источник питания постоянного тока

Рисунок 3.3 – Схема проведения электролиза (ванна 1):



Рисунок 3.4 – Образцы 1В4О, 3ВБО, 1В2О, 2В2О перед испытаниями



Рисунок 3.5 – Образцы 1ВХО во время испытаний



Рисунок 3.6 – Образцы 1В4О, 1В2О после испытаний

Как видно из рисунка 3.6 продукты коррозии, выступившие на поверхности, распространялись от открытой части арматуры сверху, а также из отверстий, имитирующих трещины в средней части бетона.

Параметры прочности во многом определяются состоянием арматурных стержней, степенью их сцепления с бетонным камнем. Фотографии визуального состояния образцов после электролиза представлены на рисунке 3.7, а, и рисунке 3.8, а. Рентгеновские снимки тех же образцов во взаимно перпендикулярных положениях показаны на рисунке 3.7, б, в и рисунке 3.8, б, в.

Как видно из рисунков, наибольшей коррозии при использованной схеме электролиза подверглись верхние участки арматурных стержней рисунок 3.7 б, в, что обусловлено контактом с атмосферным воздухом, наличием агрессивной среды и протеканию электрического тока. Потеря металла по площади поперечного сечения для испытуемых образцов составляла до 43%.

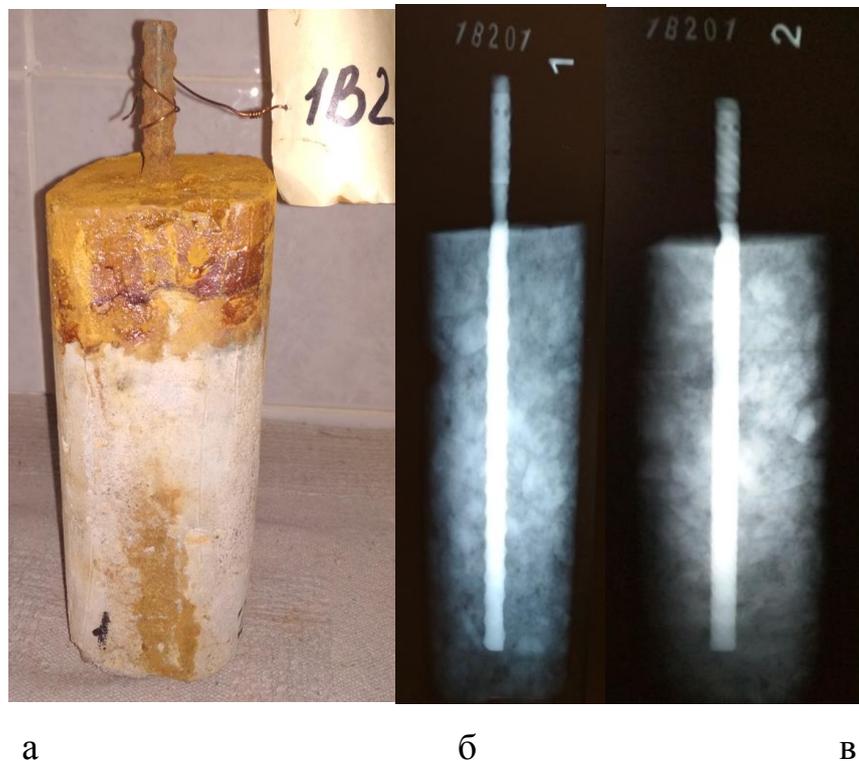


Рисунок 3.7 – Внешний вид (а) и рентгеновские снимки (б, в) образца 1B20

Другой случай потери металла арматурных стержней наблюдался для дефектов сплошности железобетонного образца. Через отверстие, имитирующее трещину, в электролит переносились продукты коррозии, состоящие из оксидов железа. На рисунке 3.8, а показан след от оксидов железа перенесенных от поверхности арматурного стержня через отверстие, имитирующее трещину на поверхность бетона. В нижней части арматурного стержня на рисунке 3.8, б показан выход металла напротив сквозного отверстия от поверхности бетона до арматурного стержня. Потеря металла по площади поперечного сечения для образца 1В2О составила 15,9%.

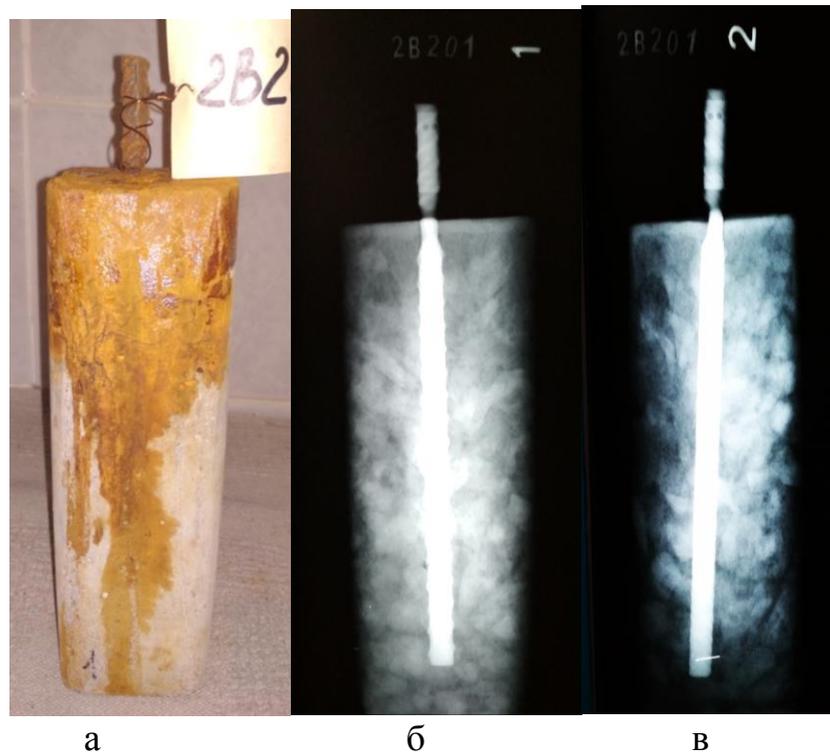


Рисунок 3.8 – Внешний вид (а) и рентгеновские снимки (б, в) образца 2В2О

Таким образом, при различной степени коррозии железобетонных образцов, определяемой количеством электричества, прошедшего через образцы, отличаются цветовые параметры поверхности. В свою очередь цвет поверхности пропорционален концентрации продуктов коррозии Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $FeOH$ и др., достигших поверхности образцов. Далее в работе будут показаны методика и технические средства для обработки параметров изображений для определения степени коррозионного воздействия на железобетонные изделия.

3.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗИ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

В связи с тем, что бетон коррозионная среда, он обладает рядом особенностей, которые следует учитывать при изучении процесса коррозии между бетонным и арматурой, не имеющей прямого контакта с окружающей средой. Тем не менее, через пористый бетон, влага из окружающей среды проникает к границе между арматурой и бетоном. Значение $pH > 12$ на границе раздела «арматура-бетон». [82, 83, 117], согласно диаграмме Пурбе арматура в бетоне находится в состоянии термодинамической стабильности. Кроме того, при поляризации сталь пассивируется, образуя трудно растворимую пленки на границе между арматурой и бетоном из-за многостадийного процесса окисления железа.

Первая стадия окисления железа переходит в раствор с образованием гидроксида $Fe(OH)_2$, далее, $Fe(OH)_2$ окисляется, взаимодействуя с растворенным кислородом и более труднорастворимый гидрат окиси железа. Эти вторичные продукты могут претерпевать изменения, образуя сложные гидратированные окислы $FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, известные как ржавчина [84].

Третья стадия характеризуется образованием пассивирующей пленки, состоящей из Fe_2O_4 и Fe_2O_3 . Дальнейшее возрастание потенциала арматуры и плотности тока через границу раздела между арматурой бетоном происходит нарушение целостности пассивной пленки и начинается коррозионное разрушение железа с образованием всех промежуточных составляющих. Увеличение объема коррозионных продуктов ведет к повышению давления в приэлектродном слое, что в конечном итоге приводит к разрушению бетона и образованию трещин. Поступающая влага из окружающей среды к границе раздела между арматурой и бетоном приводит к понижению значения pH внутри бетона [85]. В таком случае процесс коррозии будет продолжаться до полного разрушения арматуры.

Тогда в пассивном состоянии наблюдается высокая поляризуемость арматуры, высокое значение сопротивления границы раздела и сопротивления бетона. В активном состоянии значения сопротивления на границе между арматурой и бетоном и сопротивления самого бетона будут незначительными.

Если учесть сложность процессов, которые происходят на границе между арматурой и бетоном, и отсутствие достоверной математической модели, зависимость между протекающим по арматуре током, и ее потенциалом $I = f(\phi)$ может быть определена экспериментально. Граница раздела, схема замещения которой приведена на рис. 3.9, представлена элементами $R_{гр}$, $C_{гр}$ и U_0 .

Сопротивление $R_{гр}$ можно охарактеризовать интенсивностью окислительного процесса. Емкость $C_{гр}$ возникает на границе раздела между металлом и электролитом. При это одна обкладка, это металл арматуры, другая – жидкий приэлектродный слой из диссоциированных и полярных молекул. Сопротивление бетона $R_б$ это сопротивление от границы раздела «арматура-бетон» до внешней границы опоры, зависящее от характеристик бетона окружающей среды. Сопротивление растеканию R_p определяется параметрами земли. Поскольку арматурный каркас железобетонной конструкции состоит из отдельных элементов, которые могут состоять из отдельных прутков или прядей арматурной стали, и они имеют электрический контакт между собой, то схема замещения будет представлять собой одну ячейку с эквивалентными параметрами (рис. 3.9).

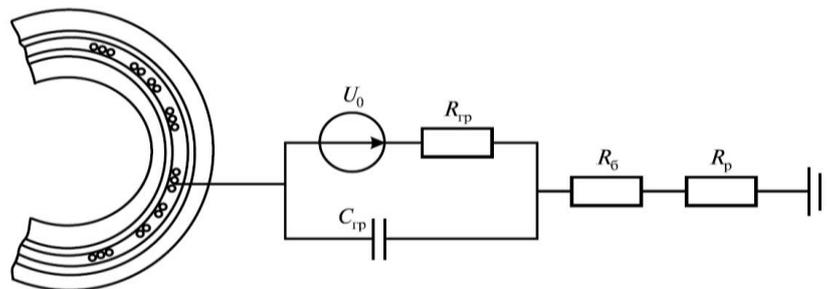


Рисунок 3.9 – Эквивалентная электрическая схема замещения единичного элемента подземной части опоры контактной сети

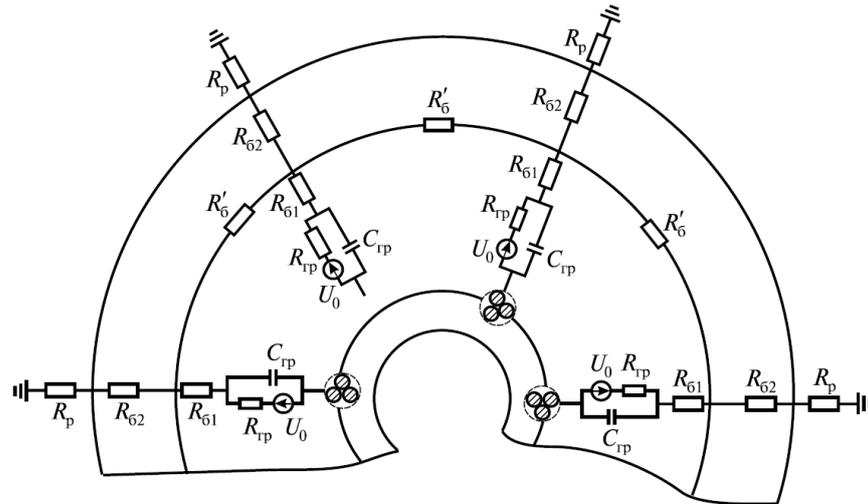


Рисунок 3.10 – Общая эквивалентная электрическая схема замещения элементов подземной части железобетонной опоры

Эквивалентная электрическая схема всего подземного участка опоры контактной сети будет иметь аналогичные элементы, что и единичная схема замещения границы между арматурой и бетоном (см. рис. 3.9). Такая схема будет и для всей опоры (рис. 3.10) состоящая из единичных схем замещения, но с другими значениями элементов, если предположить $R' \rightarrow \infty$. Такой подход обоснован отсутствием других токов в опоре, кроме радиальных, то есть токов от арматуры к внешней границе опоры или в обратном направлении.

Для определения параметров схемы замещения границы раздела был использован метод, описанный в источнике [86]. На основании полученных измерений были определены элементы схемы замещения и их изменения в зависимости от степени коррозионного износа арматуры и бетона. Общий вид осциллограммы тока и потенциала представлен на рис. 3.11. Определение измеряемых значений и вычисляемых параметров выполняются следующим образом.

Из кривых изменения тока и потенциала определяются следующие параметры:

U_0 – стационарный потенциал арматуры;

t_1 – момент времени, в который поляризующий ток достигает максимума при отсутствии помехи, с;

I_1 – максимальное значение поляризующего тока (момент времени t_1), А;

U_1 – значение напряжения «арматура-МСЭ» в момент t_1 , В.

Результаты измерений позволяют определить параметры железобетонных образцов.

Сопротивление бетона может быть определено по формуле:

$$R_{\sigma} = \left| \frac{U_1 - U_0}{I_1} \right|. \quad (3.1)$$

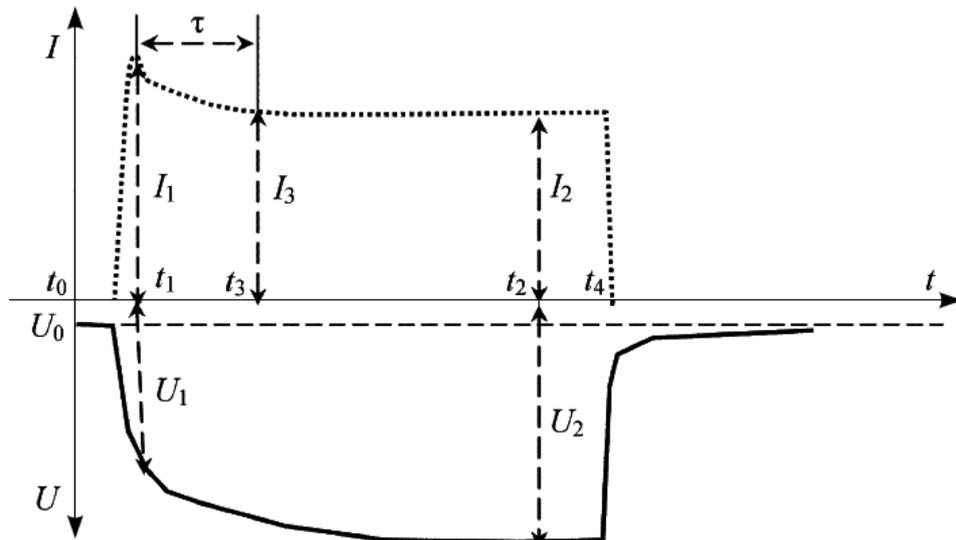


Рисунок 3.11 – Общий вид осциллограммы тока и потенциала на образцах

Сопротивление границы раздела определяется по формуле:

$$R_{гр} = \left| \frac{U_2 - U_0}{I_2} \right| - R_{\sigma}, \quad (3.2)$$

где U_2 – значение напряжения в момент времени t_2 , В;

I_2 – значение поляризующего тока в момент времени t_2 , А;

t_2 – момент времени, предшествующий выключению поляризующего тока, с.

Постоянная времени τ находится по следующему соотношению:

$$\tau = t_3 - t_1, \quad (3.3)$$

где t_3 – определяется для значения тока I_3 , которое равно:

$$I_3 = i(t_3) = I_2 + \frac{I_1 - I_2}{e}. \quad (3.4)$$

В момент времени t_4 производится выключение поляризирующего тока.

Емкость границы раздела:

$$C_{гр} = \frac{\tau}{R_{\vartheta}}, \quad (3.5)$$

где R_{ϑ} – эквивалентное сопротивление, определяем согласно формуле:

$$R_{\vartheta} = \frac{R_{гр} (R_{\delta} + R_{ш} + R_{тЭ})}{R_{гр} + R_{\delta} + R_{ш} + R_{тЭ}}, \quad (3.6)$$

где $R_{ш}$ – сопротивление шунта, Ом;

$R_{тЭ}$ – сопротивление токового электрода, Ом.

В качестве токового электрода использовалась металлическая ванна, в которую помещались образцы.

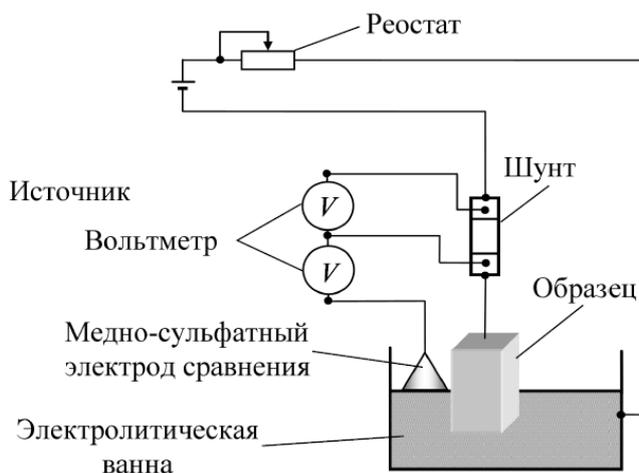


Рисунок 3.12 – Схема измерения граничных параметров образцов

В результате получены зависимости сопротивления границы раздела $R_{гр}$, емкости границы раздела $C_{гр}$, стационарного потенциала U_0 , со противления бетона R_{δ} от количества электричества, прошедшего через

образец при отрицательной поляризации, представлены на рис. 3.14 – 3.16. На тех же рисунках для контрольных образцов показаны зависимости рассматриваемых параметров от времени.

При упрощении сложных электрохимических процессов на границе раздела «арматура - бетон», можно сделать выводы: при протекании процесса искусственного старения бетона на первом этапе поляризации происходит активный коррозионный процесс.

При воздействии анодного потенциала увеличивается интенсивность перемещения носителей заряда через границу раздела «арматура - бетон». В результате стационарный электрохимический потенциал бетонного образца перемещается в отрицательную сторону, уменьшается сопротивление, а емкость границы раздела «арматура-бетон» возрастает. Однако образцы, которые находились в растворе NaCl, этот процесс явно не наблюдался из-за агрессивности среды и высокой скорости коррозионного процесса.

На втором этапе поляризации тоже происходит коррозионный процесс. На границе раздела «арматура - бетон» концентрация носителей заряда достигает максимального значения, в результате стабилизируется стационарный электрохимический потенциал (на уровне около минус 0,65 - минус 0,75 В), сопротивления и емкости границы раздела «арматура-бетон». Сопротивление бетона при этом повышается, а емкость снижается.

Однако для образцов, находившихся в растворе NaCl, этот этап так же не выражен.

Третий этап поляризации сопровождается образованием газообразных и растворенных в приэлектродном слое продуктов коррозии, которые препятствуют доступу носителей заряда к границе раздела «арматура-бетон», заполняются поры в бетоне газообразными продуктами коррозии, в результате чего увеличивается сопротивление бетона и границы раздела «арматура-бетон». Увеличивается защитный электрохимический потенциал арматуры, уменьшается емкость границы раздела «арматура-бетон». Начинается формирование окисной пленки, которая препятствует

возникновению коррозионного процесса. Для образцов, находившихся в растворе NaCl, этот процесс отсутствовал.

На четвертом этапе искусственного старения замечается пассивное состояние арматуры в бетоне благодаря окисной пленки. Сопротивление образцов на этом этапе высокое, а емкость границы раздела «арматура - бетон» низкая.

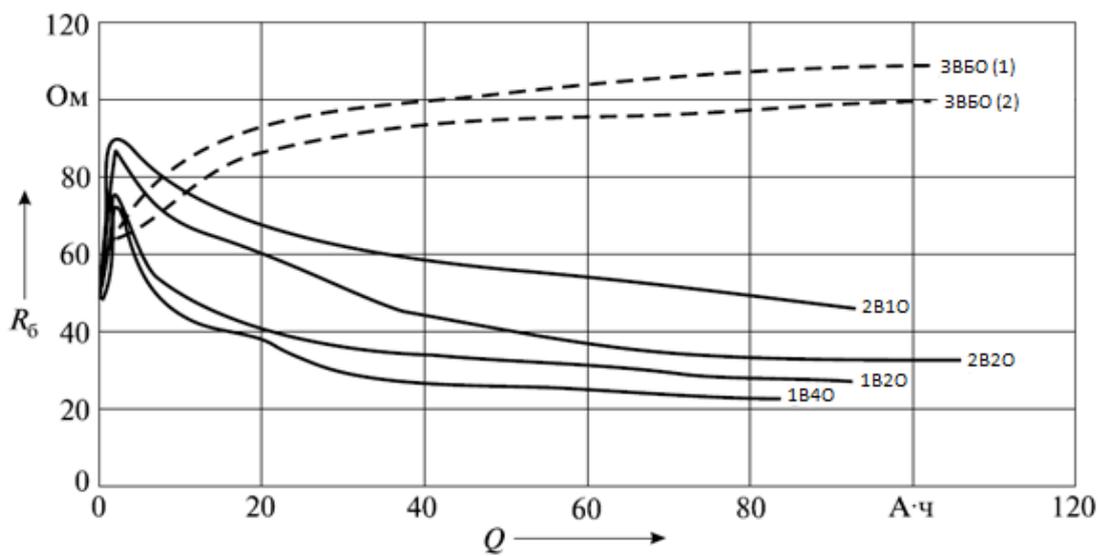


Рисунок 3.13 – Зависимость сопротивления бетона от количества электричества, прошедшего через образец, помещенный в 3 % раствор NaCl

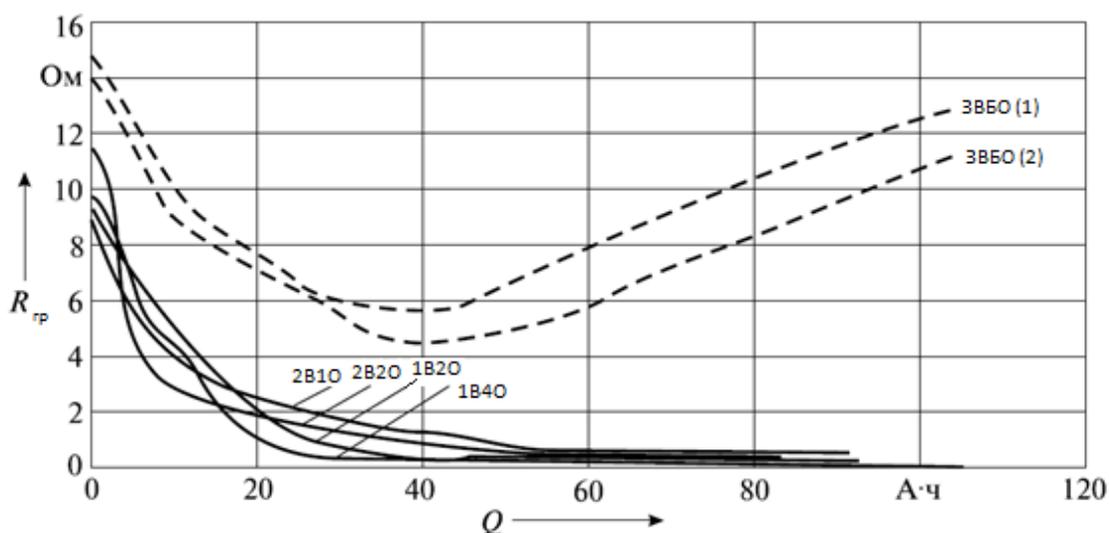


Рисунок 3.14 – Зависимость сопротивления границы раздела «арматура - бетон» от количества электричества, прошедшего через образец, помещенный в 3 % раствор NaCl

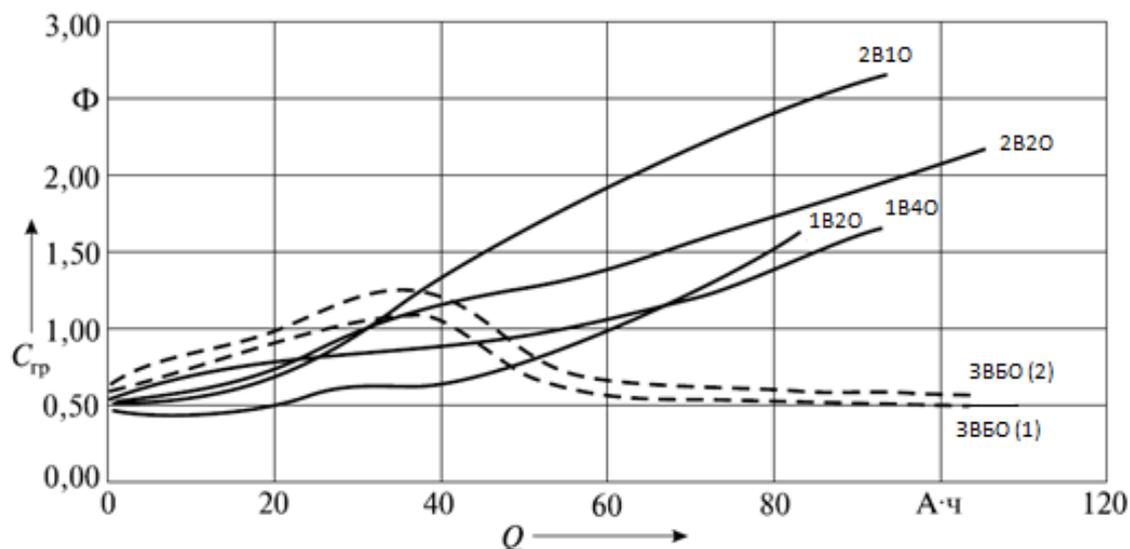


Рисунок 3.15 – Зависимость емкости границы раздела «арматура - бетон» от количества электричества, прошедшего через образец, помещенный в 3 % раствор NaCl

Защитный электрохимический потенциал приходит в стабильное состояние. Сопротивление бетона достигает высокое значение. Процесс коррозии останавливается. Для образцов, находившихся в растворе NaCl, этот этап протекал при количестве электричества от 0 до (2,5 - 3,5) А·ч.

На последнем этапе анодной поляризации окисная пленка на арматуре разрушается, что приводит к активном коррозионному процессу. При протекании коррозионного процесса образуются продукты коррозии, объем которых больше объема веществ до их взаимодействия, в результате увеличивается давление в приэлектродном слое, а поры в бетоне заполняются газообразными продуктами коррозии. В результате появляются трещины и бетон разрушается. Из-за диффузионных и миграционных процессов значение pH приэлектродного слоя уменьшается, исчезают условия формирования пассивной пленки, начинается процесс коррозии, и арматура быстро разрушается. В момент образования трещин сопротивление бетона резко падает, уменьшается и сопротивления границы раздела «арматура - бетон». Это наблюдалось для образцов, находившихся в растворе NaCl, – при количестве электричества большем (2,5 - 3,5) А·ч.

Из представленных графиков на рис. 3.13 – 3.15, можно увидеть, что скорость коррозионного процесса на образцах без поляризации, значительно ниже. При изучении этих образцов удалось выявить только начальные стадии процесса коррозии.. Проанализировав представленные данные были сделаны следующие выводы, что образцы, которые находились в агрессивной среде, при воздействии анодной поляризации практически сразу переходят в последнюю стадию коррозионного процесса и, подвержены разрушению гораздо быстрее, чем образцы, которые находились в неагрессивной среде.

Исходя из результатов анализа измерений электрохимических параметров арматуры в бетоне, можно сделать вывод, что электрохимический потенциал, сопротивление бетона, поляризационное сопротивление и емкость границы раздела «арматура - бетон» характеризуют коррозионное состояние бетонного образца.

Измерение этих параметров предоставляет информацию об электрохимическом потенциале, сопротивлении бетона, поляризационном сопротивлении и емкости границы раздела «арматура - бетон», что облегчает оценку состояния бетонных образцов.

3.3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ-БЕТОН-ГРУНТ

Отталкиваясь от расчетной схемы исследования переходного процесса, был разработан генератор импульсов, с использованием быстродействующих транзисторных ключей и получена осциллограмма его работы.

На расчетной схеме замещения (рисунок 3.16) приняты следующие обозначения: $R_{гр}$, $C_{гр}$ – сопротивление и емкость границы раздела «арматура – бетон»; $R_б$ – сопротивление бетона от границы раздела «арматура – бетон» до внешней границы бетонного образца.

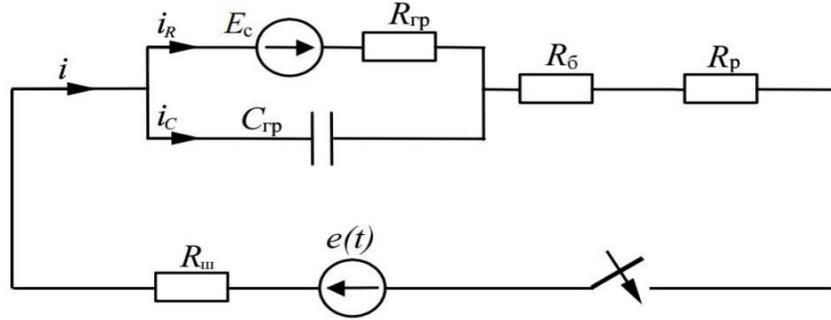


Рисунок 3.16 – Расчетная схема переходного процесса на железобетонном образце

Электрохимический потенциал измеряется вольтметром относительно медно-сульфатного электрода сравнения.

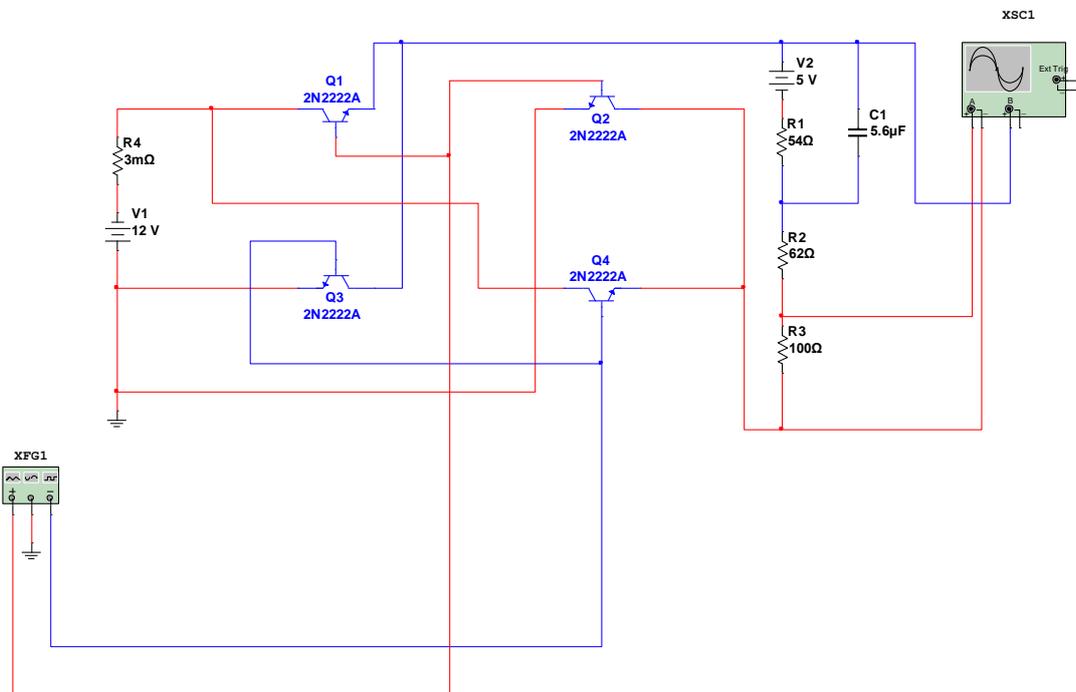


Рисунок 3.17 – Принципиальная схема подключения с применением быстродействующих транзисторных ключей в программе Multisim.

На рисунке 3.17 приняты следующие обозначения: $V1$ – источник тока с внутренним сопротивлением; $Q1 - Q4$ – быстродействующие транзисторные ключи; $V2$ - источник постоянного тока; $R1$ - сопротивление границы раздела; $C1$ - емкость границы раздела; $R2$ - сопротивление бетона; $R3$ - Сопротивление растеканию; $XSC1$ - Осциллограф.

На рис. 3.18 показаны осциллограммы тока и напряжения при исследовании схемы замещения перехода арматура – грунт железобетонного образца.

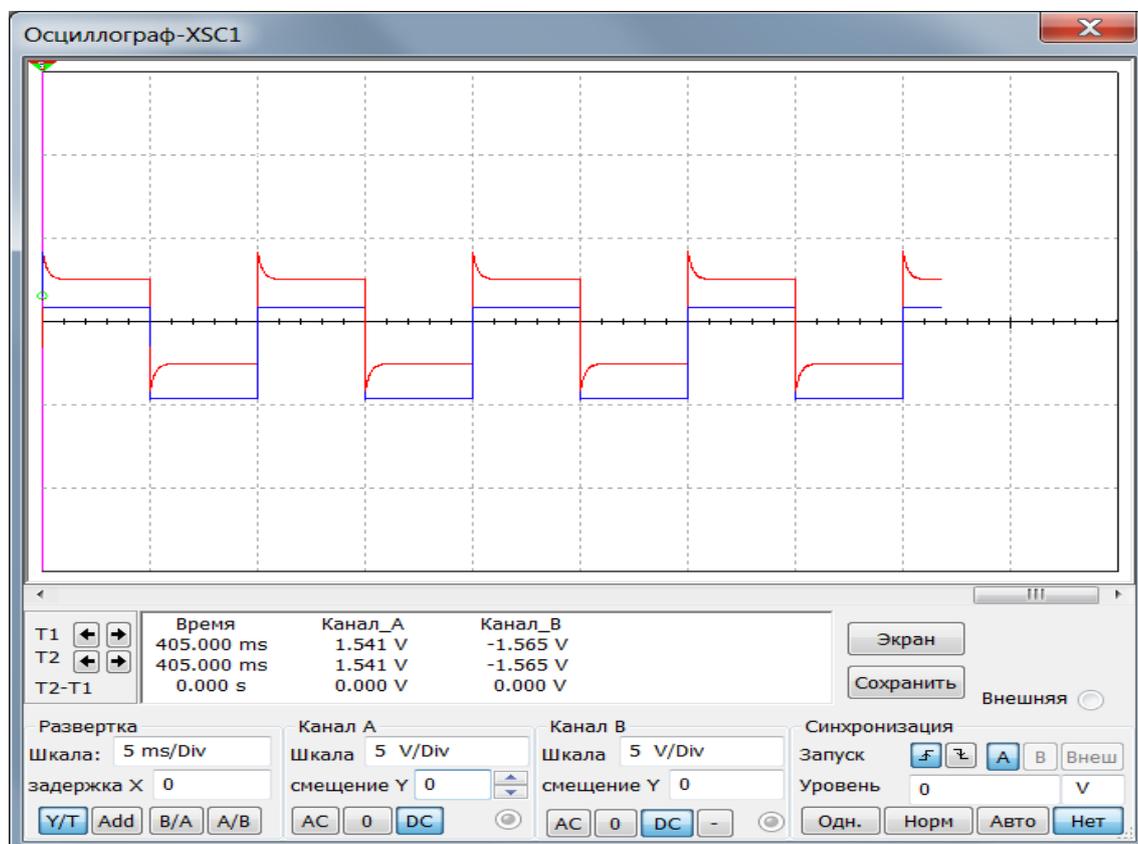


Рисунок. 3.18 – Осциллограмма исследуемой схемы с применением быстродействующих транзисторных ключей в Multisim

На осциллограмме красным цветом показан ток, синим - напряжение, приложенное к исследуемой схеме замещения. Используя данную осциллограмму, получим данные для численного расчета электротехнических параметров опорной конструкции контактной сети.

Учитывая, что сопротивление бетона R_b и сопротивление растеканию электрического тока R_p в схеме замещения включены последовательно, в расчетах удобнее их учитывать вместе. Объединим их в одно сопротивление коррозионной среды ($R_{кс}$):

$$R_{кс} = R_b + R_p. \quad (3.7)$$

Постоянная времени рассматриваемой цепи

$$\tau = R_{\Sigma} C_{\text{тр}}, \text{ где } R_{\Sigma} = \frac{R_{\text{тр}} (R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}})}{R_{\text{тр}} + R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}}. \quad (3.8)$$

Выражение для тока может быть записано в виде:

$$i(t) = i_{\text{пр}}(t) + A_1 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.9)$$

Принужденная составляющая при постоянном внешнем напряжении является константой и не зависит от времени. Установившееся значение тока можно найти из выражения:

$$i_{\text{пр}} = \frac{E_C + E}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{тр}}}. \quad (3.10)$$

Учитывая, что $R_{\text{ш}}$ известно, а начальное значение тока $i(0+)$ можно определить по осциллограмме переходного процесса, из уравнения (3.11) определяем $R_{\text{кс}}$:

$$R_{\text{кс}} = \frac{E_C + E}{i(0+)} - R_{\text{ш}}. \quad (3.11)$$

Сопротивление $R_{\text{тр}}$ можно найти через отношение

$$\frac{i(0+)}{i_{\text{пр}}} = \frac{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{тр}}}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}} = 1 + \frac{R_{\text{тр}}}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}}, \quad (3.12)$$

так как значение $i_{\text{пр}} = \text{const}$ и его можно получить по осциллограмме при условии, что за время, отведенное на поляризацию, переходный процесс успел завершиться.

Численного расчет параметров схемы замещения $C_{гр}$, $R_{гр}$ и $R_б$ на примере зарегистрированного переходного процесса можно выполнить по выражениям [28]

$$R_{гр} = \left(\frac{i(0+)}{i_{нр}} - 1 \right) (R_{кс} + R_{ш}). \quad (3.13)$$

Емкость $C_{гр}$ можно найти по выражению:

$$C_{гр} = \frac{\tau}{R_э}. \quad (3.14)$$

Постоянная времени t определяется графически по осциллограмме.

$$i(t_1) = i_{нр} + A_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}};$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left(\frac{A_1}{i(t_1) - i_{нр}} \right)}. \quad (3.15)$$

Для более точного определения значения тока в нужных точках процесс записи осциллограммы разбивается на две части: включение и выключение напряжения. Отключение схемы от источника напряжения выполняется через 40 с – время, необходимое для подготовки осциллографа к записи следующего графика и вполне достаточное для того, чтобы переходный процесс завершился.

По осциллограмме определяются следующие значения.

Начальное значение тока непосредственно после коммутации:

$$i(0+) = \frac{u_{ш}(0+)}{R_{ш}}; \quad (3.16)$$

где, $u_{ш}(0+)$ – напряжение на шунте после включения источника.

Принужденная составляющая тока определяется непосредственно перед выключением источника:

$$i_{\text{пр}} = \frac{u_{\text{ш пр}}}{R_{\text{ш}}}; \quad (3.17)$$

где, $u_{\text{ш пр}}$ – напряжение на шунте непосредственно перед выключением источника.

Коэффициент A_1 можно найти как разность значений:

$$A_1 = i(0+) - i_{\text{пр}}; \quad (3.18)$$

Воспользовавшись выражениями (3.7) – (3.18) можно определить численные значения параметров диагностирования, по которым производится разделение железобетонных опор по степени коррозии. Применение генератора импульсов с повышенным быстродействием уменьшает методическую погрешность измерения временных параметров по осциллограммам, используемым для приведенных выше расчетов. [87, 88]

3.4 ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования по созданию армированных железобетонных образцов с геометрическими параметрами соответствующими толщине защитного слоя бетона опоры. Отмечены изменения цвета на участках поверхности железобетона, подверженные коррозии арматуры. Большая интенсивность цвета отмечена в местах создания искусственных трещин и количества электричества, прошедшего через арматурные стержни.

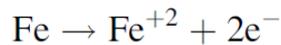
2. Приведена схема замещения границы раздела бетон-арматура-грунт. Выполнены экспериментальные исследования по определению параметров схемы замещения при различном количестве электричества, прошедшего через арматуру опор.

3. Разработана математическая модель и выполнено моделирование процессов на границе раздела металл-бетон-грунт. В программе Multisim исследованы временные параметры переходного процесса для определения составляющих сопротивления железобетонной опоры, влияющих на стекание токов утечки в грунт.

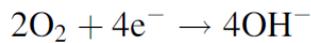
4. Выполнено моделирование коммутационного устройства и источника питания, для минимального влияния систематических погрешностей на определение параметров границы раздела, за счет применения быстродействующих ключей и источника с малым внутренним сопротивлением.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОНЕ

Коррозия бетона – это электрохимический процесс, поскольку он включает в себя как химические реакции, так и циркуляцию электрического тока, в которой реагенты электрические заряды (электроны и ионы). По сути, коррозия запускается, когда рН бетона на границе раздела со сталью падает до уровня ниже 8, растворяя пассивный слой, который образуется в высокощелочной водной фазе. В этих условиях атомы железа в стали преобразуются в положительно заряженные ионы (окисление), генерирующие избыток электронов в основном металле:

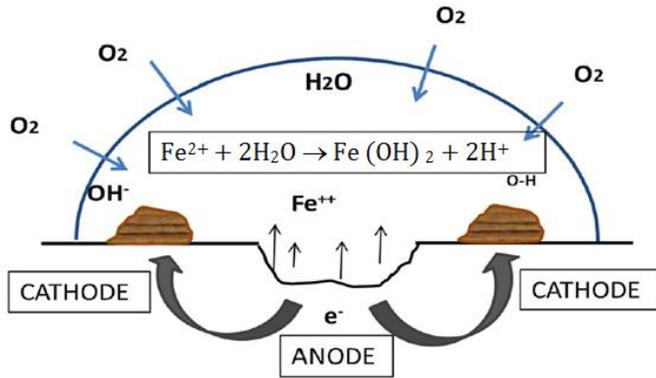
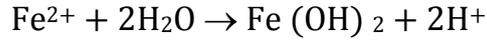


Чтобы сохранить свою электронейтральность, металл в прилегающих участках вызывает другую реакцию (восстановление), при которой в нейтральных и основных средах образуется растворенный кислород:



Как было показано в работе [89] в капельном эксперименте (рис. 4.1), коррозия начинается на атомном уровне с образования микроячеек. Когда каплю соленой воды оставляют на стали, ячейка, образующаяся в центре капли, является анодной, поскольку она содержит меньше кислорода, чем граница капли, которая становится катодной. Было доказано, что аноды и катоды образуются (рис. 4.1) путем добавления фенолфталеина (при восстановлении образуются гидроксилы, окрашивающие внешнюю сторону капли в розовый цвет) и сульфоцианида натрия (который при соединении с железом образует синий комплекс сульфоцианида железа). В дальнейшем цвета смешиваются в капле за счет образования множества нано- и микроэлементов.

Коррозия всегда влечет за собой локальное окисление железа в зонах воздействия.



a)



б)

Рисунок 4.1 – Основные реакции начальной коррозии в каплях, образование гидроксид-ионов в катодной зоне (а), начальное образование питтинговой коррозии в арматуре (б)

Критическое содержание хлоридов достигается, когда количество растворенных Fe^{++} ионов, генерирующих протоны за счет гидролиза воды, не могут быть нейтрализованы. Следовательно, соотношение Cl^-/OH^- определяет порог хлоридной коррозии. При хлоридном воздействии закисление носит локальный характер, поскольку воздействие локализовано, а остальные поры сохраняют свою щелочность, пассивируя остальную часть поверхности металла.

Более того, поляризация и более низкий потенциал, индуцированные образованием клеток, начиная с ямки, поляризуют окрестности по отношению к потенциалу ямки (рис. 4.2).

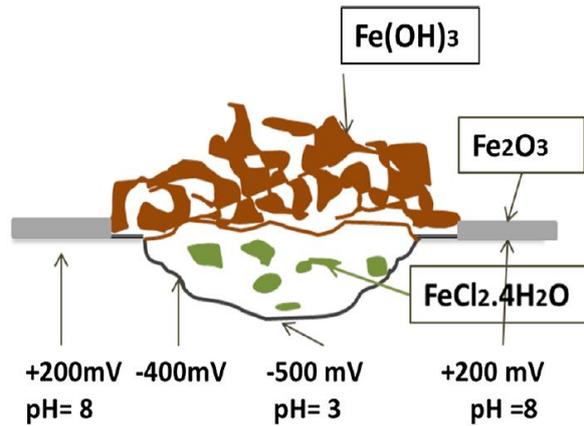


Рисунок 4.2 – Изменение электрохимического потенциала и pH в зоне питтинговой коррозии

4.1 РОЛЬ КИСЛОРОДА В ДЕПАССИВАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ КОРРОЗИИ

Как уже говорилось, в поровых растворах бетона обычно присутствует достаточное количество кислорода для поддержания пассивности. Несмотря на это, в щелочных средах он играет существенную роль в инициировании коррозии, но не в ее распространении. При наличии достаточно невысокого содержания хлоридов и кислорода в концентрации всего в несколько десятых частей на миллион достаточно, чтобы инициировать коррозию (локализованную в месте контакта кислорода с поверхностью металла). Несмотря на содержание O_2 1 ppm, коррозия была замечена, хотя даже при измеренных высоких скоростях коррозии, послетестовый визуальный осмотр стержней, погруженных в раствор, 2,5 % *NaCl* раствор выявил лишь спорадические коррозионные пятна и очень маленькие ямки. Брусочек, испытанный в течение 5 дней в 2,5 % *NaCl* (который имел более анодный потенциал показал отсутствия коррозии, по сравнению с образцом в 0,5 % растворе при катодном потенциале).

Ржавчина была более заметной в ходе 30-дневного испытания при 0,5 % *NaCl*. Продукты коррозии образовались вдоль линии на поверхности стержня, которая могла образоваться во время производства (таблица 4.1). Щелевая коррозия также наблюдалась по краю ленты, используемой для

разграничения рабочей зоны. Как в 0,5 %, так и в 2,5 % растворах $NaCl$ корродировали только участки с поверхностными дефектами, такими как швы или нахлесты. Эти несовершенства, по-видимому, являются предпочтительными местами для образования ямок. Высокие значения I_{corr} указывают на активную коррозию, даже если ржавчина не видна невооруженным глазом до тех пор, пока не достигнет определенных размеров (отсюда и более легкая видимость в течение месяца, чем в пятидневном эксперименте).

Когда потенциал не является спонтанным, а электрохимически индуцированным (потенциостатический тест), результаты приведены в таблице 2. При значениях потенциала, более катодных, чем -650 мВ (электрод $Ag/AgCl$), ямки не обнаруживаются. Ямки образуются при потенциале -550 мВ, а полностью сформировавшаяся коррозия, при потенциале -350 мВ.

Таблица 4.1 – Изменение скорости коррозии в зависимости от концентрации агрессивной среды и потенциала

Приложенный потенциал, мВ	Концентрация раствора $NaCl$, 0.5 %	
-650		
-550		
-350		

4.2 СОСТАВ ОБРАЗОВАВШЕЙСЯ РЖАВЧИНЫ

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).

Оксиды, участвующие в коррозии стали в бетоне, те же, что наблюдаются при ее коррозии в атмосфере, включая почти все наиболее распространенные оксиды железа, такие как магнетит, гетит и лепидокрокит, а в присутствии хлоридов - акаганеит. Учитывая такое разнообразие, все попытки связать состав оксидов в реальных условиях воздействия с механизмами коррозии оказались тщетными, поскольку состав постоянно колеблется в соответствии с балансом между кислотностью (в свою очередь, зависящей от концентрации ионов хлорида или бикарбоната) и доступностью кислорода. При воздействии природных сред состав и динамика присутствующих оксидов не являются ни предсказуемыми, ни показательными для скорости коррозии.

Снижение несущей способности железобетонных конструкций в условиях коррозии. При взаимодействии железобетонных конструкций с агрессивными средами в процессе эксплуатации происходит снижение несущей способности. В результате коррозионного разрушения под воздействием хлорсодержащих сред можно выделить несколько стадий [90, 91].

- 1) препятствие защитного покрытия проникновению агрессивных сред внутрь железобетонной конструкции в течение инкубационного периода;
- 2) проникание хлоридов внутрь железобетонных конструкций и распространение их по объему;
- 3) начальная стадия коррозии стальной арматуры;
- 4) развитие коррозионной деградации арматуры с уменьшением площади её сечения, образование продуктов коррозии;
- 5) наступление коррозионного растрескивания бетона вокруг корродирующей арматуры, распространение продуктов коррозии;
- 6) увеличение размеров трещины в бетоне от арматуры до поверхности конструктивного элемента;
- 7) отслаивание защитного слоя бетона под воздействием продуктов коррозии арматуры;
- 8) работа конструктивного элемента с отслоившимся защитным слоем и нарушение сцепления прокорродированной арматуры с бетоном;
- 9) разрушение конструктивного элемента при наступлении предельного состояния.

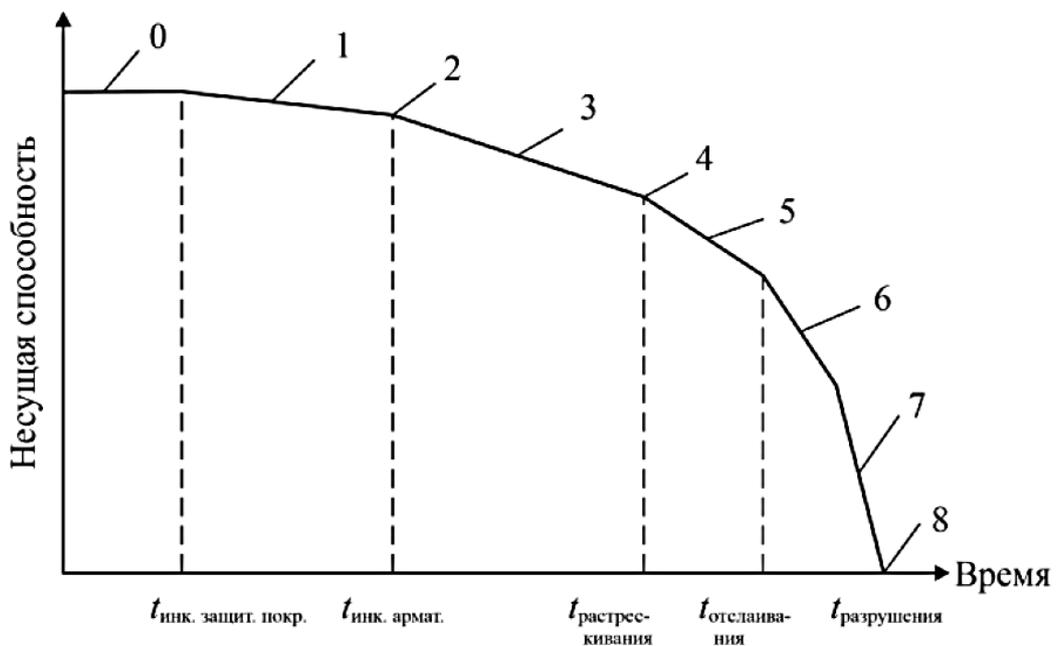


Рисунок 4.3 – Снижение несущей способности железобетонных конструкций при воздействии коррозии

Защита от коррозии стальной арматуры в железобетоне осуществляется при помощи пассивирующей пленки, состоящей из оксида железа, как правило Fe_2O_3 , которая формируется на поверхности арматуры при воздействии поровой влаги бетона. Коррозия арматурной стали начинается при разрушении пассивирующей пленки (процесс депассивации).

После наступления начальной фазы, коррозия арматуры развивается в бетоне и приводит к образованию ржавчины, которая увеличивает давление (а следовательно напряжение) в зоне сцепления арматуры и бетона. Распространение коррозии и ее продуктов (в основном гидроксиды железа, $Fe(OH)_2$ и $Fe(OH)_3$ занимают больший объем, чем арматура, оказывая давление на окружающий бетон (так называемый солевой домкрат).

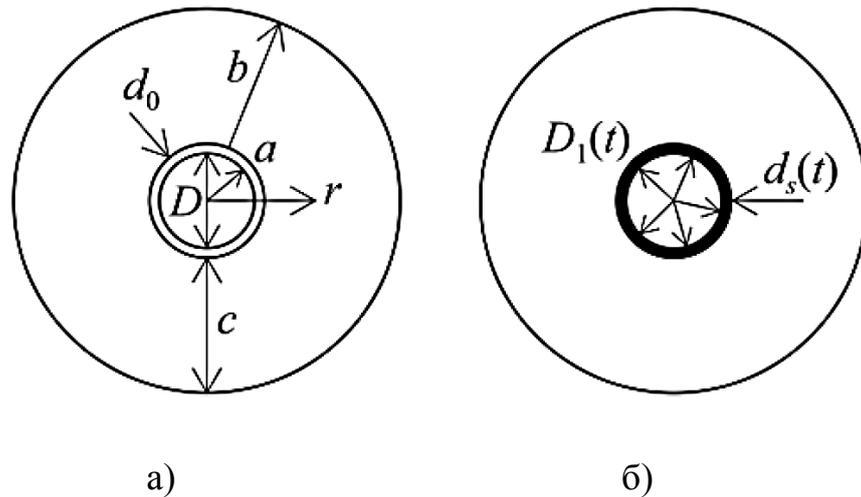


Рисунок 4.4 – Процесс распространения продуктов коррозии и образование трещин (а), давление продуктов коррозии на бетон (б)

Внутренний радиус бетонного цилиндра под действием продуктов коррозии может быть определен по выражению

$$a(t) = \left[D + \frac{2d_0}{2} \right] + d_s(t), \quad (4.1)$$

где D – диаметр арматуры, d_0 – толщина продуктов коррозии в зоне сцепления; a , b , c , – внутренний, наружный радиусы, защитный слой бетона; $d_s(t)$ – толщина продуктов коррозии.

$$d_s(t) = \frac{W_{rust}}{\pi(D + 2d_0)} \left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_r}{\rho_{st}} \right), \quad (4.2)$$

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

Когда ржавчина полностью заполняет пространство между бетоном и арматурой, последующий рост коррозии приведет к появлению растягивающих напряжений. W_{rust} можно определить измерением плотности тока коррозии I_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, и рассчитать по выражению (4.3):

$$W_{rust} = \left(\int_0^t 0,098 \frac{1}{\alpha_r} \pi D I_{corr} dt \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

Плотность тока коррозии I_{corr} для армированных железобетонных конструкций можно определить как

$$I_{corr} = 0,3683 \ln(t) + 1,1305, \quad (4.4)$$

где t – время в годах.

Растягивающее напряжение по теории упругости может быть получено следующим образом:

$$\sigma_c(t) = P_1(t) = \frac{2E_{ef}d_s(t)}{(D + 2d_0) \left(\frac{b^2 + a^2(t)}{b^2 - a^2(t)} + \nu_c \right)}, \quad (4.5)$$

где E_{ef} – эффективный модуль упругости бетона; b – внешний радиус толстостенного бетонного цилиндра; $a(t)$ – внутренний радиус толстостенного бетонного цилиндра; ν_c – коэффициент Пуассона для бетона.

Пороговое напряжение, необходимое для образования трещин в защитном слое бетона, определяется прочностью бетона на растяжение и толщиной защитного слоя и может быть выражено как:

$$\sigma_t = \frac{2cf_t}{D+2d_0}, \quad (4.6)$$

где f_t – прочность бетона на растяжение.

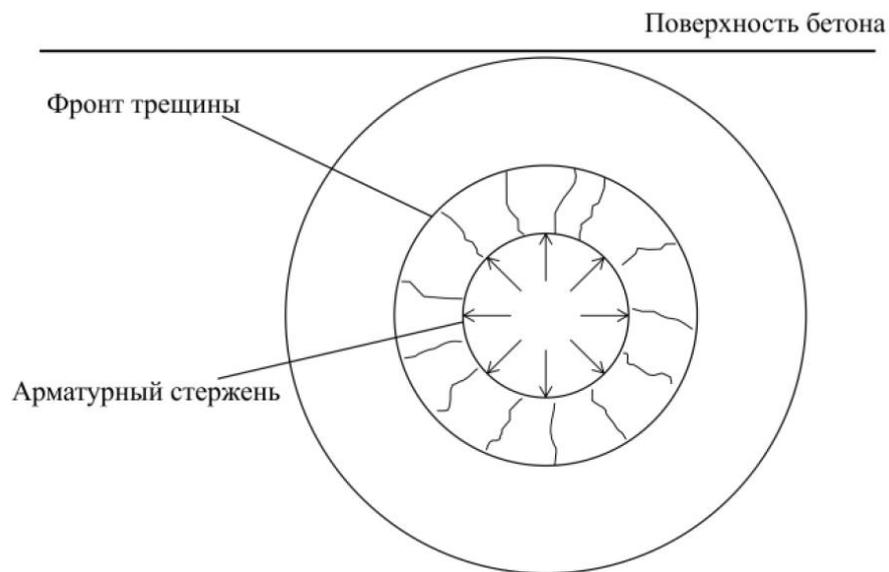


Рисунок 4.5 – Образование трещин в бетонном цилиндре при воздействии продуктов коррозии арматуры

4.3 ХИМИКО-ГИГРО-ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕТОНА

Разработанная математическая модель с учетом хемо-гигро-термомеханических явлений сочетает в себе физические и электрохимические процессы при механическом поведении бетона в процессе повреждения [92, 93]. Модель переноса капиллярной воды описывается с точки зрения объемной доли влаги в порах бетона:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla \cdot [D_w(\theta_w) \nabla \theta_w], \quad (4.7)$$

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 [92]:

$$\theta_w \frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_c(\theta_w, T) \nabla C_c] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_c - \frac{\partial C_{cb}}{\partial t}, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial C_{cb}}{\partial t} = k_r (\alpha C_c - C_{cb}), \quad (4.9)$$

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), k_r – скорость связывания коэффициент, α – постоянная равная 0,7.

Кислород до депассивации стали не участвует ни в каких химических реакциях, перенос кислорода в бетоне рассматривается как задача конвективной диффузии:

$$\theta_w \frac{\partial C_o}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_o(\theta_w) \nabla C_o] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_o, \quad (4.10)$$

где C_o – концентрация кислорода в поровом растворе (кг/м³ порового раствора), а $D_o(\theta_w)$ – эффективный коэффициент диффузии кислорода, зависящий от пористости бетона p_{con} и водонасыщенности бетона S_w .

Основываясь на законах тепло- массо- обмена и сохранения энергии, уравнение, которое описывает распределение температуры в пространстве выражается следующим образом:

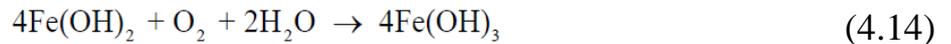
$$\lambda \Delta T + W(T) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (4.11)$$

где λ – теплопроводность (Вт/(м К)), c – теплоемкость единицы массы бетона (Дж/(К кг)), ρ – массовая плотность бетона (кг/м³) и W – внутренний источник нагрева (Вт/м³).

Коррозия стали активируется при депассивации стальной арматуры в бетоне. Немеханические процессы, важные для распространения коррозии стали в бетоне: (1) массовые потоки кислорода на поверхность стали вследствие катодной и анодной реакции, (2) плотность электрического тока через поровый раствор и (3) катодный и анодный потенциал. Потребление кислорода на катодной и анодной поверхностях происходит в результате следующих реакций – растворенного кислорода в поровой воде с электронами на катоде:



Движение гидроксил ионов к аноду, где формируются продукты коррозии



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

$$i_c = i_{0c} \frac{C_o}{C_{ob}} e^{2.3(\Phi_{0c} - \Phi)/\beta_c} \quad (4.15)$$

$$i_a = i_{0a} e^{2.3(\Phi - \Phi_{0a})/\beta_a} \quad (4.16)$$

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. Электрический ток

через электролит является результатом движения заряженных частиц и, если предполагается электронейтральность системы и равномерная концентрация ионов, можно записать как:

$$\mathbf{i} = -\sigma(S_w, p_{con}) \nabla \Phi \quad (4.17)$$

где σ – электропроводность бетона.

Скорость образования ржавчины J_r (кг/м²с) и масса гидратированной красной ржавчины на соответствующую поверхность (A_r) арматурного стержня m_r (кг) соответственно рассчитываются как:

$$\begin{aligned} J_r &= 5.536 \times 10^{-7} i_a \\ m_r &= J_r \Delta t A_r \end{aligned} \quad (4.18)$$

Распределение продуктов коррозии (красной ржавчины) R (кг/м³ порового раствора) в порах и через трещины в бетоне была математически сформулирована как задача конвективной диффузии

$$\theta_w \frac{\partial R}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_r \nabla R] + D_w (\theta_w) \nabla \theta_w \nabla R \quad (4.19)$$

где D_r – коэффициент диффузии (м²/с) продукта коррозии. Важно отметить, что уравнение (4.19) описывает не перенос красной ржавчины напрямую, а скорее распределение ржавчины образующейся в порах и трещинах бетона вследствие растворимых частиц, которые могут растворяться в поровом растворе бетона и в дальнейшем мигрируют в порах и трещинах, реагируя с кислородом в поровой воде [93].

Проверка математической модели аналогичной разработанной, выполнена в системе MatLab [94], позволяющей решать задачи в различных предметных областях [95].

На рисунке 4.6 представлены результаты компьютерного моделирования процесса разрушения железобетонной конструкции (ЖБК) с двумя стальными стержнями разного диаметра (10 и 14 мм) под воздействием оксидного домкрата в среде NaCl.

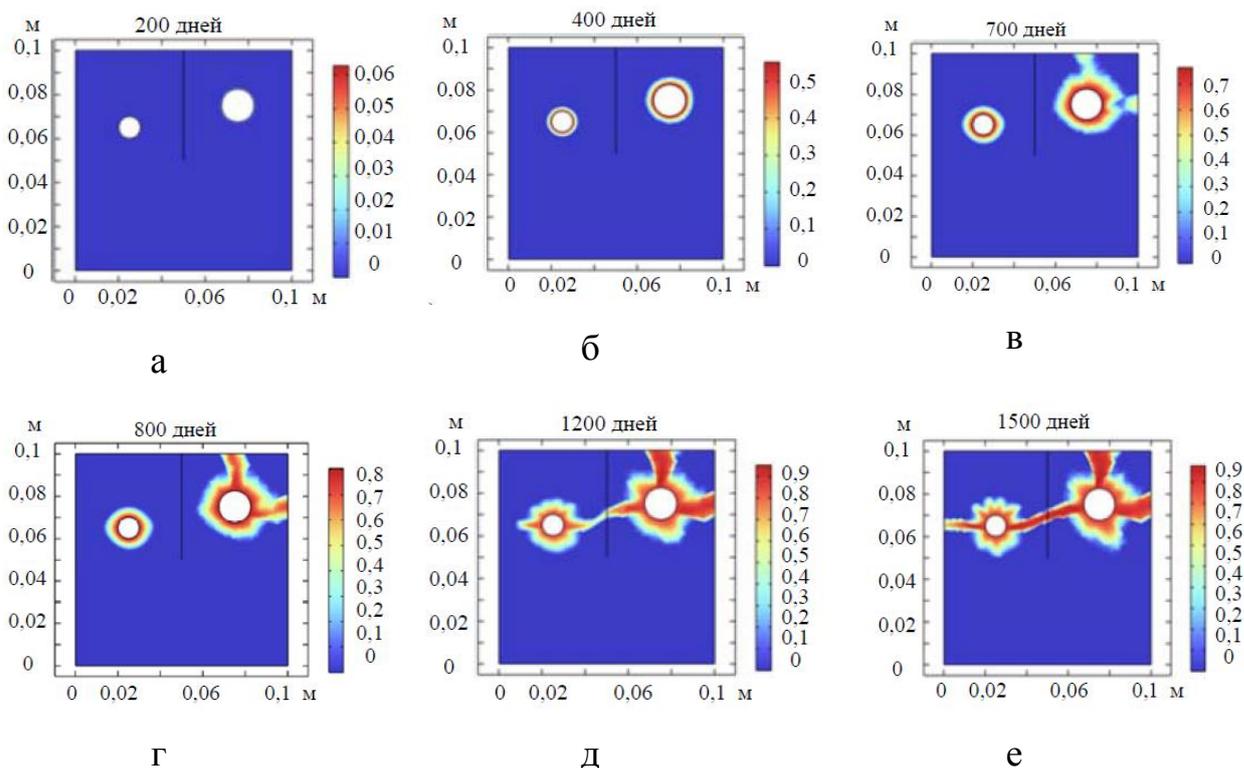


Рисунок 4.6 – Результаты моделирования образования трещин и распространения продуктов коррозии.

Время для моделирования процесса коррозии (взрыв ржавчины) задано в 1500 дней без подачи дополнительных потенциалов к арматуре. Из рисунка 4.6 а, видно, что через 200 дней процесс коррозии достаточно слабо повлиял на состояние ЖБК. Появление первых разрушений (через 400 дней) представлено на рисунке 4.6 б. То, что процесс разрушения достиг края ЖБК через 700 дней, видно на рисунке 4.6 в. На рисунке 4.6 г, видно начало процесса распространения разрушения по направлению к стержню меньшего диаметра. Рисунок 4.6 д, отражает слияние областей разрушения от стержней. На рисунке 4.6 е, видно, что процесс разрушения ЖБК от меньшего стержня меньшего диаметра достиг края.

4.4 ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Для изучения коррозионного состояния железобетонных опор, их прочностных характеристик было принято использовать теорию планирования эксперимента. Изучению влияния различных факторов на

изменение скорости коррозии были посвящены работы российских и зарубежных исследователей [1, 14-15, 98-99].

Розенфельд И. Л. и Персианцева В. П. показали, что хлорид натрия ($NaCl$), как агрессивный элемент, повышает скорость протекания коррозии. Причиной увеличения скорости коррозии являются образования хлористого натрия. Ионы хлора препятствуют образованию пассивирующих пленок на стальной арматуре. Агрессивное действие хлористого натрия в присутствии атмосферы следует также связывать, с его способностью адсорбировать влагу из окружающего воздуха. При относительной влажности воздуха 70%, хлористый натрий адсорбирует влагу, что проявляется в значительном увеличении скорости коррозии.

Продолжительность пребывания пленки влаги на поверхности металла в атмосфере, не загрязненной специфическими коррозионно-активными примесями, процесс коррозии возникает и развивается в том случае, если на поверхности металла присутствует слой влаги определенной толщины (10-20 молекулярных слоев), имеющая свойства электролита. Продолжительность протекания коррозионного процесса и количество металла, перешедшее в продукты коррозии, зависит от времени пребывания электролита на поверхности металла. Чем дольше находится пленка, на поверхности металла, или быстрее она возобновляется, тем дольше протекает процесс коррозии, и следовательно, тем большему коррозионному разрушению подвергается металл [20, 26, 40].

Скорость коррозии обычно возрастает с увеличением температуры, поскольку с ростом температуры увеличивается кинетика электрохимических реакций, сопровождающих коррозионный процесс.

Атмосферная коррозия, протекающая в верхних слоях электролитов, связана чаще всего с катодным ограничением. Температура изменяет скорость процесса главным образом благодаря изменению кинетики катодной реакции восстановления кислорода, скорость которой определяется диффузией к электроду кислорода.

Поскольку коэффициент диффузии кислорода с температурой растет, так как коэффициент диффузии изменяется по закону $D = RT / (6\pi r h)$, где R – постоянная Больцмана; r – радиус диффундирующей частицы; h – вязкость среды, а толщина диффузионного слоя уменьшается вследствие усиления конвекции, то повышение температуры должно привести к росту предельного диффузионного тока и, следовательно, скорости коррозии. Необходимо, однако, иметь в виду, что при коррозии металлов в атмосфере с изменением температуры меняется длительность контакта электролита с металлом. Поэтому общий коррозионный эффект зависит от изменения кинетики электродных реакций и от изменения времени пребывания электролита на поверхности металла.

В работе [94] в качестве факторов, влияющих на образование продуктов коррозии на поверхности ЖБ изделий, были изучены основные факторы, которые можно имитировать в лабораторных условиях.

В качестве таких факторов были приняты:

- концентрация агрессивных элементов (водный раствор $NaCl$);
- пористость бетонного камня (в том числе наличие трещин);
- время; - температура окружающей среды.

В качестве зависимой переменной использовалась относительная интенсивность спектральной линии железа, которое входит в соединения основных продуктов коррозии (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $FeOOH$), сопровождающих разложение арматурных стержней. В качестве приборного обеспечения использовались два вида спектрометров для определения концентрации соединений железа на поверхности бетона.

Недостатком проведенных исследований явилось определение концентрации продуктов коррозии на поверхности, что косвенным образом говорит об изменении сечения арматурных стержней.

Продолжением исследований может быть создание регрессионной модели, связывающей влияющие факторы с выходным параметром – изменением сечения арматурных стержней при воздействии коррозии.

Таким образом, новые выбранные влияющие факторы представлены таблице 4.2, где так же представлены верхние и нижние уровни влияющих факторов, и их кодированные значения.

Таблица 4.2 Уровни факторов и параметры варьирования

Фактор	Значение			Шифр фактора	Размерн.	Шаг варьиров.
	min	сред.	max			
Код	-1	0	+1			
Время электролиза, T	40	60	80	X_1 (A)	час	20
Сила тока, I	200	400	600	X_2 (B)	мА	200
Площадь трещин, S	0	2	4	X_3 (C)	мм ²	2
Концентрация раствора NaCl, C	1	2	3	X_4 (D)	%	1

Подготовку эксперимента и статистическую обработку данных проводили в программной среде *STATISTICA 6.0*.

Исследование степени влияния четырех факторов выполнили с использованием полного факторного эксперимента с количеством опытов 16. Выполнили оптимизацию исходных данных, и применив смешивание факторов, уменьшили количество опытов до восьми. Воспользовавшись алгоритмом двухуровневого плана Бокса – Хантера рассчитали его схему с кодированием факторов, представленных на рис. 4.7, а также привели случайное представление опытов с соблюдением правила ортогональности [22, 27].

Планир. план	План: 2 ^{**} (4-1) план (Факторы бетон ГВВ)			
	A	B	C	D
3	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000
2	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000
6	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000
7	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000
5	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000
4	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
8	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
1	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000

Рисунок 4.7 – Кодированные значения факторов для проведения эксперимента.

Проведение натурального эксперимента описано в разделе 3.1. Изменение сечения арматурных стержней определяли рентгенографическим способом, путем обработки изображений арматурного стержня, при сочетании соответствующих независимых влияющих факторов, представлены в таблице 4.3 и на рисунке 4.8. Изменение площади арматурного стержня приведено в относительных единицах, так минимальному значению 0,68 соответствует значение площади в 68% от начального значения (100% соответствует площадь 78,5 мм², диаметр арматурного стержня 10 мм).

Таблица 4.3 – Изменение независимых и зависимого факторов

№пп	Время	Ток	Трещина	Среда	Площадь
1	80	600	0	1	0.90
2	40	600	4	1	0.78
3	40	600	0	3	0.96
4	80	200	0	3	0.93
5	80	600	4	3	0.68
6	80	200	4	1	0.70
7	40	200	4	3	0.82
8	40	200	0	1	0.95

Данные: Факторы бетон ГВВ (5v * 8с)					
Влияние факторов на изм. сечения арматуры в бетоне					
	1 Время	2 Ток	3 Трещина	4 Среда	5 Площадь
1	80	600	0	1	0,900
2	40	600	4	1	0,780
3	40	600	0	3	0,960
4	80	200	0	3	0,930
5	80	600	4	3	0,680
6	80	200	4	1	0,700
7	40	200	4	3	0,820
8	40	200	0	1	0,950

Рисунок 4.8 – Значения относительных интенсивностей при сочетаниях влияющих факторов.

По умолчанию, *STATISTICA* подгоняет простую модель главных эффектов без учета взаимодействий. Первая колонка чисел в таблице результатов, приведенной на рис. 4.9, содержит *Оценки эффектов*. Значения этих параметров могут быть интерпретированы как отклонения от среднего для отрицательных данных, и для положительных данных соответствующих факторов. Так, например, при наличии трещины с изменением от минимального (минус 1) до максимального значения (плюс 1), площадь сечения арматуры уменьшается в среднем на 0,19 единиц (перед коэффициентом стоит знак минус).

Вторая колонка чисел содержит *Коэффициенты эффектов*. Эти коэффициенты позволяют предсказывать изменение относительной интенсивности для новых установок факторов с помощью уравнения:

$$y_{pred} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 \dots; \quad (4.20)$$

где y_{pred} – предсказываемое значение зависимой переменной; x_1 до x_7 – значения факторов; b_1 до b_7 – соответствующие коэффициенты; b_0 – свободный член или (общее) среднее.

Подводя итоги, результаты выглядят следующим образом: присутствие трещины ($b_3 = -0,095$) и время воздействия от возникновения коррозии ($b_1 = -0,038$) наибольшим образом влияют на появление коррозии, а соответственно уменьшению площади сечения арматуры в бетоне.

Фактор	Оценки эффектов; R-кв.=1, ь (Факторы бетон ГВВ) 4 двухуров. фактора(ов) 3П Площадь	
	Эффект	Козф.
Сред/Св.член	0,840000	0,840000
(1)Время	-0,075000	-0,037500
(2)Ток	-0,020000	-0,010000
(3)Трещина	-0,190000	-0,095000
(4)Среда	0,015000	0,007500
1 на 2	-0,005000	-0,002500
1 на 3	-0,035000	-0,017500
1 на 4	-0,010000	-0,005000

Рисунок 4.9 – Расчет эффектов и коэффициентов регрессии модели

Парные корреляции факторов с зависимой переменной наглядно можно проанализировать в таблице, представленной на рисунке 4.10. В последней колонке представлены значения коэффициента парной корреляции между выходной переменной (Площадь) и всеми влияющими факторами, а так же их взаимодействиями. Наибольшее влияние на выходную переменную имеют следующие факторы – наличие трещины в бетоне (Трещина) $r_{xy} = -0,91$ и время протекания коррозии (Время) $r_{xy} = -0,36$. Среди расчетных факторов, полученных в результате линейного взаимодействия второго и третьего порядка, наибольшее влияние оказывают 1*3 (Время*Трещина) $r_{xy} = -0,17$; 2*4 (Ток*Среда) $r_{xy} = -0,17$.

Фактор	Корреляции факторов и переменных (Факторы бетон ГВВ) 2**(4-1) план										
	(1) Время	(2) Ток	(3) Трещина	(4) Среда	1 на 2	1 на 3	1 на 4	2 на 3	2 на 4	3 на 4	Площадь
(1)Время	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,36
(2)Ток	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,10
(3)Трещина	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,91
(4)Среда	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
1 на 2	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,02
1 на 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	-0,17
1 на 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-0,05
2 на 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-0,05
2 на 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	-0,17
3 на 4	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,02
Площадь	-0,36	-0,10	-0,91	0,07	-0,02	-0,17	-0,05	-0,05	-0,17	-0,02	1,00

Рисунок 4.10 – Парные корреляции факторов

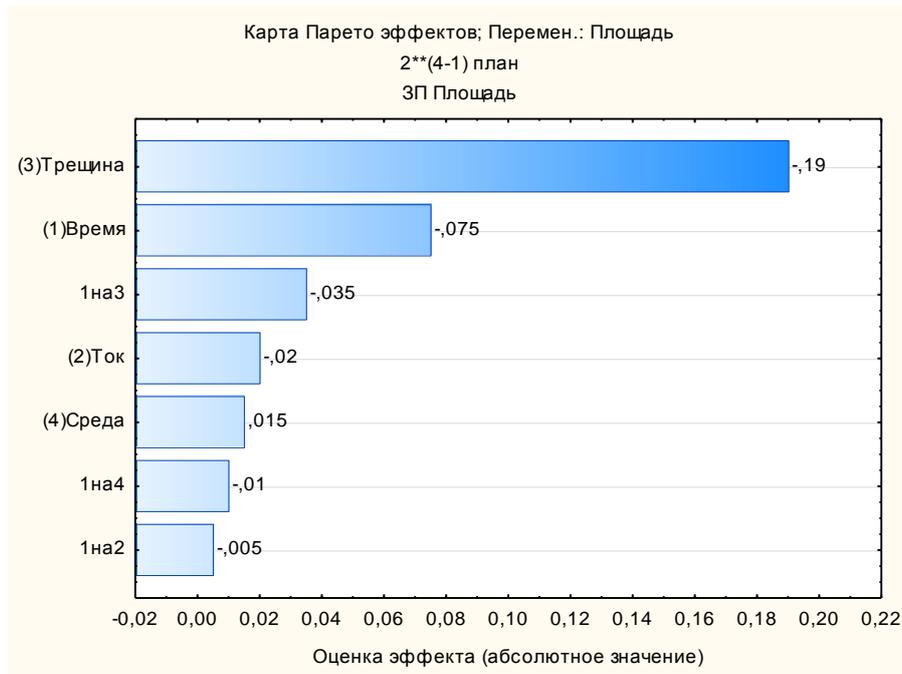


Рисунок 4.11 – Диаграмма Парето значимости влияющих факторов

Наглядное изображение значимости влияющих факторов показано на диаграмме Парето для уровня значимости $p = 0,05$, представленной на рисунке 4.11. Таким образом, результирующая линейная модель зависимости относительной интенсивности от четырех факторов с учетом взаимодействия 2-го и 3-го порядка может быть представлена выражением:

$$\begin{aligned}
 y_{pred} = & 0,840 - 0,038x_1 - 0,010x_2 - 0,095x_3 + 0,008x_4 - 0,003x_1x_2 \\
 & - 0,018x_1x_3 - 0,005x_1x_4
 \end{aligned}
 \quad (4.21)$$

Качество полученной математической модели представлено на рисунке 4.12, а соответствующие численные значения на рис. 4.13. Остаточный член (дисперсия) по всем анализируемым опытам составила $SS = 0,0009$, а остаточная дисперсия отклонений ($\delta_{ад} = 2,12\%$).

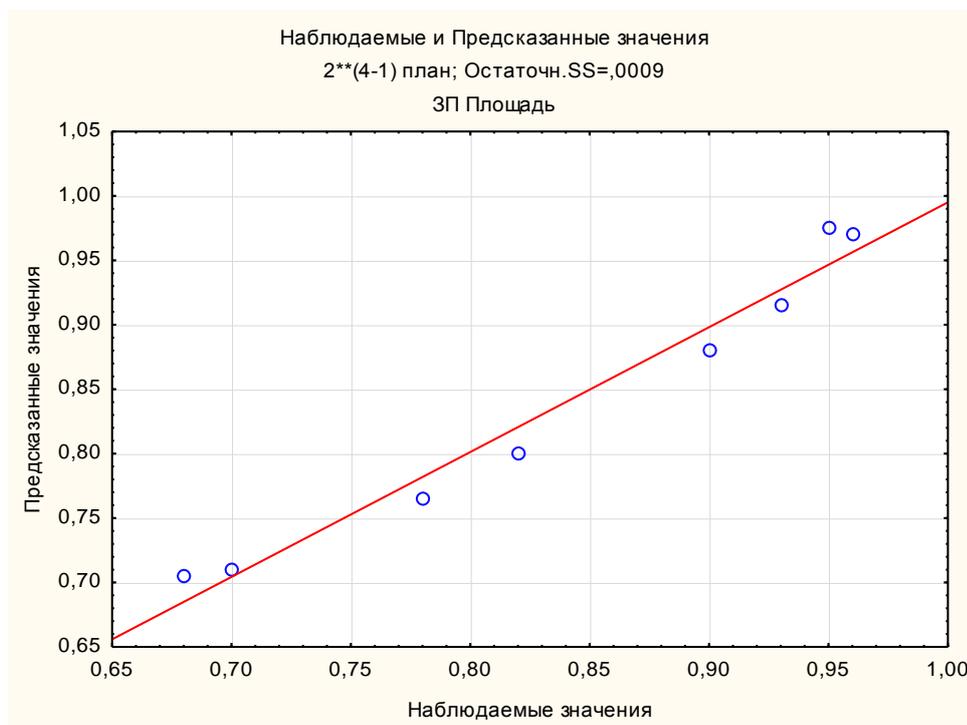


Рисунок 4.12 – Наблюдаемые и предсказанные значения

Центральное композиционное планирование

Выражение (4.21) с численными значениями представляет линейную модель с четырьмя влияющими факторами. Необходимо проверить линейность конечной зависимости ввиду сложности процессов влияния факторов на выходную величину – изменение сечения арматурных стержней, характеризующего развитие процесса коррозии.

Наблюд. план	Наблюдаемые, предсказанные значения и остатки (Факторы бетон ГВВ) 2**(4-1) план; Остаточн. SS=,0009 ЗП Площадь		
	Наблюдае	Предск.	Остатки
1	0,900000	0,880000	0,020000
2	0,780000	0,765000	0,015000
3	0,960000	0,970000	-0,010000
4	0,930000	0,915000	0,015000
5	0,680000	0,705000	-0,025000
6	0,700000	0,710000	-0,010000
7	0,820000	0,800000	0,020000
8	0,950000	0,975000	-0,025000

Рисунок 4.13 – Численное выражение наблюдаемых и предсказанных значений

При помощи программной среды *STATISTICA 6.0*, исследуем более сложную модель в виде центрального композиционного планирования с учетом возможного нелинейного влияния факторов на выходную величину.

Ортогональные планы. Важной характеристикой любого плана является независимость оценок главных эффектов и взаимодействий интересующих нас факторов. Пусть имеются двухфакторные эксперименты с факторами на двух уровнях. План состоит из четырех опытов с факторами *A* и *B*.

Два первых опыта проводятся с факторами *A* и *B*, установленными на верхних уровнях (+1). В последующих двух факторах они установлены на нижних уровнях (-1). Необходимо оценить влияние независимых вкладов факторов *A* и *B* на интересующую нас зависимую переменную. Такой план является упрощенным, поскольку он не позволяет оценить главные эффекты ни для *A*, ни для *B*. Оценке поддается только один эффект – разница между опытами 1 плюс 2 и опытами 3 плюс 4, представляет собой комбинацию эффектов *A* и *B*.

Для оценки независимых вкладов двух факторов, их уровни в четырех опытах должны быть установлены так, чтобы «столбцы» плана были независимыми друг от друга. При этом столбцы матрицы плана (а их столько, сколько имеется параметров главных эффектов и взаимодействий, которые желательно определить) должны быть *ортогональными*.

Поэтому при выборе стандартных центральных композиционных планов является находение планов, которые ортогональны или почти ортогональны.

Ротатабельные планы. Второе положение заключается в том, что нужно сделать, чтобы наилучшим образом получить максимальное количество несмещенной информации из плана. Можно показать, что стандартная ошибка предсказания значений зависимой переменной пропорциональна (выражение 4.22):

$$(1 + f(x)' * (X'X)^{-1} * f(x))^{1/2} \quad (4.22)$$

где $f(x)$ обозначает эффекты факторов соответствующей модели ($f(x)$ – вектор, $f(x)'$ транспонированный вектор), X – матрица плана; $X'X^{-1}$ – инверсная матрица векторного произведения. Количество неопределенности в предсказании значений зависимой переменной зависит от вариабельности точек плана и их ковариаций между опытами. (Заметим, что эта величина обратно пропорциональна определителю матрицы $X'X$).

Таким образом, желательно выбрать план, чтобы извлечь наибольшую информацию о зависимой переменной и получить наименьшую неопределенность для прогноза ее будущих значений. Из приведенного выражения следует, что количество информации обратно пропорционально нормализованной неопределенности.

Для простого ортогонального плана с 4-мя опытами, приведенного ранее, информационная функция равна:

$$I_x = 4 / (1 + x_1^2 + x_2^2); \quad (4.23)$$

где x_1 и x_2 обозначают соответственно уровни факторов A и B . Видно, что информационная функция постоянна на концентрических окружностях с центрами в начале координат. Таким образом, любое вращение исходных точек плана дает то же самое количество информации, то есть, то же значение информационной функции. Следовательно, ортогональный план «2 на 2» из 4 опытов, рассмотренный ранее, является ротатабельным.

Чтобы оценить нелинейные компоненты (квадратичные, второго порядка) соотношений между факторами и зависимой переменной, необходимо иметь, по крайней мере, 3 уровня соответствующих факторов. Так же выглядит информационная функция для простого факторного плана размером «3 на 3» в квадратичной модели. Очевидно, что эта функция выглядит более сложно, содержит дополнительные значения с высокой плотностью в угловых областях, и, не является постоянной на окружностях. Это означает, что при различных вращениях точек плана будет извлекаться разное количество информации.

Звездные точки и ротатабельные планы второго порядка. При добавлении так называемых звездных точек к простым (квадратным или кубическим) двухуровневым факторным планам можно получить ротатабельные, а иногда и ортогональные или почти ортогональные планы. Например, добавление к простому ортогональному плану размером «2 на 2», следующего ряда точек приведет к ротатабельному плану.

Таблица 4. 4 – Построение ротатабельного плана

№ опыта	<i>A</i>	<i>B</i>	№ опыта	<i>A</i>	<i>B</i>
1	1	1	6	1,414	0
2	1	-1	7	0	-1,414
3	-1	1	8	0	1,414
4	-1	-1	9	0	0
5	-1,414	0	10	0	0

Первые четыре опыта в этом плане, как показано в таблице 4.4, являются точками факторного плана «2 на 2» (или *квадратичными точками*, или *кубическими точками*); опыты с пятого по восьмой являются так называемыми *звездными точками* или *осевыми точками*, а опыты девятый и десятый – центральными точками.

Возвращаясь к опытам с исследованием коррозии арматуры в бетоне, рассмотрим таблицу с влияющими факторами. Общее число экспериментов, предложенное программой STATISTICA в режиме ЦКП равно 26 с добавлением «звездных» и «нулевых точек». Данные приведены в таблице 4.5 с последующим переносом в программу.

На рисунке 4.14 а приведен план проведения эксперимента методом центрального композиционного планирования (ЦКП) с 4 факторами, который содержит 26 опытов, включая 16 – полный факторный эксперимент, 8 – опыты в «звездных» точках и две точки в «центре» плана. Такое количество опытов должно дать исчерпывающую информацию в случае нелинейной зависимости выходной величины от рассматриваемых факторов.

Таблица 4.5 – Значения факторов и зависимой переменной, полученной в опытах

№пп	Время	Ток	Трещина	Среда	Площадь
1	40	200	0	1	0,90
2	40	200	0	3	0,87
3	40	200	4	1	0,80
4	40	200	4	3	0,76
5	40	600	0	1	0,88
6	40	600	0	3	0,75
7	40	600	4	1	0,72
8	40	600	4	3	0,71
9	80	200	0	1	0,90
10	80	200	0	3	0,89
11	80	200	4	1	0,70
12	80	200	4	3	0,64
13	80	600	0	1	0,88
14	80	600	0	3	0,86
15	80	600	4	1	0,68
16	80	600	4	1	0,62
17	20	400	2	2	0,82
18	100	400	2	2	0,70
19	60	100	2	2	0,79
20	60	800	2	2	0,71
21	60	400	0	2	0,89
22	60	400	6	2	0,58
23	60	400	2	0,5	0,86
24	60	400	2	4	0,70
25	60	400	2	2	0,78
26	60	400	2	2	0,79

На рисунке 4.14 б приведены значения факторов и отклик зависимой переменной – изменение относительной площади поперечного сечения арматурного стержня.

Планир. план	2**(4) центр. комп. план, пс=16 ns=8 п0=	A	B	C	D
1		-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000
2		-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000
3		-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000
4		-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000
5		-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000
6		-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000
7		-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
8		-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
9		1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000
10		1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000
11		1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000
12		1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000
13		1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000
14		1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000
15		1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
16		1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
17		-2,00000	0,00000	0,00000	0,00000
18		2,00000	0,00000	0,00000	0,00000
19		0,00000	-2,00000	0,00000	0,00000
20		0,00000	2,00000	0,00000	0,00000
21		0,00000	0,00000	-2,00000	0,00000
22		0,00000	0,00000	2,00000	0,00000
23		0,00000	0,00000	0,00000	-2,00000
24		0,00000	0,00000	0,00000	2,00000
25 (H)		0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
26 (H)		0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

а)

Данные: Таблица ЦКП ГВВ 2024 (5v * 26с)					
	1	2	3	4	5
	Время	Ток	Трещина	Среда	Площадь
1	40	200	0	1,0	0,90
2	40	200	0	3,0	0,87
3	40	200	4	1,0	0,80
4	40	200	4	3,0	0,76
5	40	600	0	1,0	0,88
6	40	600	0	3,0	0,75
7	40	600	4	1,0	0,72
8	40	600	4	3,0	0,71
9	80	200	0	1,0	0,90
10	80	200	0	3,0	0,89
11	80	200	4	1,0	0,70
12	80	200	4	3,0	0,64
13	80	600	0	1,0	0,88
14	80	600	0	3,0	0,86
15	80	600	4	1,0	0,68
16	80	600	4	3,0	0,62
17	20	400	2	2,0	0,82
18	100	400	2	2,0	0,70
19	60	100	2	2,0	0,79
20	60	800	2	2,0	0,71
21	60	400	0	2,0	0,89
22	60	400	6	2,0	0,58
23	60	400	2	1,0	0,86
24	60	400	2	4,0	0,70
25	60	400	2	2,0	0,78
26	60	400	2	2,0	0,79

б)

Рисунок 4.14 – Построение плана эксперимента методом ЦКП с 4 факторами:

а) кодированные значения, б) натуральное выражение

Математическая модель включает полином второй степени с парными влияниями факторов:

$$y_{pred} = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_{2i} x_i^2 + \sum_{i=1}^4 a_{1i} x_i + \sum_{i \neq j}^4 \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_i x_j . \quad (4.24)$$

Оценки регрессионных коэффициентов модели (4.24) от влияния четырех факторов представлены на рисунке 4.15. Программой отмечены значимые факторы – наличие трещины (Трещина) ($a_{11} = -0,041$), концентрация раствора (Среда) ($a_{21} = -0,049$), время (Время) ($a_{22} = 0,0011$) все первой степени. В представленном наборе данных некоторые факторы

оказались вырожденными и при факторах второго порядка оказались на незначимом уровне, что подтвердило линейность модели. Среди парных влияний следует отметить взаимодействие Трещина*Среда ($a_{34} = 0,069$), остальные факторы явились не значимыми.

Оценки эффектов; R-кв.=,96142;Скор.,6528 (План: 4 факторы, 1 Блоки (Таблица ЦКП ГВВ 2024) в Факторы б 4 факторы, 1 Блоки; Остаточн.SS=,0021125 ЗП Площадь: Средние										
Фактор	Эффект	Ст.Ош.	t(1)	p	-95,%		Коэф.	Ст.Ош. Коэф.	+95,%	
					Дов.Пред	Дов.Пред			Дов.Пред	Дов.Пред
Сред/Св.член	0,803750	0,022981	34,97459	0,018197	0,511749	1,095751	0,803750	0,022981	0,511749	1,095751
(1)Время (L)	0,010000	0,045962	0,21757	0,863615	-0,574002	0,594002	0,005000	0,022981	-0,287001	0,297001
(2)Ток (L)	-0,067500	0,032500	-2,07692	0,285666	-0,480452	0,345452	-0,033750	0,016250	-0,240226	0,172726
(3)Трещина (L)	-0,102500	0,032500	-3,15385	0,195471	-0,515452	0,310452	-0,051250	0,016250	-0,257726	0,155226
(4)Среда (L)	-0,026250	0,042993	-0,61056	0,651039	-0,572534	0,520034	-0,013125	0,021497	-0,286267	0,260017
1L на 4L	0,026250	0,042993	0,61056	0,651039	-0,520034	0,572534	0,013125	0,021497	-0,260017	0,286267
2L на 3L	0,002500	0,032500	0,07692	0,951125	-0,410452	0,415452	0,001250	0,016250	-0,205226	0,207726
2L на 4L	-0,017500	0,032500	-0,53846	0,685547	-0,430452	0,395452	-0,008750	0,016250	-0,215226	0,197726
3L на 4L	0,027500	0,032500	0,84615	0,552929	-0,385452	0,440452	0,013750	0,016250	-0,192726	0,220226

Рисунок 4.15 – Оценки эффектов математической модели ЦКП с 4 факторами

Регрессия; R-кв.=,96142;Скор.,6528 (Таблица ЦКП ГВВ 2024) 4 факторы, 1 Блоки; Остаточн.SS=,0021125 ЗП Площадь								
Фактор	Регрес. Коэф.	Ст.Ош.	t(1)	p	-95,%		+95,%	
					Дов.Пред	Дов.Пред	Дов.Пред	Дов.Пред
Сред/Св.член	1,007500	0,173503	5,80683	0,108568	-1,19706	3,212059		
(1)Время (L)	-0,001062	0,002437	-0,43590	0,738308	-0,03203	0,029909		
(2)Ток (L)	-0,000088	0,000199	-0,43965	0,736302	-0,00262	0,002441		
(3)Трещина (L)	-0,040625	0,024375	-1,66667	0,344042	-0,35034	0,269089		
(4)Среда (L)	-0,048750	0,074467	-0,65465	0,630990	-0,99494	0,897441		
1L на 4L	0,000656	0,001075	0,61056	0,651039	-0,01300	0,014313		
2L на 3L	0,000003	0,000041	0,07692	0,951125	-0,00051	0,000519		
2L на 4L	-0,000044	0,000081	-0,53846	0,685547	-0,00108	0,000989		
3L на 4L	0,006875	0,008125	0,84615	0,552929	-0,09636	0,110113		

Рисунок 4.16 – Коэффициенты регрессионной модели ЦКП с 4 факторами



Рисунок 4.17 – Диаграмма оценок эффектов в методе ЦКП

Парные корреляции факторов с зависимой переменной наглядно можно проанализировать в таблице, представленной на рисунке 4.18. В последней колонке представлены значения коэффициента парной корреляции между выходной переменной (Интенсивность) и всеми влияющими факторами, а так же их взаимодействиями. Наибольшее влияние на выходную переменную имеют следующие факторы – наличие трещин (Трещина L) $r_{xy} = -0,78$, наличие тока утечки (Ток L) $r_{xy} = -0,58$ и время эксперимента (Время L) $r_{xy} = 0,52$. Для квадратичных коэффициентов модель оказалась вырожденной, что подтверждает отсутствие нелинейности. Среди расчетных факторов, полученных в результате линейного взаимодействия первого порядка, наибольшее влияние оказывают 1*3 (Время*Трещина) $r_{xy} = 0,35$; 1*4 (Время*Среда) $r_{xy} = 0,27$; 2*3 (Ток *Трещина) $r_{xy} = 0,23$. Отрицательные значения коэффициентов можно объяснить обратной пропорциональностью зависимости.

Корреляции факторов и переменных (Таблица ЦКП ГВВ 2024)															
4 факторы, 1 Блоки															
Фактор	Время (L)	Время (K)	Ток (L)	Ток (K)	Трещина (L)	Трещина (K)	Среда (L)	Среда (K)	1L на 2L	1L на 3L	1L на 4L	2L на 3L	2L на 4L	3L на 4L	Площадь
(1)Время (L)	1,00	0,00	-0,41	0,00	-0,41	0,00	0,00	0,00	-0,41	-0,41	0,00	0,41	0,00	0,00	0,52
Время (K)	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(2)Ток (L)	-0,41	0,00	1,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	-0,67	0,17	0,00	-0,17	0,00	0,00	-0,58
Ток (K)	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(3)Трещина (L)	-0,41	0,00	0,17	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,17	-0,67	0,00	-0,17	0,00	0,00	-0,78
Трещина (K)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(4)Среда (L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	-0,60	0,00	-0,20	-0,20	-0,30
Среда (K)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1L на 2L	-0,41	0,00	-0,67	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	1,00	0,17	0,00	-0,17	0,00	0,00	0,16
1L на 3L	-0,41	0,00	0,17	0,00	-0,67	0,00	0,00	0,00	0,17	1,00	0,00	-0,17	0,00	0,00	0,35
1L на 4L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,60	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	-0,20	-0,20	0,27
2L на 3L	0,41	0,00	-0,17	0,00	-0,17	0,00	0,00	0,00	-0,17	-0,17	0,00	1,00	0,00	0,00	0,23
2L на 4L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,20	0,00	0,00	0,00	-0,20	0,00	1,00	0,20	-0,08
3L на 4L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,20	0,00	0,00	0,00	-0,20	0,00	0,20	1,00	0,16
Площадь	0,52	0,00	-0,58	0,00	-0,78	0,00	-0,30	0,00	0,16	0,35	0,27	0,23	-0,08	0,16	1,00

Рисунок 4.18 – Парные корреляции факторов

Результирующая линейная модель зависимости относительной интенсивности от четырех факторов с учетом взаимодействия второго порядка и полинома второй степени, для уровня значимости $p = 0,05$, может быть представлена выражением

$$y_{pred} = 1,008 - 0,0011 x_1 - 0,041 x_3 - 0,0488 x_4 - 0,007 x_3 x_4 \quad (4.25)$$

Качество полученной математической модели представлено на рисунке 4.19, а численные значения остатков на рисунке 4.20. Остаточный член (дисперсия) по всем анализируемым опытам составил $SS = 0,0021$

($\delta_{ад} = 4,75 \%$). По сравнению с моделью первого порядка получилась несколько большая погрешность, что можно объяснить большим количеством опытов, погрешностями измеренных значений на начальном этапе исследований, несостоятельностью нелинейности в модели.

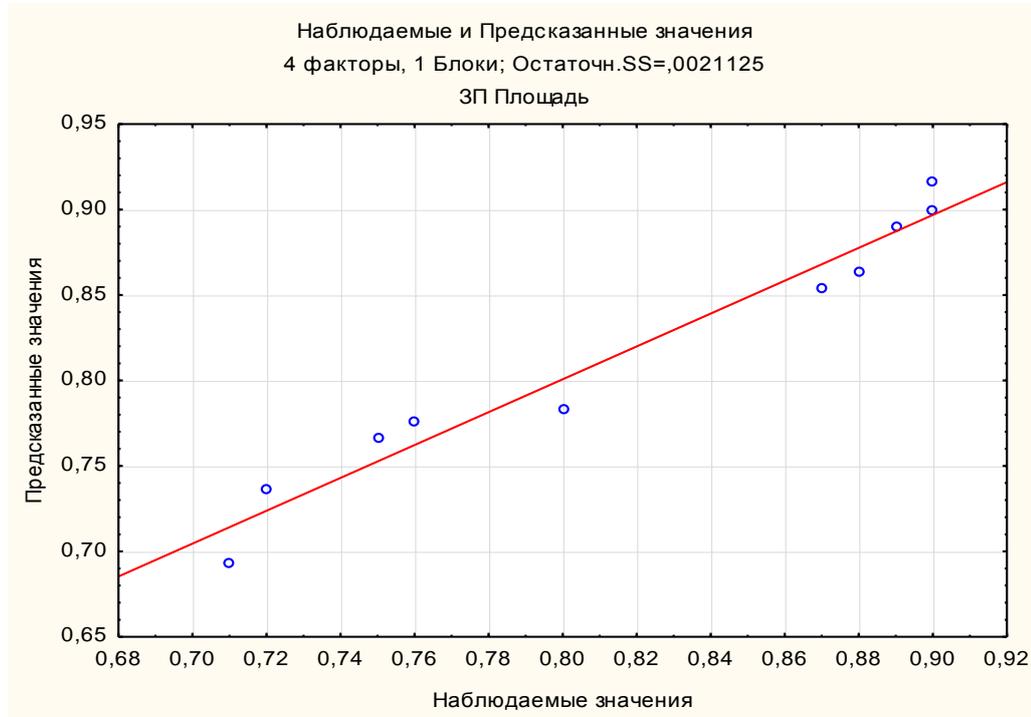


Рисунок 4.19 – Наблюдаемые и предсказанные значения

Факторы бетон ГВВ ЦКП 2024* - Наблюдаемые, предсказанные значения и остатки (Таблица ЦП)			
Наблюдаемые, предсказанные значения и остатки (Таблица ЦКП ГВВ 2024) 4 факторы, 1 Блоки; Остаточн.SS=,0021125 ЗП Площадь			
Наблюд. план	Наблюдае	Предск.	Остатки
1	0,900000	0,916250	-0,016250
2	0,870000	0,853750	0,016250
3	0,800000	0,783750	0,016250
4	0,760000	0,776250	-0,016250
5	0,880000	0,863750	0,016250
6	0,750000	0,766250	-0,016250
7	0,720000	0,736250	-0,016250
8	0,710000	0,693750	0,016250
9	0,900000	0,900000	0,000000
10	0,890000	0,890000	0,000000

Рисунок 4.20 – Таблица остатков математической модели

Построенные поверхности отклика зависимой переменной – относительного изменения площади сечения арматуры в зависимости от наиболее значимых факторов, описанных выше, показаны на рисунках 4.21, 4.22, 4.23 [153].

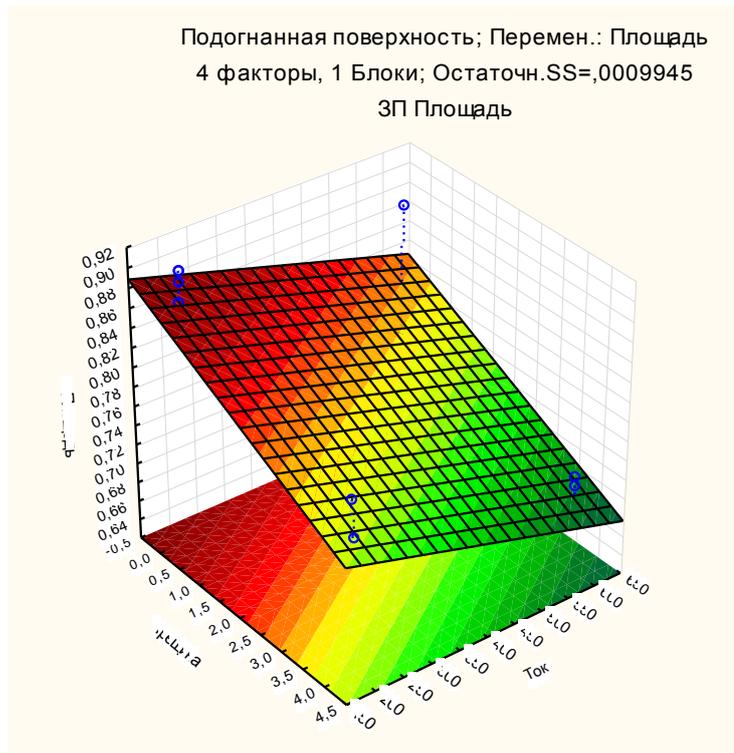


Рисунок 4.21 – Анализ поверхности отклика в зависимости от факторов «Трещина» и «Ток»



Рисунок 4.22 Анализ поверхности отклика в зависимости от факторов «Среда» и «Трещина»

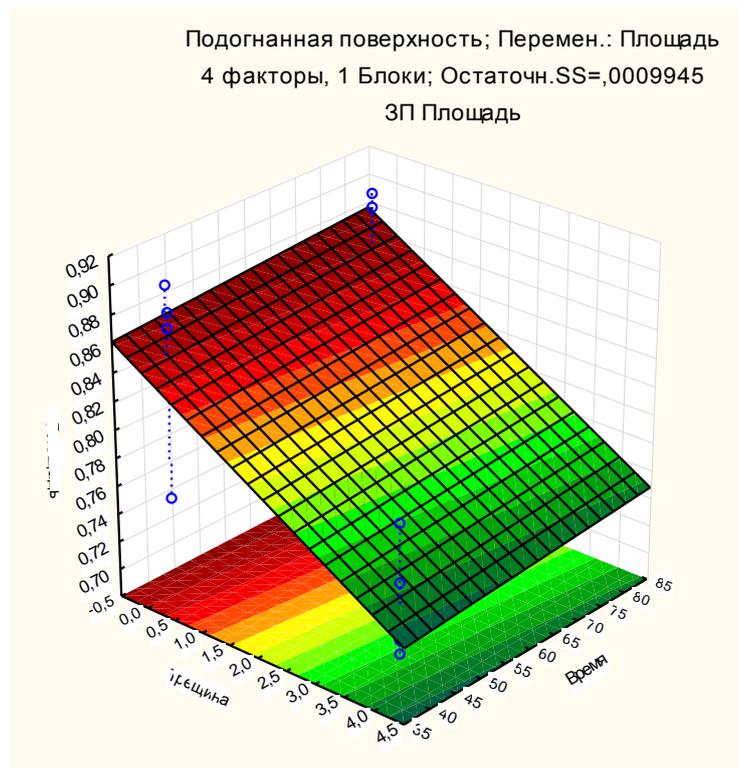


Рисунок 4.23 – Анализ поверхности отклика в зависимости от факторов «Трещина» и «Время»

4.5 ВЫВОДЫ

1. Методами математического моделирования процесс распространения продуктов коррозии представлен тремя стадиями. На первой стадии наблюдается перемещение влаги, кислорода, агрессивных соединений, содержащих хлор от поверхности к арматурному стержню. На второй стадии происходит разрушение пассивирующей пленки, зарождение и развитие коррозии с переходом твердой фазы металла арматуры в окисленное состояние, возникновение механических напряжений и разрушения бетонного камня. На третьем этапе наблюдается обратное движение продуктов коррозии от арматурного стержня к поверхности бетона. Движение оксидов железа происходит по порам бетонного камня и в большей степени по возникающим трещинам сквозного и не сквозного характера.

2. По количеству продуктов коррозии на поверхности бетона и площади, занимаемой продуктами коррозии возможно определить изменение

сечения арматурного стержня. До настоящего времени в нормативных документах не приводились значения уменьшения сечения арматуры под защитным слоем бетона, поскольку отсутствовали методы достоверного определения деградации в следствии коррозии. В то же время такие рекомендации приводятся для открытых металлических конструкций, для которых критические значения уменьшения сечения в следствии коррозии, определяющие прочность составляют 20%.

3. Методами планирования эксперимента определены факторы, влияющие на уменьшение сечения арматурных стержней на различных стадиях коррозии. Наибольшее влияние на уменьшение сечения арматурных стержней оказали наличие трещин и время электролиза. В силу большого числа влияющих факторов, нелинейная модель с большим количеством факторов и их смешения оказалась несостоятельной с вырождением до линейной формы.

4. Таким образом, актуальными становятся исследования с разработкой относительно не сложных методов определения концентрации продуктов коррозии на поверхности бетона и дальнейшего определения уменьшения сечения арматуры.

5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОПОРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

5.1 РАЗРАБОТКА МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

В настоящее время железобетонные конструкции находят широкое применение на электрифицированном транспорте. Однако по некоторым причинам происходит снижение срока службы опор контактной сети, и потеря ими несущей способности. Это приводит к разрушению контактной сети, что влечет за собой крупные экономические потери. Основной причиной разрушения опор контактной сети является электрохимическая коррозия стальной арматуры железобетонной конструкции, которую вызывают блуждающие токи.

В контактной сети широко используются изоляторы, которые предназначены для изоляции токоведущих частей контактной сети. Но при возникновении механических повреждений и пробоев изоляторов, вызванных атмосферными перенапряжениями и химическими процессами в конструкции, возникает ток утечки, который протекает с изоляторов в землю через железобетонную опору контактной сети [89]. Токи утечки, суммируясь в земле, создают поле блуждающих токов электрифицированного рельсового транспорта.

К настоящему времени физико-химические и механические процессы разрушения железобетона при коррозии арматуры достаточно хорошо изучены. Защита арматуры от коррозии в железобетонных конструкциях в значительной степени основана на пассивирующем действии щелочной среды, образующейся в процессе гидратации и твердения цементного камня. Из-за пористой структуры бетона его защитный слой не в состоянии оградить полностью арматуру от внешней среды. Бетон проницаем для различных

веществ, в том числе для воды и кислорода [90]. В большинстве случаев коррозия арматуры в бетоне представляет собой электрохимический процесс.

Основной причиной снижения прочностных характеристик железобетона является коррозия стальной арматуры, находящейся в бетоне. Попадание внешних агрессивных сред (хлориды, сульфаты), приводит к коррозии арматуры и, как следствие, разрушению бетона [91, 7].

Существующие методы диагностирования железобетонных опор КС помогают решить задачу диагностирования, но имеют ряд недостатков [27]:

метод откопки опор является трудозатратным из-за откопки опоры и влияния человеческого фактора;

индуктивный метод также требует откопки опоры; влияние на показание прибора внешнего электромагнитного поля; невозможность диагностирования через арматурную сетку; влияние изменения толщины защитного слоя и усилия прижима датчика; наличие коррозии определяется по косвенным показателям;

акустический и электрохимический методы определяют наличие коррозии по косвенным признакам;

вибрационный метод позволяет диагностировать лишь надземную часть, тем самым не определяя наличие и степень коррозии.

Известно устройство для определения количественного состава продуктов коррозии арматуры на труднодоступных поверхностях железобетонных изделий на основе лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Сущность устройства заключается в том, что через вентиляционное отверстие внутрь железобетонной опоры опускается волоконно-оптический кабель (ВОК), на конце которого закреплена фокусирующая оптика. ВОК с фокусирующей оптикой перемещают вдоль внутренней поверхности опоры и делают необходимое количество измерений количественного состава продуктов коррозии [6, 79].

Недостатком устройства является невозможность точного наведения лазера на предполагаемый дефект и невозможность отсчета координат предполагаемого дефекта.

Целью предлагаемого технического решения является повышение качества изображения, за счет устранения колебаний положения гибкого оптического зонда при его вертикальном перемещении, повышения уровня автоматизации процесса диагностирования с регистрацией координат дефектов и документального подтверждения в виде пополняемой базы данных изображений объекта диагностирования – внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети от поверхности грунта до их основания.

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.

Предлагаемое техническое решение поясняется чертежом (рис. 5.1), где представлена функциональная схема, содержащая мехатронный комплекс для диагностирования коррозионного состояния железобетонной опоры контактной сети методом оптического сканирования ее внутренней поверхности.

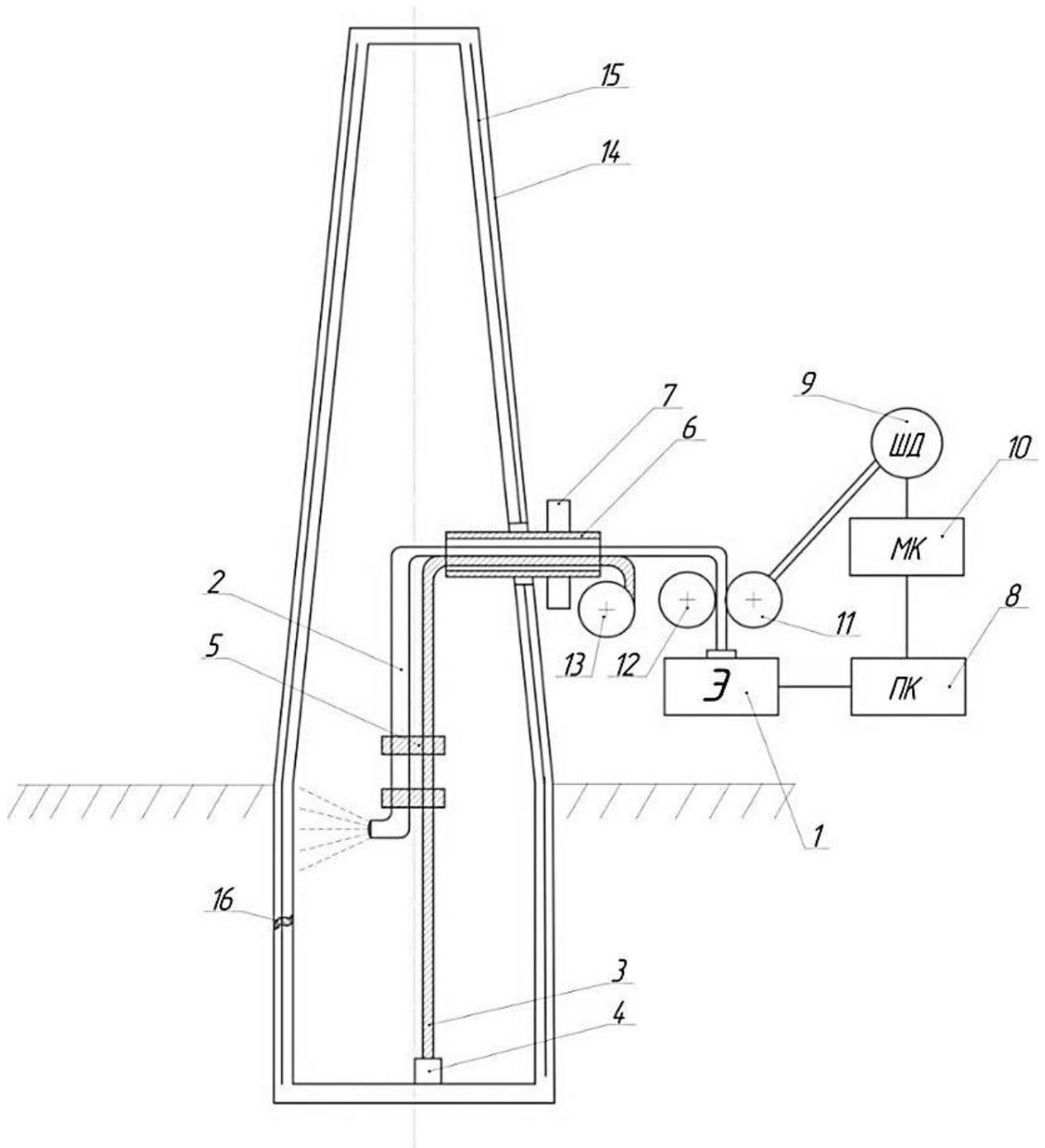


Рисунок 5.1 – Устройство диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети

На (рис. 5.1) изображены: видеозендоскоп 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 видеозэндоскопа 1 соединен с направляющим тросом 3 при помощи фиксирующих колец 5.

Направляющий трос 3, одним концом закрепленный на катушке 13, к другому концу которого прикреплен груз 4, пропущен во внутреннее отверстие направляющей трубки 6. На наружной поверхности направляющей трубки 6 неподвижно закреплено ограничительное кольцо 7. Во внутреннее отверстие направляющей трубки 6 так же помещается гибкий оптический зонд 2 видеозэндоскопа 1. Конец гибкого зонда 2 со стороны дистальной части закреплен с направляющим тросом 3 при помощи фиксирующих колец 5. Со стороны монитора видеозэндоскопа 1, гибкий оптический зонд 2 пропущен между приводным 11 и прижимным 12 роликами. Приводной ролик 11 соединен с выходным валом шагового двигателя 9, электрически связанного с выходом микроконтроллера 10, вход которого связан с универсальным последовательным портом ввода-вывода (порт USB не обозначен) управляющего персонального компьютера 8, к другому универсальному последовательному порту ввода-вывода персонального компьютера 8 подключен выход видеозэндоскопа 1.

Работа устройства диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети реализуется путем взаимодействия мехатронного комплекса с объектом диагностирования – железобетонной опорой контактной сети (рис.4.1), со стальными арматурными стержнями 15 и возможным коррозионным дефектом 16, установленной в грунт, и формированием диагноза ее коррозионного состояния [93].

Взаимодействие мехатронного комплекса с объектом диагностирования осуществляется следующим образом. В технологическое отверстие железобетонной опоры контактной сети 14 устанавливается направляющая трубка 6 до упора с ограничительным кольцом 7 таким образом, чтобы внутренний ее конец находился на центральной оси железобетонной опоры 14. Направляющий трос 3, одним концом

закрепленный на катушке 13, пропускается во внутреннее отверстие направляющей трубки 6 таким образом, чтобы закрепленный к другому концу направляющего троса 3 груз 4 опустился до нижнего основания железобетонной опоры. Во внутреннее отверстие направляющей трубки 6 также помещается гибкий зонд 2 видеозэндоскопа 1 дистальный конец, которого при помощи фиксирующих колец 5 соединяется с направляющим тросом 3, обеспечивая скользящий контакт, тем самым обеспечивая стабилизацию положения дистальной головки при видеосъемке.

Гибкий оптический зонд 2 видеозэндоскопа 1 позиционируется внутри железобетонной опоры в автоматическом режиме при помощи электропривода, содержащего приводной 11 и прижимной 12 ролики, шаговый двигатель 9, микроконтроллер 10 и управляющий персональный компьютер (ПК) 8. Программное обеспечен ПК 8 позволяет перемещать гибкий оптический зонд 2 видеозэндоскопа 1 вертикально вверх и вниз, регистрируя координаты перемещения. Перемещение и остановка осуществляется, таким образом, чтобы обеспечить регистрацию непрерывного изображения внутренней поверхности от технологического отверстия, расположенного выше уровня земли до основания железобетонной опоры, расположенного ниже уровня земли. Набор изображений передается управляющим блоком видеозэндоскопа 1 в управляющий персональный компьютер 8.

Шаговые двигатели успешно применяются в различных устройствах управления. Благодаря блоку управления подсчитывается число импульсов, подаваемых на обмотки двигателя для определения точного перемещения рабочего органа. В предлагаемом устройстве шаговый двигатель используется для вертикального перемещения гибкого зонда вниз и вверх для осуществления оптического контроля внутренней поверхности опор контактной сети.

В качестве автоматизированного электропривода использован шаговый двигатель (ШД), управляемый от микроконтроллера (МК) [94]. Для

реализации мехатронного комплекса был выбран четырехфазный шаговый двигатель типа 28BYJ-48 – бесколлекторный двигатель, вращение вала осуществляется дискретными шагами. На роторе, расположен постоянный магнит, а вокруг него расположены обмотки статора, при поочередной подаче импульсов на эти обмотки, создается магнитное поле, которое отталкивает или притягивает магнитный вал, тем самым заставляя двигатель вращаться. Такая конструкция позволяет с большой точностью управлять валом, относительно обмоток.

Основные технические характеристики двигателя 28BYJ-48:

- Номинальное напряжение питания: DC 5 В;
- Угловой шаг: 5,625 градуса;
- Передаточное отношение редуктора: 1/64;
- Частота следования импульсов: 100 Гц;
- Крутящий момент: 0,3 Н м;
- Диапазон рабочих температур: 0...+55 °С;
- Относительная влажность: 5...95 % (без образования конденсата);
- Интерфейсный разъём: 5 pin;
- Габаритные размеры устройства: 42 x 32 x 28 мм;

Для макетирования работы шаговый двигатель подключался к автоматизированной станции NI Elvis II. Управляющая программа прототипа мехатронного комплекса для NI Elvis II была разработана в среде LabView [95]. Приложение, созданное в программной среде LabView называется виртуальным прибором (Virtual Instrument) и состоит из двух частей:

1) лицевой панели, представляющей визуализацию интерфейса виртуального инструмента (рис. 5.2);

2) блочной диаграммы, представляющей программу виртуального инструмента (рис. 5.3).

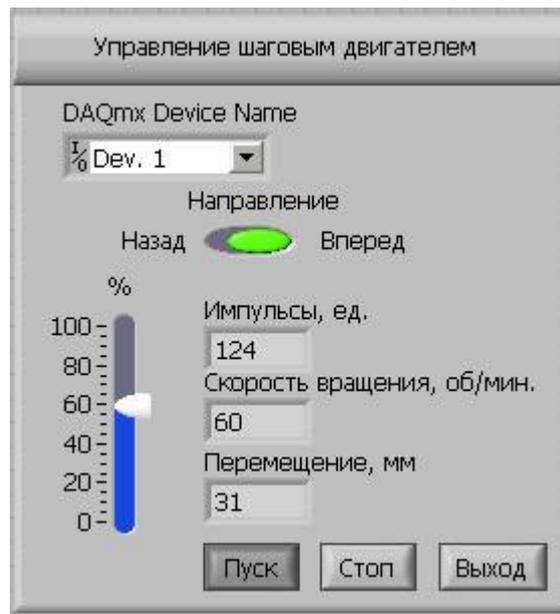


Рисунок 5.2 – Лицевая панель разработанного VI

На (рис. 5.2) приведены следующие элементы управления:

- 1 – шкала управление частотой вращения шагового двигателя (для выбранного шагового двигателя максимальная частота равна 100 об/мин);
- 2 – тумблер управления вращения шагового двигателя (вперед – по часовой стрелке, назад - против часовой стрелки);
- 3 – поле, отображающее количество импульсов, выданных на двигатель, после запуска программы;
- 4 – поле, отображающее текущее значение перемещения оптического зонда;
- 5 – поле, показывающие, текущее значение скорости вращения шагового двигателя;
- 6 – поле выбора порта подключения лабораторной станции NI Elvis II.

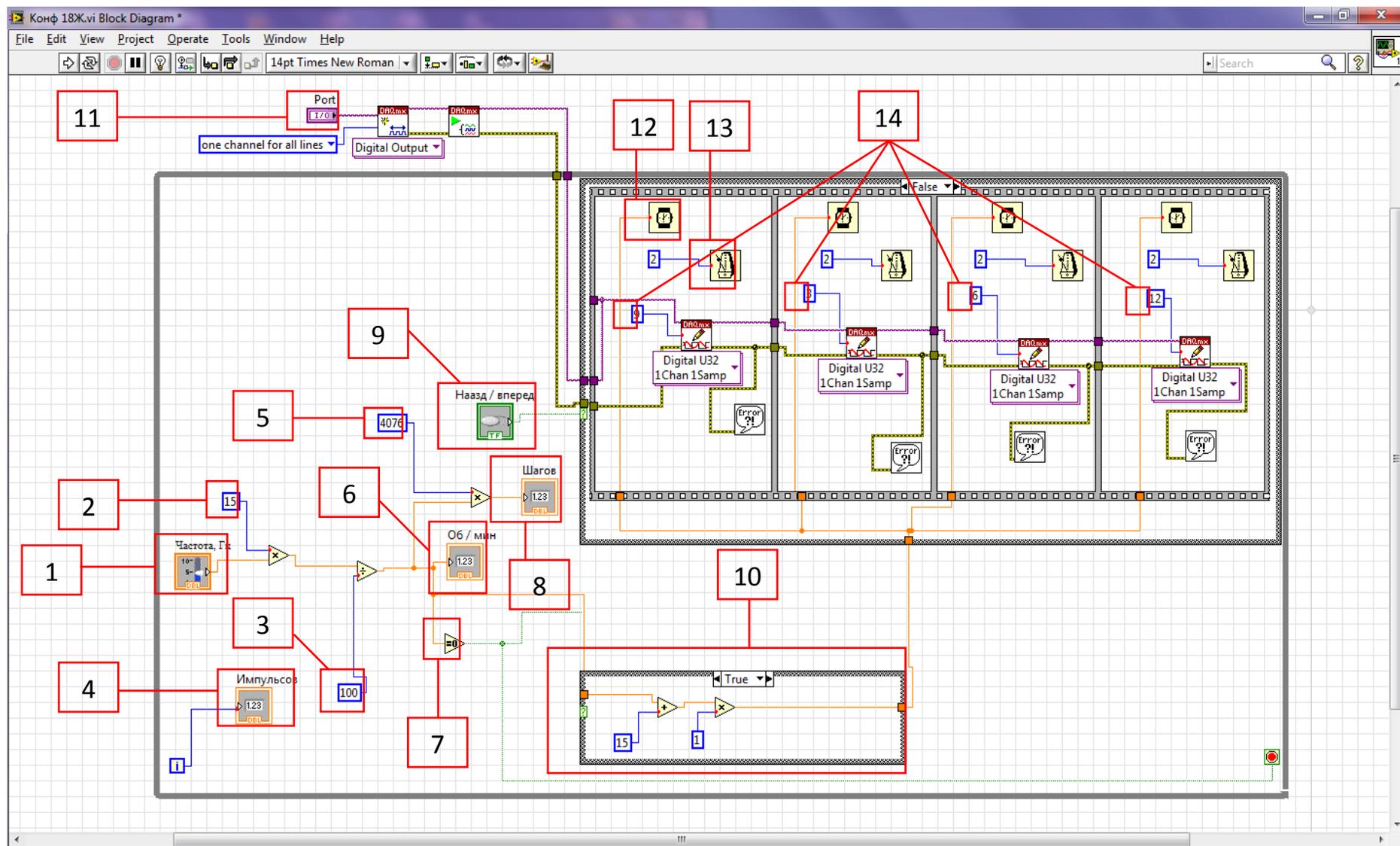


Рисунок 5.3 – Блок диаграмма разработанного VI

На (рис. 5.3) приняты следующие обозначения:

- 1 – Значение выбранной частоты следования тактовых импульсов;
- 2 – Максимальное число оборотов в минуту;
- 3 – Максимальная частота следования тактовых импульсов;
- 4 – Отображение числа импульсов в форме;
- 5 – Максимальное число шагов за 1 оборот;
- 6 – Отображение числа оборотов в минуту;
- 7 – Условие (если число равно 0, то программа прекращает работу, если число больше 0, то срабатывает заданное условие);
- 8 – Отображение числа шагов;
- 9 - Кнопка управления вращения шагового двигателя;
- 10 – Блок проверки условия (правда / ложь);
- 11 – Отображение порта подключения лабораторной установки NI Elvis II;
- 12 – Блок управления скоростью вращения шагового двигателя;
- 13 – Блок задержки в системе.

Фотография прототипа устройства управления ШД на основе NI Elvis II представлена на (рис. 5.4).

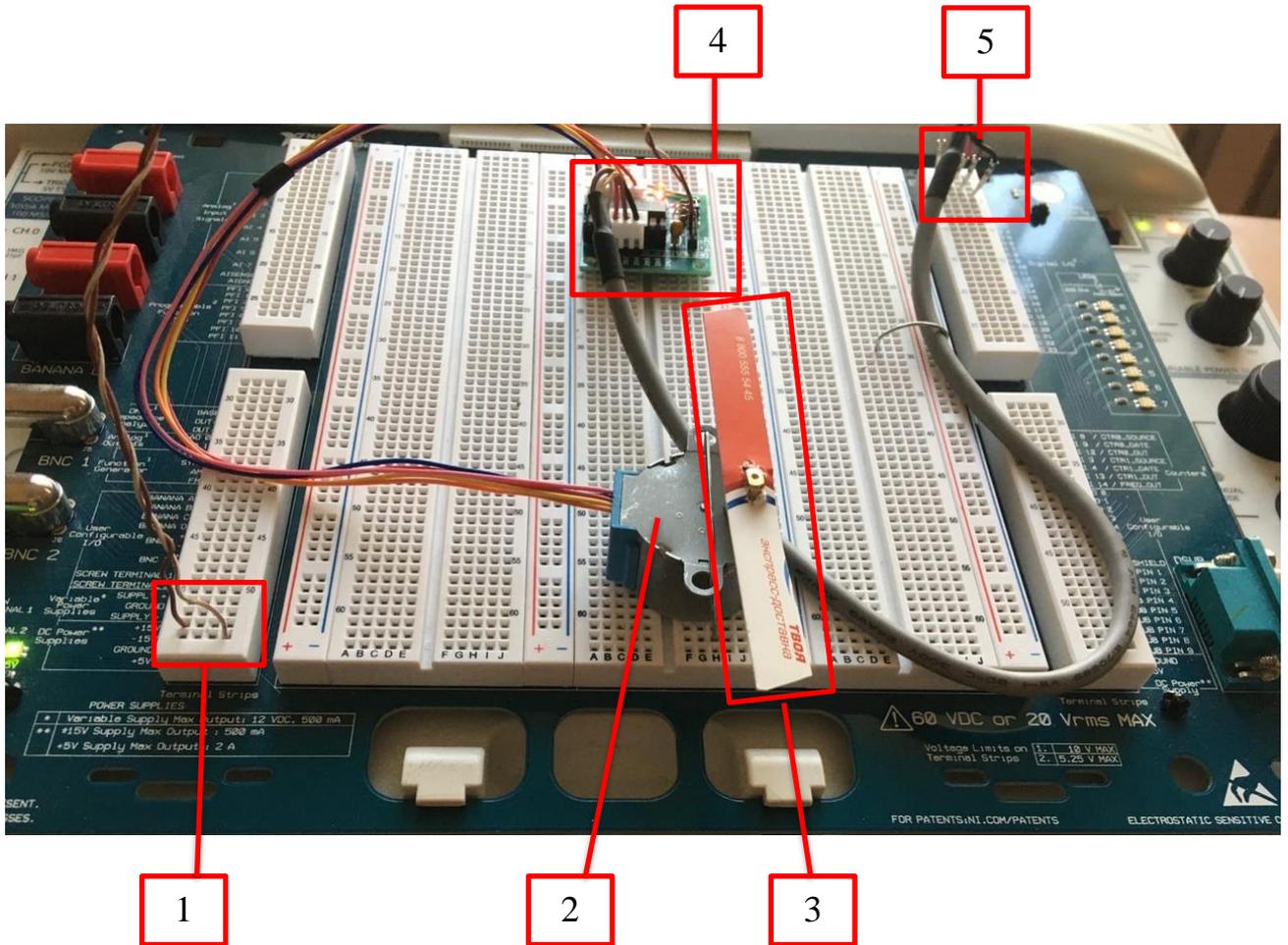


Рисунок 5.4 – Фотография прототипа устройства управления ШД

На (рис. 5.4) приняты следующие обозначения:

1 – выводы для подключения источника напряжения 5В и заземления; 2 – шаговый двигатель 28BYJ-48; 3 – указатель вращения; 4 – контроллер управления ШД; 5 – выводы для подключения к порту цифровых вводов-выводов DIO NI Elvis II.

В таблице 5.1 приведены данные для передачи двоичных кодов на порты цифровых вводов-выводов для вращения ШД по часовой стрелке (вперед) и против часовой стрелки (назад).

Таблица 5.1 – Коды управления ШД:

Вращение вперед				
Цвет провода	X1	X2	X3	X4
Белый	1	1	0	0
Красный	0	1	1	0
Коричневый	0	0	1	1
Черный	1	0	0	1
Вращение назад				
Цвет провода	X1	X2	X3	X4
Белый	1	0	0	1
Красный	0	0	1	1
Коричневый	0	1	1	0
Черный	1	1	0	0

Разрабатываемый мехатронный комплекс повышает достоверность диагностирования текущего состояния железобетонных опор контактной сети; снижает трудоемкость процесса получения данных и обработки результатов; получение документальных изображений результата диагностирования внутренних поверхностей железобетонной опоры контактной сети; обеспечивает стабилизацию положения оптической части [96, 2]. Конструкция устройства легко переносится на другие диагностируемые железобетонные опоры контактной сети и сохраняет изображения внутренней поверхности выше и ниже уровня земли.

5.2 ФОРМИРОВАНИЕ ПАНОРАМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Техническая эндоскопия является одним из современных способов неразрушающего контроля. Она позволяет выполнить визуальный контроль поверхностей в местах, недоступных для внешнего осмотра обычными методами. Одной из основных целей диагностических мероприятий является исследование труднодоступных мест на предмет наличия коррозионных повреждений. В качестве объекта исследования выбраны полые железобетонные опоры системы электроснабжения железнодорожного транспорта.

Для отбора пробы с внутренней поверхности бетона было разработано устройство на основе технического видеоэндоскопа, оснащенного бормашинкой и уловителем мелкодисперсной фракции. Диагностирование коррозионного состояния внутренних поверхностей железобетонных конструкций в последующем производилось по оценке концентрации соединений на основе железа в выбранной области [97]. Для выхода на цель рабочей головки необходимо проанализировать внутреннюю поверхность объекта контроля на наличие коррозионных дефектов.

На рис. 5.5 приведена схема расположения устройства отбора пробы внутри опоры контактной сети. Погружаемая часть помещается внутрь опоры через технологическое отверстие.

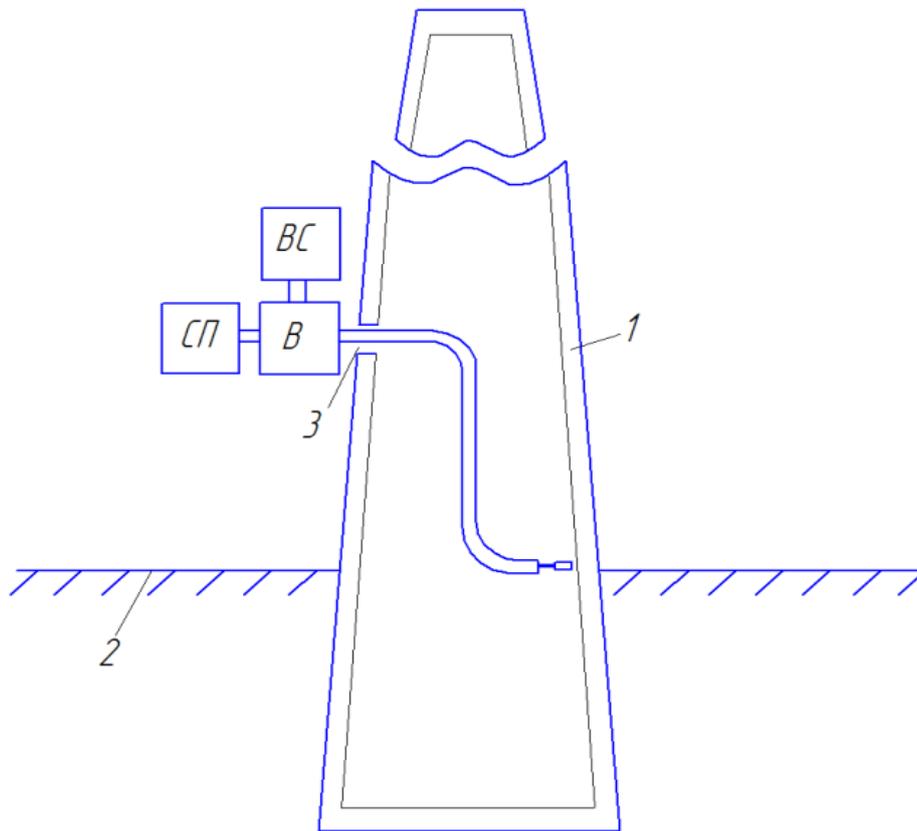


Рисунок 5.5 – Схема расположения устройства внутри опоры КС

После расположения погружаемой части внутри опоры 1 производится осмотр внутренней поверхности бетона. Наибольший практический интерес относится к внутренней поверхности, расположенной на расстоянии одного метра выше и ниже уровня земли 2. При обнаружении следов коррозии, с помощью рукояток управления трубкой, дистальная головка видеосистемы ВС наводится на середину ярко выраженной области с наличием продуктов коррозии. Затем приводят во вращение бормашина, и включается вентилятор для сбора пробы (СП).

В качестве технических средств использовался видеоэндоскоп типа JProbe-VE с устройством управления и позиционирования оптической части внутри полой железобетонной опоры (рис. 5.6). Ввод оптической головки внутрь опоры осуществлялся через вентиляционное отверстие, расположенное на уровне 1,5 м выше уровня земли.



Рисунок 5.6 – Внешний вид видеоэндоскопа JProbe-VE

Внешний вид исследуемой опоры с вентиляционными отверстиями показан на рис. 5.5. При помощи гибкого зонда эндоскопа с управляемой видеоголовкой, длиной 3 м проводилась съемка внутренней поверхности опоры на глубине ниже 1 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 позволит впоследствии соединить несколько снимков в единый панорамный снимок, что в свою очередь позволит выполнить более полный и точный анализ результата осмотра внутренней поверхности опоры.

При фиксации изображения внутренней поверхности опоры с помощью видеоэндоскопа из-за отклонения дистальной части от центральной оси опоры камера оказывается смещенной на некоторое расстояние АВ (рис. 5.8). При угле обзора камеры α такое смещение приводит к тому, что фиксируемая часть поверхности опоры CD уменьшается до EF. Это может быть учтено в расчетах путем пересчета угла обзора камеры за счет смещения дистальной части эндоскопа. Фактический угол обзора становится равным $\beta < \alpha$.

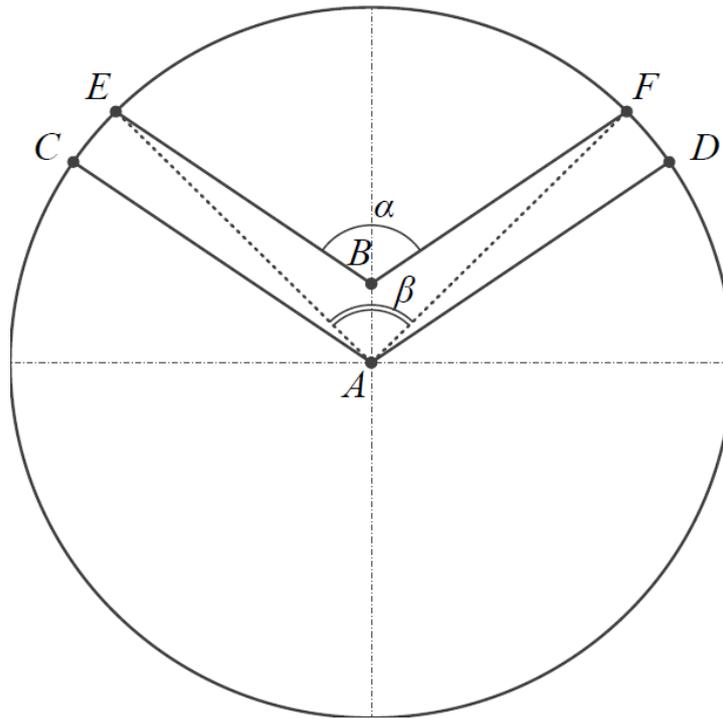


Рисунок 5.8 – Изменение угла обзора камеры при повороте дистальной части видеозендоскопа

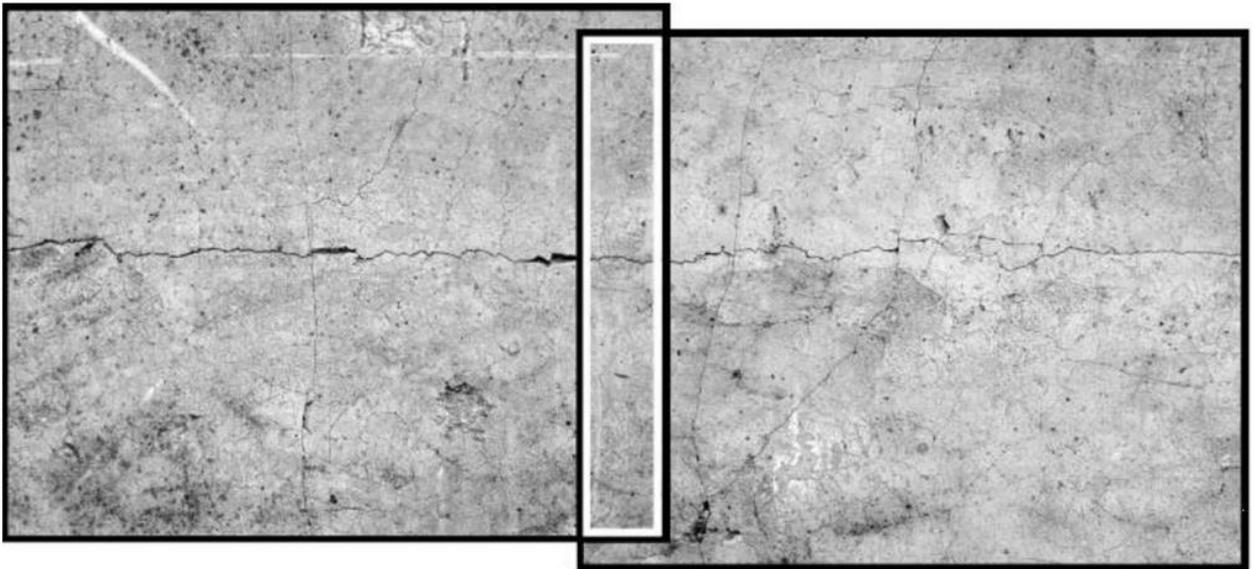
Чтобы охватить всю исследуемую поверхность опоры фактический угол обзора β должен быть не менее 90° (для формирования панорамного изображения необходимо наложение изображений, поэтому β должен быть более 90°). Реально фиксируемая часть поверхности опоры EF в этом случае должна составлять не менее четверти длины окружности радиусом AC.

Формула для расчета необходимого смещения камеры эндоскопа h при повороте дистальной части, позволяющего зафиксировать необходимый участок внутренней поверхности опоры длиной L :

$$\beta = R \sin (\alpha/2 - L 90^\circ / \pi R) / \sin \alpha/2 \quad (5.1)$$

где α – угол обзора камеры; R – внутренний радиус обследуемого объекта.

Принцип формирования панорамного изображения заключается в необходимости наложения частей двух изображений (около 10%), как показано на рис. 5.9.



Изображение А Зона перекрытия Изображение Б

Рисунок 5.9 – Формирование панорамного изображения

С учетом необходимости наложения изображений фактический угол обзора камеры необходимо обеспечивать более 90° за счет подбора, соответствующего видеоэндоскопа по паспортному значению угла обзора камеры α или по длине дистальной части h [2].

Применение представленной методики совместно с техническими средствами пробоотбора и портативными приборами спектрального анализа позволяет эффективно в полевых условиях определять коррозионное состояние полых железобетонных опор контактной сети железных дорог постоянного тока. Дополнительно появляется возможность хранения и дальнейшей обработки панорамных изображений внутренней поверхности железобетонных опор с возможностью регистрации динамики развития дефектов коррозии.

5.3 РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Для проверки работоспособности мехатронного комплекса и получения панорамного изображения был изготовлен макет полый

железобетонной опоры, в виде цилиндра высотой 1600 мм, диаметром 400 мм, показанный на рис. 5.10. Внутренняя поверхность цилиндра размечена на квадраты размером 100x100 мм. Обозначения квадратов выполнено в цилиндрической системе координат. Первая цифра обозначает линейное перемещение вниз (см), относительно технологического отверстия. Вторая цифра – угол поворота, относительно вертикальной линии, проходящей через технологическое отверстие. Квадрату со стороной 100 мм соответствует поворот на 30 угловых градусов. В качестве технических средств визуального контроля использовался видеозэндоскоп типа JProbe-VE с гибким зондом диаметром 6 мм и длиной 3 м, с возможностью управления дистальной частью.

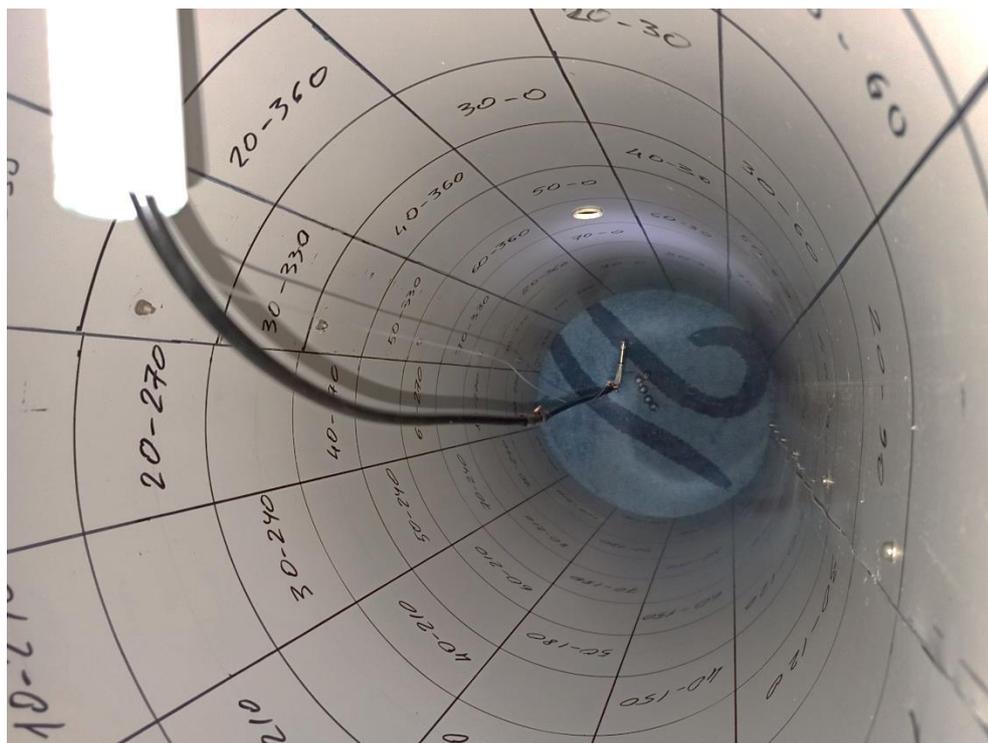


Рисунок 5.10 – Макет внутренней поверхности железобетонной опоры с разметкой в цилиндрической системе координат

Графическая схема алгоритма работы программы представлена на рисунке 5.11. В качестве доступных критериев сортировки предполагаются следующие варианты: по наименованию, по расположению, по типу, по году

установки. Однако основным критерием сортировки отображаемых опор, используемым по умолчанию, предлагается планируемая дата следующей проверки опоры. Так в первую очередь будут показаны опоры, которые нужно проверить в ближайшее время.

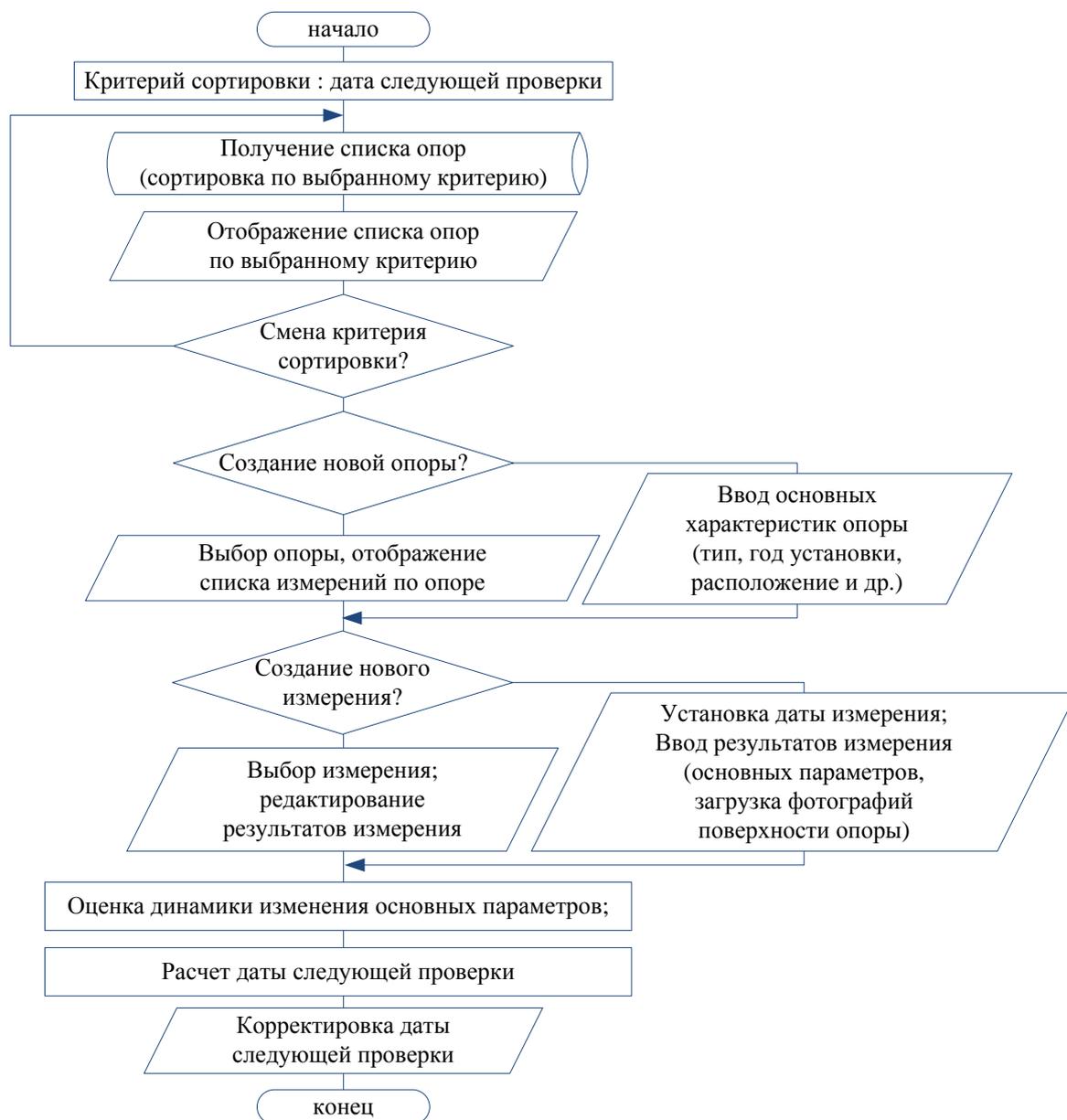


Рисунок 5.11 – ГСА основного модуля программы

При добавлении (создании) опоры указывается ее наименование (условное обозначение в соответствии с принятой на предприятии системой обозначения опор), год установки, тип опоры, информация о расположении. Все эти параметры могут корректироваться в дальнейшем при необходимости.

При выборе опоры отображается список измерений, проведенных на этой опоре. По каждому измерению хранятся следующие данные:

- дата проведения измерения;
- планируемая дата следующей проверки опоры (выставляется вручную или автоматически на основе разработанного алгоритма, учитывающего текущее состояние опоры);
- описание измерения (позволяет в свободной форме описать, какие измерения выполнены, какие особенности выявлены при диагностике опоры);
- фотографии внутренней поверхности опоры, выполненные в процессе диагностики;
- параметры дефектов, определенные по фотографиям и анализу видеоизображения процесса диагностирования.

Данные обо всех опорах и проведенных измерениях предлагается хранить в локальной базе данных. Информация об опорах располагается в таблице Supports. Информация о проведенных измерениях – в таблице Measurements. При этом количество фотографий, выполненных для каждого измерения, а также количество выявленных дефектов может различаться. Поэтому фотографии и информацию о найденных дефектах решено вынести в две отдельные таблицы: Images и Defects. В итоге структура базы данных с указанием связей между таблицами показана на рисунке 5.12.

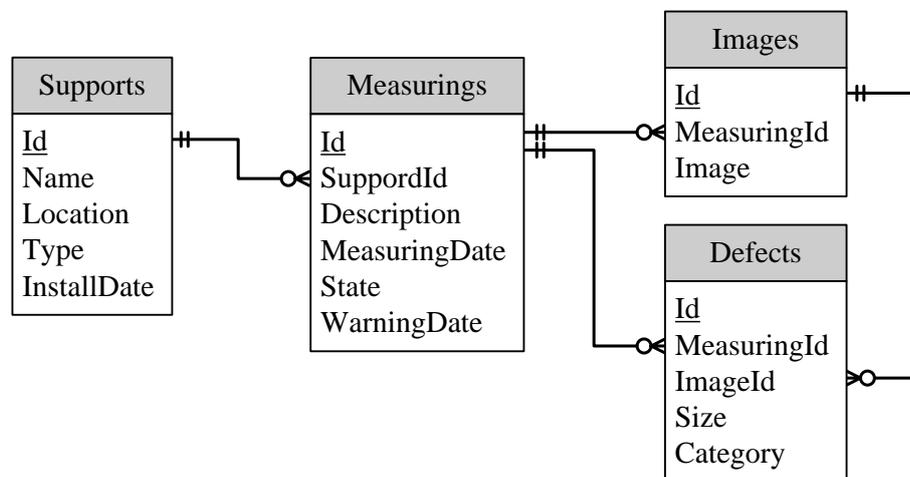


Рисунок 5.12 – Структура базы данных

При нахождении дефекта предлагается его классифицировать. Поэтому в таблице Defects предусмотрены поля, указывающие категорию дефекта, численную оценку его величины, а также ссылки на фотографию, на которой он был обнаружен, и на соответствующее измерение.

По итогам обработки информации о дефектах определяется состояние опоры (по установленной системе категоризации) и предлагаемая дата следующей проверки опоры.

Примерный вид главного окна программы приведен на рисунке 5.13.

Опоры: Опора СК-1 Опора СКЦ-1 Опора СС-1 Опора СК-2 Добавить опору Удалить опору	Название Опора СС-1	Дата установки 01.05.1993	Измерения: 12 октября 2021 г. 16 ноября 2020 г. Добавить измерение Удалить измерение	Дата следующей проверки 12 октября 2022 г.	Изображения:
	Расположение	Тип СС 136.6-2.1-М-Э		Описание Выполнены фотографирование внутренней поверхности и осмотр внешней поверхности опоры.	

Рисунок 5.13 – Внешний вид главного окна программы

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 видеозендоскопа. Описанная система позволяет выявлять дефекты с размерами не менее 1 мм и определять их координаты.

5.4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Железобетонные опоры используются для поддержания проводов линий электропередач, контактной сети железных дорог и городского электротранспорта. К таким элементам устройства электроснабжения предъявляются высокие требования по надежности. В процессе эксплуатации железобетонные опоры, заглубленные в грунт, подвергаются коррозии. Под воздействием электрического тока, обусловленного утечками в элементах изоляции, коррозионным изменениям подвергается как бетонный камень, так и арматура опор контактной сети [98].

Важное место при эксплуатации железобетонных конструкций, эксплуатируемых на открытых участках, отводится диагностированию и своевременному техническому обслуживанию или замене остродефектных объектов. В настоящее время известен ряд методов диагностирования, каждый из которых дополняет другие для получения достоверной диагностической информации.

В работе приводится методика обработки оптической информации, полученной при помощи технических средств визуального контроля. В качестве близких аналогов рассматривались методики определения количественного состава продуктов коррозии для определения степени износа арматурных стержней [99].

Для определения коррозионного состояния строились градуировочные зависимости изменения концентрации от изменения интенсивности спектральных линий определяемых элементов. Далее определялись параметры зависимости изменения площади поперечного сечения арматурных стержней от концентрации продуктов коррозии на поверхности бетона.

В работе [100] описано устройство для регистрации панорамного изображения внутренней подземной поверхности, которая наиболее подвержена появлению коррозионных дефектов. Данные повреждения появляются в областях поверхности, имеющей высокие показатели электрической проводимости, обуславливающей стекание электрического тока в грунт. Обработке изображений, содержащих коррозионные дефекты в виде бурых пятен на поверхности бетона, посвящена данная работа.

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы с заданным количеством хлорида железа в бетоне [101]. Таким образом, для анализа изменения цвета поверхности использовались образцы с известной концентрацией продуктов коррозии в виде $FeCl_3$, имитирующего разложение арматурных стержней.

Образцы выполнены из бетона М300, применяемого в опорах контактной сети. В составе использовались компоненты: цемент, песок, вода в пропорции 1: 1,9: 0,5, без щебня, не влияющего на качество и параметры поверхности. Изготовлено 14 образцов в виде куба размером $7 \times 6 \times 6$ см. Содержание хлорида железа, масса образцов и их наименование приведены в таблице 5.2.

Изображения образцов с различным содержанием хлорида железа показаны на рисунке 5.14. Как видно из рисунка, наблюдается изменение цвета с увеличением концентрации продуктов коррозии [102]. В левом верхнем углу находится изображение исходного бетона, далее слева направо расположены образцы с увеличением концентрации $FeCl_3$ (образцы 1, 2, 3, 6, 7, 9, 11, 13).

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

Таблица 5.2 – Параметры образцов с искусственной коррозией

Образец №	Масса образца в сыром виде, г.	Масса $FeCl_3$, г.	Процентное содержание $FeCl_3$, %
1	511	–	–
2	497	–	–
3	496	5	1,0
4	493	5	1,0
5	539	10	1,9
6	508	10	1,9
7	505	15	3,0
8	507	15	2,9
9	492	20	4,1
10	513	20	3,9
11	498	25	5,0
12	486	24,3	5,0
13	464	36,2	7,8
14	425	33,2	7,8

В *HSB*-модели цвет представляется тремя компонентами: тон (*Hue*), насыщенность (*Saturation*) и яркость (*Brightness*). Тон и насыщенность удобно представлять вектором на комплексной плоскости: тон задается углом поворота вектора, а насыщенность – длиной вектора. Для удобства анализа полученных данных угол вектора задается в диапазоне от -180° до 180° , а длина вектора – от 0 до 255. Эти два параметра напрямую определяют цвет точки фотографируемой поверхности.

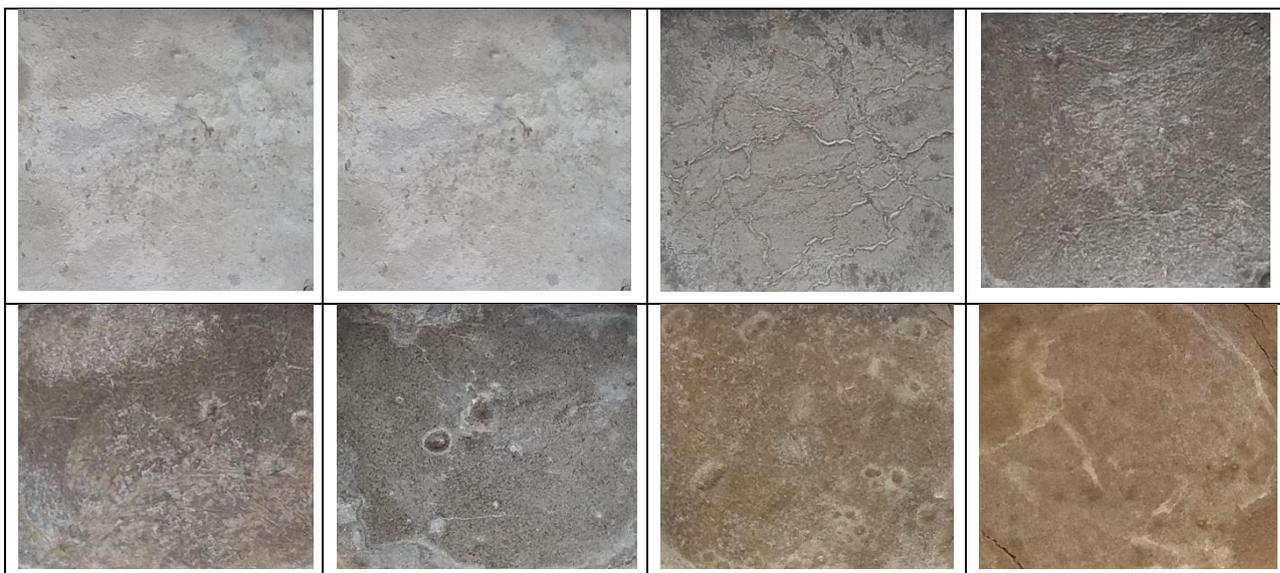


Рисунок 5.14 – Изображения поверхности бетонных образцов с различным содержанием $FeCl_3$

Низкое значение насыщенности показывает, что все три RGB -составляющие цвета сбалансированы, и цвет близок к нейтральному серому. Однако это может-быть как темно серый, так и светло серый цвет в зависимости от абсолютной величины RGB -составляющих цвета. Поэтому необходим третий параметр, описывающий яркость цвета (уровень освещенности соответствующего участка фотографии).

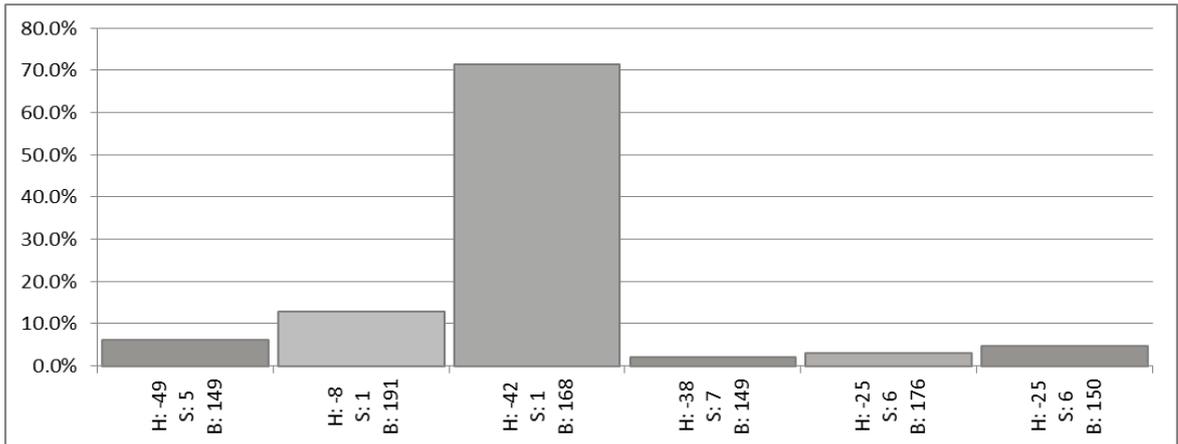
При проведении эксперимента были получены фотографии образцов с различной концентрацией $FeCl_3$. По итогам обработки изображений получено, что при угле поворота (H) вектора цвета в диапазоне от -30° до -10° и длине вектора (S) не менее 10 единиц полученный цвет соответствует ржавчине. Например, на рисунке 5.14 показан результат программной обработки фотографии участка бетона со следами электрокоррозионного разрушения с неизвестным составом продуктов коррозии на поверхности. На рисунке 5.15 показан результат обработки данного изображения в виде гистограммы основных присутствующих на фото цветов.

Изображения отдельных образцов с гистограммами разложения на составляющие цветов представлены на рисунках 5.15 – 5.21.

140



а)

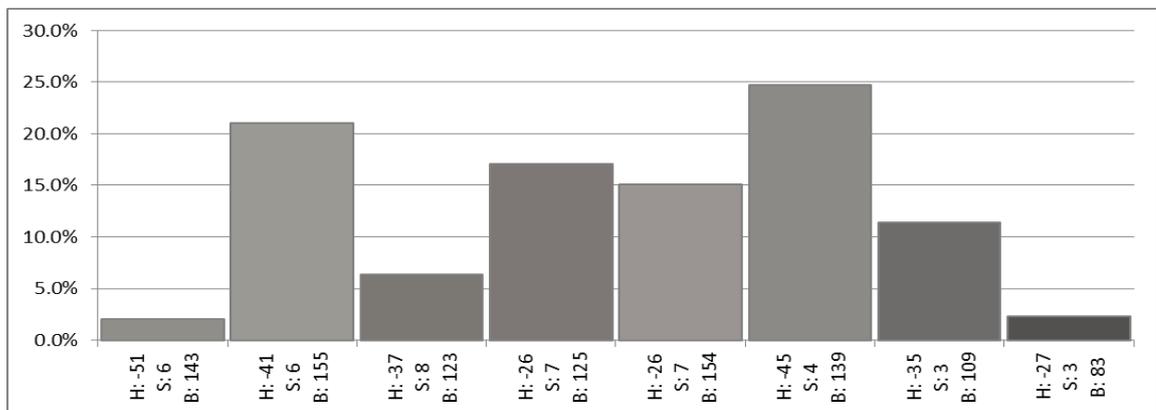


б)

Рисунок 5.15 – Гистограмма б) анализа изображения а) образца №1.



а)

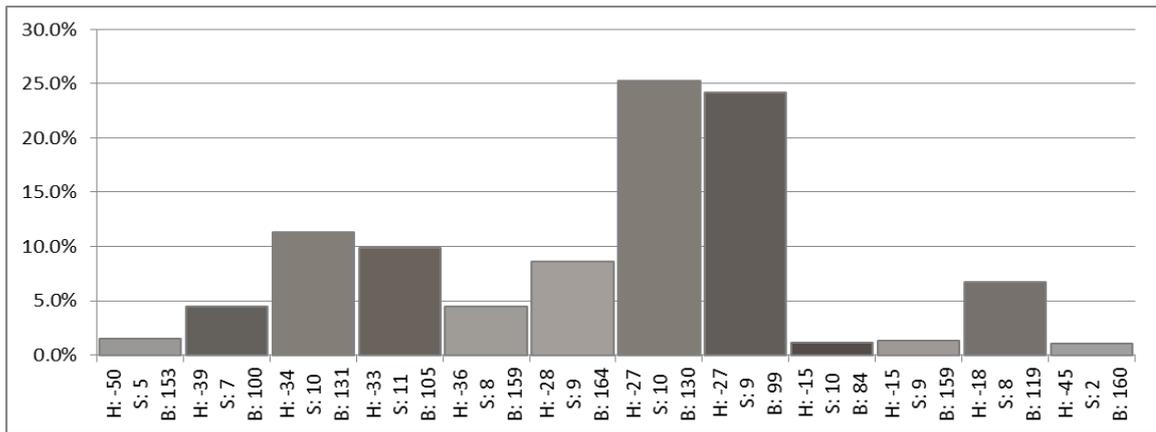


б)

Рисунок 5.16 – Гистограмма б) анализа изображения а) образца №3.



а)

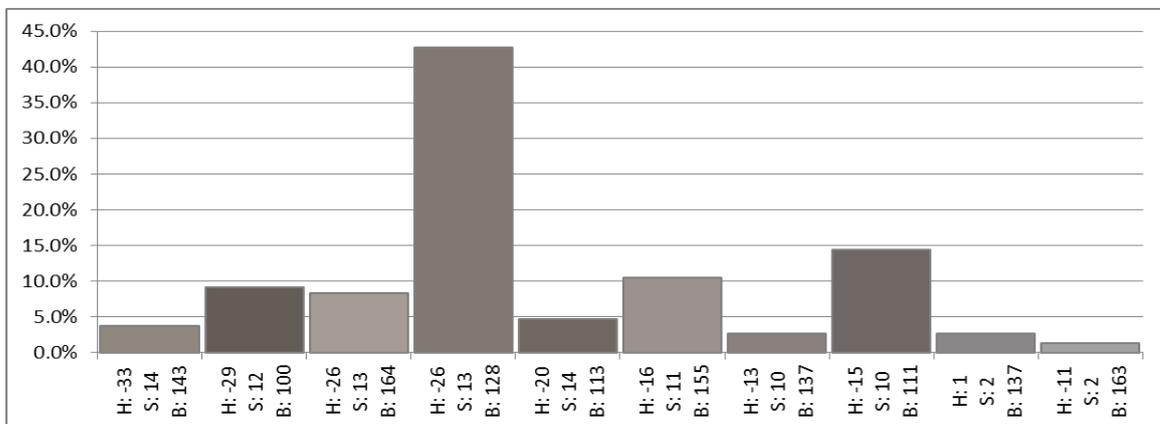


б)

Рисунок 5.17 – Гистограмма б) анализа изображения а) образца №6.



а)

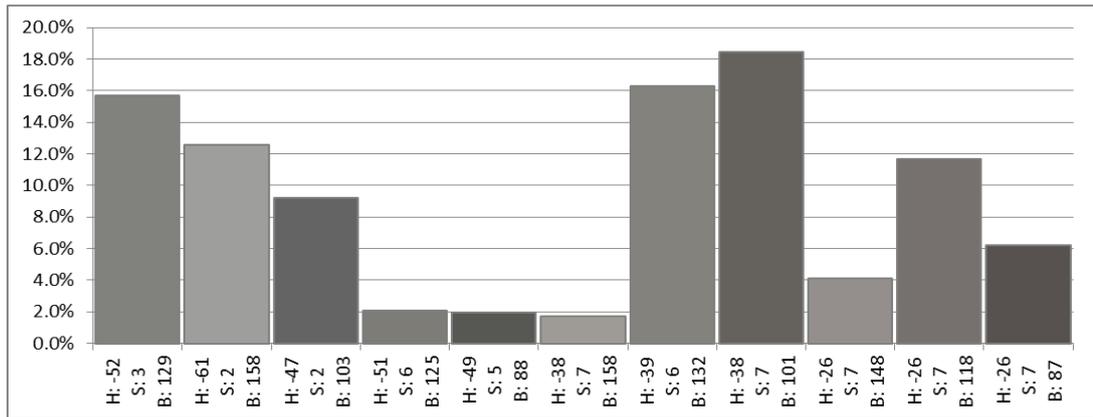


б)

Рисунок 5.18 – Гистограмма б) анализа изображения а) образца №7.



а)

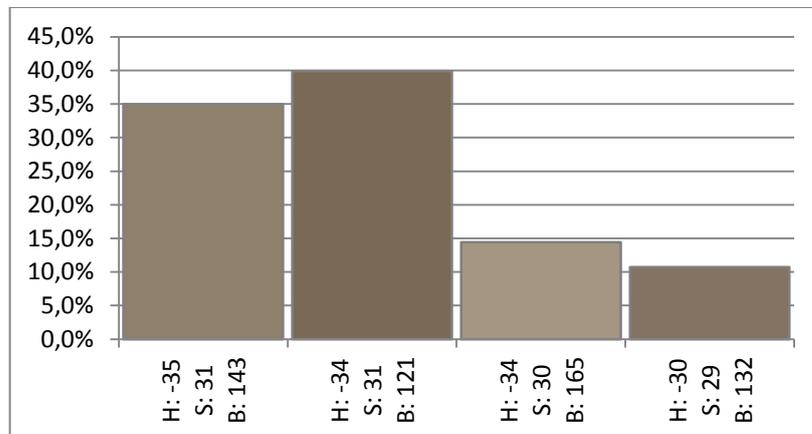


б)

Рисунок 5.19 – Гистограмма б) анализа изображения а) образца №9.



а)

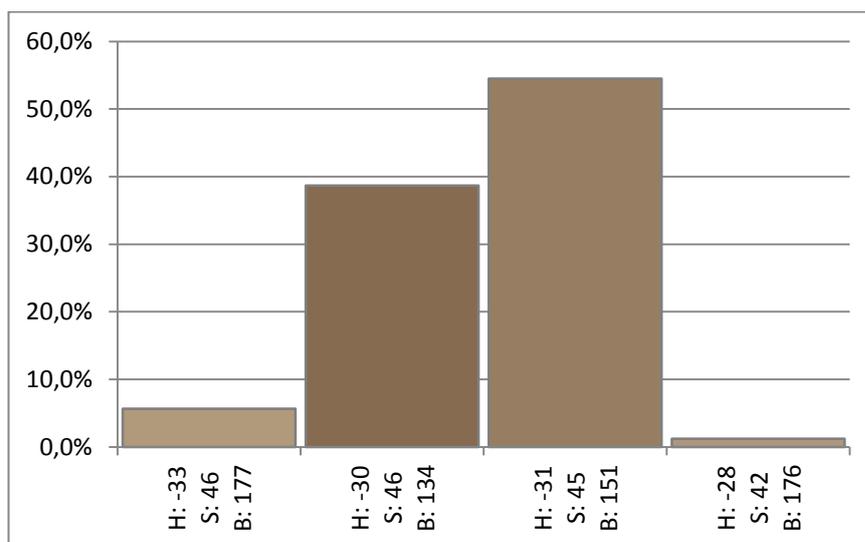


б)

Рисунок 5.20 – Гистограмма б) анализа изображения а) образца №11.



а)



б)

Рисунок 5.21 – Гистограмма б) анализа изображения а) образца №13.

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, представленных на рисунке 5.22. Концентрация хлорида железа изменялась от 0 до 7,8 % согласно данным таблицы 1. Шкала изменения цвета представлена на рисунке 5.22.



Рисунок 5.22 – Шкала характерных цветов исследуемых образцов

Ранее исследователи применяли различные методы количественного и качественного обнаружения коррозии на поверхности материалов, и некоторые из этих исследований обсуждаются ниже.

Использовали обработку изображений для определения количества трещин и расположения трещин на изображениях листового металла. Изображения были сняты с помощью видеокамеры и линейного лазера, а обработка изображений была выполнена с помощью программного обеспечения *MATLAB* [20].

Предложен способ контроля поверхностных дефектов на металлах, включая коррозию используя методы обработки изображений. Изображения были получены с помощью специализированной камеры *Raspberry Pi*, а обработка изображений осуществлялась на процессоре *Raspberry Pi 2*. Полученные изображения были преобразованы из *RGB* (красный, зеленый и синий) в *HSV* (оттенок, насыщенность, яркость) пространстве, и для обнаружения коррозии использовалось определенное пороговое значение области, основанное на цвете коррозии [103].

Проведено изучение и обнаружение коррозии на металле с использованием различных операторов обнаружения краев, в результате предложен новый метод использованием техники выявления тонких краев и морфологических операций, таких как расширение и эрозия [104].

Другим направлением обработки изображений является определение типа коррозии на основе морфологии корродированной поверхности. Выборка из 197 изображений, сделанных при помощи оптического микроскопа, была использована для обучения и тестирования классификации. Восемнадцать атрибутов, которые представляют цвет, структуру и форму, были повторно использованы в качестве функций. Пространство объектов было уменьшено до двух измерений с использованием многомерного масштабирования (анализ главных координат) и классификация типов коррозии была проведена с использованием линейных классификаторов [105].

В работе [106] проведено исследование классификации корродированных и не корродированных поверхностей с использованием текстурных дескрипторов, полученных из *GLCM* (матрицы совпадения уровней серого), и цветовых дескрипторов, полученных из статистических данных в цветовом пространстве *HSI* (отенок, насыщенность и интенсивность).

Одна из первых попыток количественно оценить точечную коррозию с помощью цифровой обработки изображений была предпринята в статье [107]. Для нержавеющей стали типа *AISI 304L* после обработки раствором $FeCl_3$ оценивали стойкость к образованию точечных дефектов, определяемую как отношение количества дефектных пикселей к общему количеству пикселей.

В статье [108] был предложен основанный на компьютерном зрении метод оценки коррозионных дефектов на материалах с покрытием с использованием метода сегментации водоразделов. Авторами разработки был использован метод оценки площади корродированного изображения и его отношение к процентной доле корродированного изображения дефектов.

Из приведенной выше литературы можно сделать вывод, что значительный объем исследований был проведен в области идентификация коррозии с использованием инструментов обработки изображений и машинного обучения, но была проделана недостаточная работа по количественной оценке коррозии на исследуемых поверхностях.

В этой статье предлагается алгоритм количественной оценки коррозии на поверхности железобетона и определения местоположения участков с наибольшим содержанием продуктов коррозии, вышедших на поверхность по изменению цветовых параметров.

Методология. Панорамное изображение исследуемой поверхности состоит из отдельных снимков, имеющих одинаковый размер и различные координаты. Формирование панорамного изображения при помощи мехатронного комплекса на основе эндоскопа показано в работе [10].

Ранее пороговые значения применялись для обнаружения участков с максимальной коррозией на поверхности металлических трубопроводов [109]. Шаги, выполняемые в предлагаемом алгоритме для обнаружения и количественной оценки коррозии железобетонной поверхности, показаны на рис. 5.23.

Определение ограничений сцены. Наиболее важным шагом в разработке любой промышленной системы машинного зрения является определение существующих ограничений окружающей среды, чтобы правильно выбрать исследуемую область системы машинного зрения и ускорить дальнейшую обработку изображений [109]. Выявленные ограничения помогают нам выбирать подходящие алгоритмы и методы для разработки эффективного модуля зрения. Ограничения сцены, которые можно легко определить во время осмотра внутренней поверхности, заключаются в следующем:

- Цвет внутренней поверхности железобетонной трубы без коррозии и цвет коррозии на поверхности трубы.
- На захваченном изображении обычно присутствуют различные объекты, такие как чистый бетон, коррозия на поверхности и возможные нарушения сплошности (трещины, сколы и др.).
- Камера должна быть ограничена фокусировкой и захватом только нужной части поверхности проверяемой опоры.

Первое ограничение, указывающее на цвет коррозии, имеет решающее значение для обнаружения и количественной оценки участков коррозии на данном изображении. Второе и третье ограничения могут быть использованы для того, чтобы отличить области коррозии от возможных дефектов типа трещины, сколы и др.

Получение изображения. Изображения представленного образца поверхности бетона сняты с помощью камеры мобильного телефона с разрешением 8 мегапикселей при дневном свете. Изображения внутренней

поверхности полый железобетонной реальной опоры снимаются при помощи эндоскопа с искусственной светодиодной подсветкой. На исследуемом образце фон изображения не захватывается намеренно, чтобы упростить анализ изображения. Образец полученного изображения одного участка панорамной съемки показан на рис. 5.24.



Рис. 5.23. Этапы для обнаружения коррозии и количественной оценки



Рис. 5.24. Пример изображения, с камеры мобильного телефона

Удаление шума с помощью методов фильтрации изображений

Иногда захваченные изображения могут быть загрязнены шумом по разным причинам. Обычно это происходит во время получения или передачи изображения. В зависимости от шума, присутствующего на изображении, он в большей степени должен быть выявлен и удален на изображении перед его анализом. Например, метод медианной фильтрации может быть использован для удаления шума светлых и темных пикселей, присутствующих на изображении.

Преобразование цветового пространства. 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 изображения и поиска участков коррозии. Изображение в оттенках серого, как показано на рис. 5.25(а), не может быть легко использовано для идентификации коррозии в цветовом пространстве RGB . Данное изображение преобразуется в HSI (оттенок (H), насыщенность (S) и интенсивность (I)) цветовое пространство, в котором можно легко различить хроматические и ахроматические компоненты изображения. Компонент насыщенности изображения, полученного на рис. 5.25(б), может быть легко использован для обнаружения коррозии.

Преобразование изображения из цветового формата RGB в цветовое пространство HSI осуществляется с использованием следующих уравнений:

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{if } B < G; \\ 360 - \theta, & \text{if } B > G, \end{cases} \quad (5.2)$$

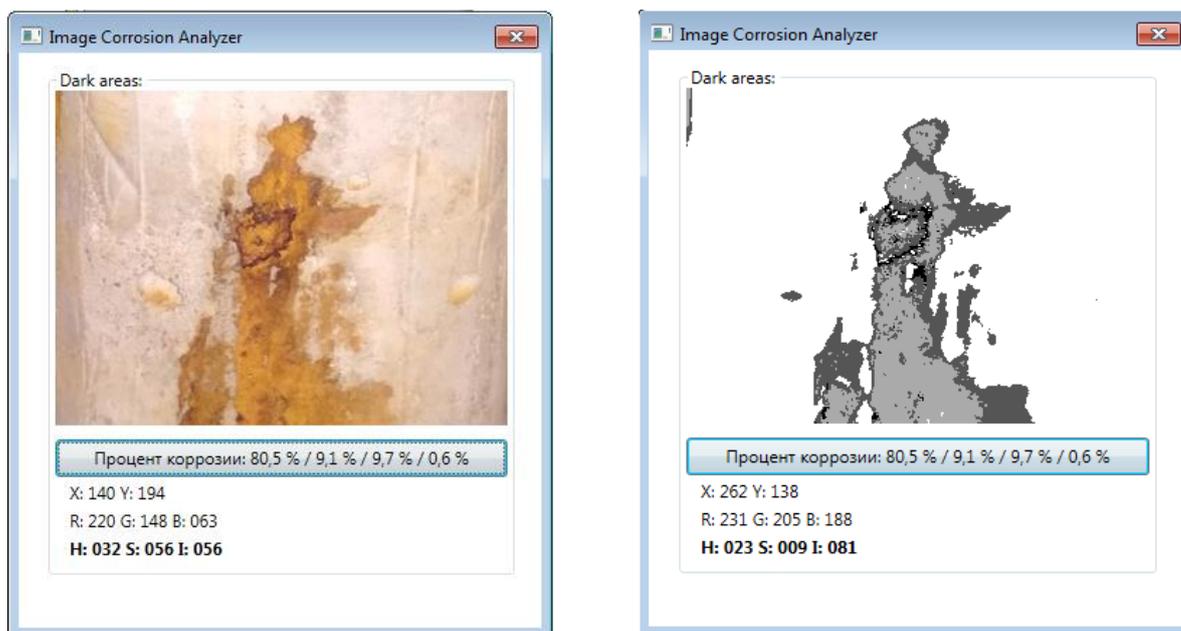
где

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)^{1/2}]}} \right\} \quad (5.3)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)]; \quad (5.4)$$

$$I = \frac{1}{3} (R + G + B). \quad (5.5)$$

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



а

б

Рис. 5.25 Параметры исходного изображения (а);
параметры изображения в оттенках серого (б)

Обнаружение коррозии. Чтобы определить, подвержена ли поверхность коррозии или нет, вычисляется среднее значение насыщенности всех пикселей. Если вычисленное среднее значение оказывается больше определенного порогового значения, обнаруживается коррозия. Это очевидно из того факта, что корродированная поверхность имеет более высокое значение компонента насыщенности, чем поверхность бетона, которая обычно окрашена в светлые цвета, такие как серый или белый [104]. Порог может быть выбран эмпирически, и он в основном зависит от условий эксплуатации. Более высокий или более низкий порог может быть выбран в зависимости от состояния поверхности, параметров пористости бетона и др.

Морфологические операции и количественная оценка

Как только коррозия обнаружена, заключительным шагом является количественная оценка коррозии различными способами, чтобы стало легче идентифицировать наиболее критический регион, и можно было выдвинуть некоторую гипотезу о природе коррозии на основе распределения продуктов коррозии по поверхности.

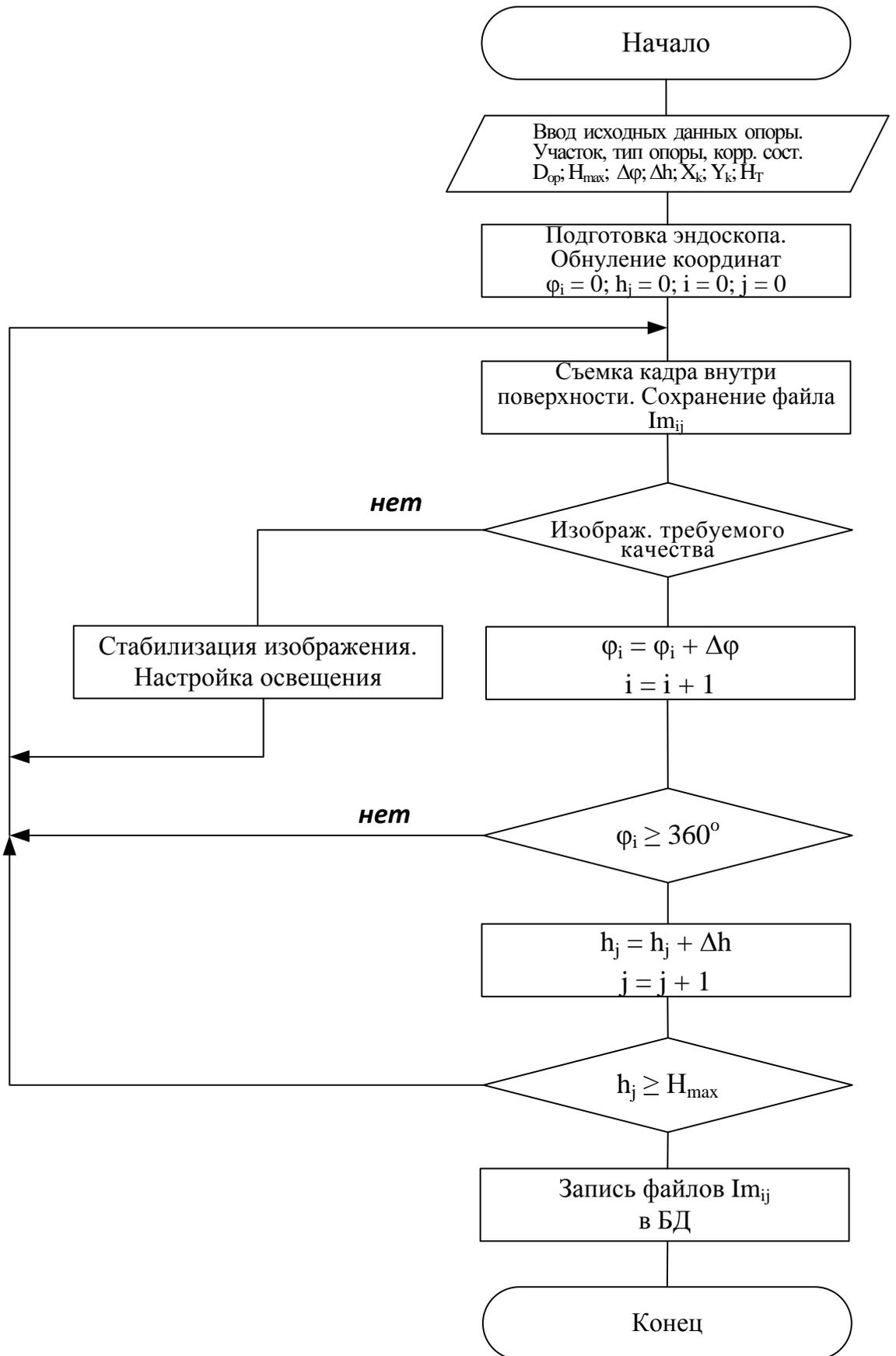


Рисунок 5.26 – Алгоритм формирования панорамного изображения

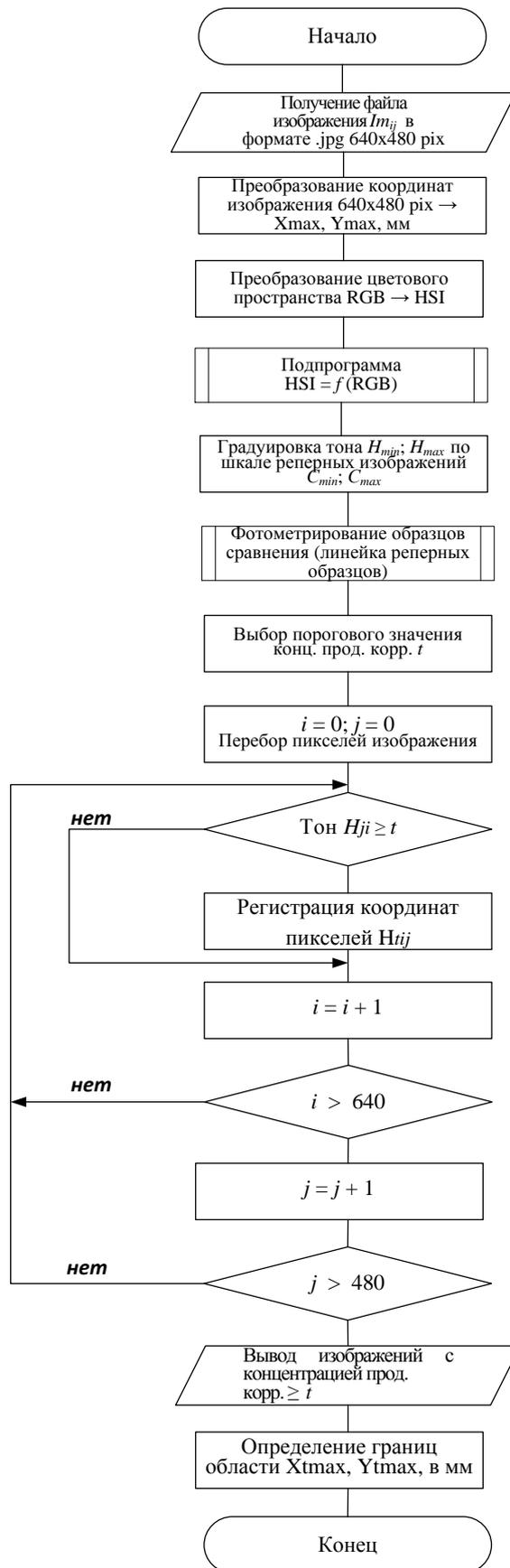


Рисунок 5.27 – Алгоритм определения уровня и размеров продуктов коррозии на изображении

Для количественной оценки коррозии были рассчитаны следующие показатели.

Процент коррозии. Этот показатель измерялся следующим образом:

Доля коррозии (S_{korr} , %) определялась, как отношение количества пикселей с коррозией (N_{korr}) к общему количеству пикселей на изображении поверхности (N).

$$S_{korr} = N_{korr} / N. \quad (5.6)$$

Количество пикселей, идентифицированных, как подверженные коррозии, зависит от выбранного порога, и поэтому процент коррозии измерялся с учетом четырех различных пороговых значений.

Процент площади, поврежденной в результате коррозии

Общеизвестно, что области, окружающие проржавевшие участки, подвержены легкой коррозии. Чтобы определить количество пикселей, пораженных коррозией, предполагается, что все пиксели в окрестности корродированного пикселя считаются поврежденными. Эта мера также зависит от выбранного порогового значения и была рассчитана для четырех различных пороговых значений, как уточненная площадь повреждения (S_{korr55} , %) равнялась отношению количество пикселей, лежащих в окрестности 5×5 всех пикселей коррозии (N_{korr55}) к общему количеству пикселей на изображении (N).

$$S_{korr55} = N_{korr55} / N. \quad (5.7)$$

Идентификация наиболее поврежденных/критических областей с использованием алгоритма кластеризации k-средних

На исследуемой поверхности может быть много участков, где обнаружены продукты коррозии, но будет несколько мест, где их концентрация наибольшая, и в этих местах наиболее вероятно максимальное разрушение арматуры. Предполагается, что компонент насыщенности пикселя пропорционален концентрации продуктов коррозии, соответственно,

области, имеющим более высокую насыщенность идентифицируются как наиболее поврежденные коррозией.

Идентифицированные цифровые области рассматриваются как двумерный набор данных, и были выполнены морфологические операции для повторного перемещения пикселей в областях с меньшей плотностью. Эти пиксели считаются выбросами или шумом для кластеризации, так что определение плотных областей становится проще.

Чтобы удалить внешний шум, присутствующий на изображении, была выполнена морфологическая операция, называемая открытием (эрозия с последующим расширением) с помощью структурного элемента в форме диска [109]. Чтобы удалить внутренний шум, присутствующий в изображении, операция закрытия (расширение с последующей эрозией) была выполнена на обработанном изображении с тем же структурным элементом.

Обнаружение коррозии. Чтобы обнаружить коррозию на данном изображении, пороговое значение для средней составляющей насыщенности изображения эмпирически выбирается равным 0,05. Фактическое вычисленное значение среднего значения составляет 0,1273, что намного выше выбранного порога. Таким образом, это явный признак наличия коррозии. Только в случае обнаружения коррозии изображение будет дополнительно проанализировано для получения различных признаков коррозии.

Количественная оценка коррозии. Коррозия была определена количественно несколькими способами, в результате работы разработанной программы обработки изображений и ручным способом выделения анализируемых площадей.

Процент коррозии. Коррозия, наблюдаемая после установления порога насыщенности компонента изображения с различными значениями, показана на рис. 5.28, где t – среднее значение насыщенности компонента изображения. Очевидно, что при использовании более высокого порогового значения количество элементов, идентифицированных как подверженные

коррозии, уменьшается, и, следовательно, процент коррозии также уменьшается, как показано в таблице 4.3. Чтобы подтвердить процент коррозии, полученный с помощью анализа изображений, важно измерить процент коррозии физически и сравнить оба результата.

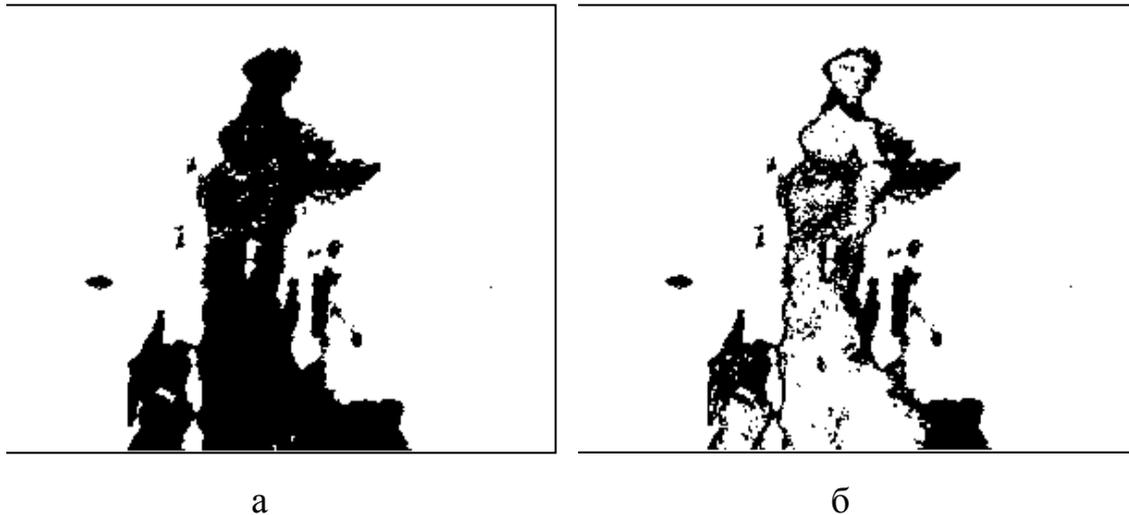


Рисунок 5.28 – Определение площади коррозии при различных порогах t :
 пороговое значение t (Уровень $> 25\%$; Процент коррозии: 19,5%);
 пороговое значение $2t$ (Уровень $> 50\%$; Процент коррозии: 10,8%).

Однако, поскольку коррозия обычно распространяется по всей поверхности трубы, измерить ее для определенного порога насыщения компонента практически невозможно. Таким образом, физическое измерение было выполнено путем печати двоичных изображений для четырех различных пороговых значений на стандартном листе бумаги формата А4, а процент площади аппроксимирован как отношение площади корродированного участка на листе к площади пропорциональной размеру всего изображения. Замечено, что процент корродированной области, полученный с помощью физического измерения, немного выше, чем процент области, полученной с помощью анализа изображений. Это связано с локальным приближением коррозии по замкнутым границам на изображении.

Таблица 5.3 – Процент площади коррозии для различных пороговых значений

Номер опыта	Порог насыщен.	Число пикс. коррозии	Площадь коррозии, % (по изображен.)	Площадь коррозии, % (по экспер.)
1	t	88576	19.5	20.2
2	$2t$	52756	10.8	11.2
3	$3t$	26345	8.9	9.4
4	$4t$	8098	5.3	6.0

Процент площади, поврежденной в результате коррозии

Процент площади, поврежденной из-за коррозии, был вычислен для четырех различных пороговых значений с учетом трех различных размеров окрестности вокруг пикселя для каждого порога. Замечено, что процент поврежденных пикселей обратно пропорционален величине порогового значения и прямо пропорционален размеру окрестности вокруг пикселя. Вычисленные значения площади повреждения приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Процент поврежденной области для разных пороговых значений и разных окрестностей вокруг поврежденного пикселя

Номер опыта	Порог насыщен.	Число пикс. коррозии (окно 5*5)	Площадь коррозии, % (окно 3*3)	Площадь коррозии, % (окно 5*5)	Площадь коррозии, % (окно 7*7)
1	t	114820	24.3	30.2	36.6
2	$2t$	86523	16.2	18.6	20.2
3	$3t$	41654	9.1	12.6	15.1
4	$4t$	23894	6.2	8.0	11.2

Идентификация наиболее поврежденных областей с использованием алгоритма кластеризации k -средних

Стандартный алгоритм кластеризации k -средних применяется для определения центров плотных областей, так что обычные методы контроля труб могут быть непосредственно выполнены в этих местах. Количество

групп кластеров, которые должны быть сформированы, поддерживается равным шести ($k = 6$), и центры кластера идентифицируются, как показано на фиг. 5.29 и 5.30. Хотя расположение центров кластера зависит от начальных точек, выбранных в качестве центров, определенные местоположения будут служить основной целью кластеризации данных.

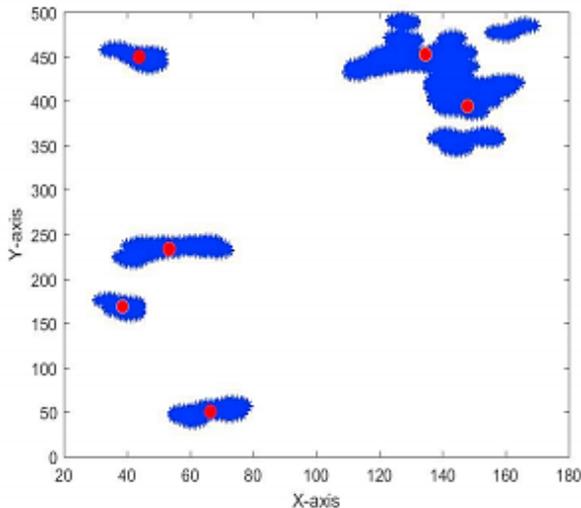


Рисунок 5.29 – Центры кластеров, вычисленные с использованием алгоритма кластеризации k -средних.

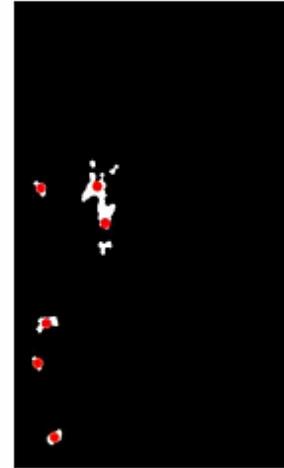


Рисунок 5.30 – Расположение сильно корродированных областей на исходном изображении.

Предложен новый метод обнаружения и количественной оценки коррозии на бетонной трубе с использованием методов цифровой обработки изображений. Обнаружение коррозии осуществляется путем преднамеренного захвата только части поверхности бетона и применения порогового значения к среднему значению насыщенности изображения. Количественная оценка осуществляется путем измерения площади коррозии, поврежденной области и определения местоположения центров областей с высокой степенью коррозии на изображении.

Чтобы повысить надежность обнаружения коррозии, другие характеристики, связанные с текстурой и формой, могут быть использованы в будущей работе. Так же планируется использовать образцовые методы определения количественного состава продуктов коррозии на выделенных

участках поверхности и привязки реперных значений к параметрам цветовой обработки оптического изображения.

Например, на рисунке 5.31 показан результат программной обработки фотографии участка бетона со следами электрокоррозионного разрушения с неизвестным составом продуктов коррозии на поверхности [110]. На рисунке 5.32 показан результат обработки данного изображения в виде гистограммы основных присутствующих на фото цветов.



Рисунок 5.31 – Фотография исследуемой бетонной поверхности

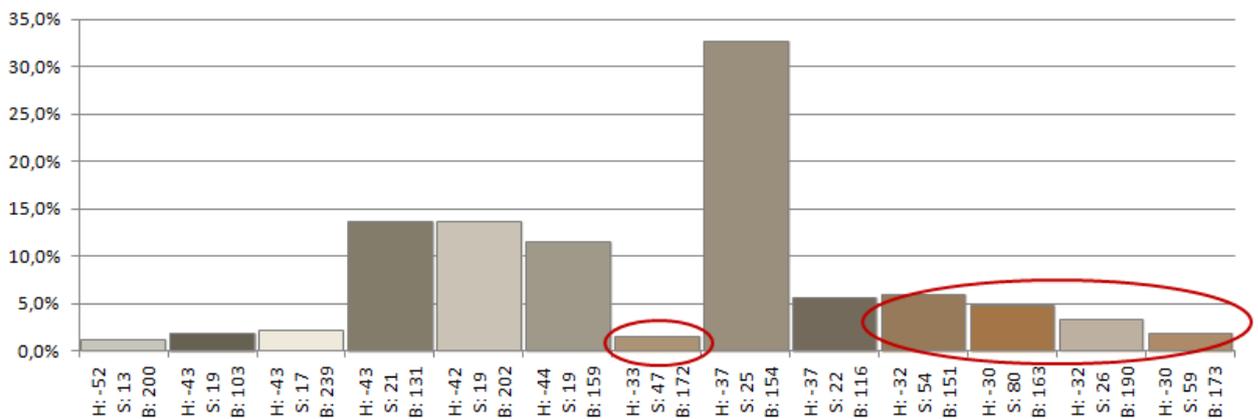


Рисунок 5.32 – Результат обработки изображения

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.

Гибкая настройка программного алгоритма анализа изображений позволяет настраивать чувствительность системы к различиям цветов, таким образом уменьшая количество интервалов на гистограмме рисунка 5.32, позволяет ориентироваться на определенные фиксированные интервалы с целью категоризации состояния поверхности по уровню коррозионного разрушения.

5.4 Связь концентрации продуктов коррозии на поверхности с изменением сечения арматурного стержня.

Как было показано в выражении (4.19), оно описывает не перенос красной ржавчины напрямую, а скорее распределение ржавчины образующейся в порах и трещинах бетона вследствие присутствия растворимых частиц, которые могут растворяться в поровом растворе бетона и в дальнейшем мигрируют в порах и трещинах, реагируя с кислородом в поровой воде. Таким образом, можно предположить, что в определенный момент времени, при регистрации продуктов коррозии на поверхности бетона, они равномерно распределены в объеме от участка арматуры, подверженного коррозии до поверхности.

На рисунке 5.33 показан фрагмент железобетонной опоры с арматурным стержнем, подверженным коррозии. Этот арматурный стержень показан в проекции, на которой показано изменение его сечения. На рисунке 5.33 приняты следующие обозначения: D – исходный диаметр арматурного стержня; c – толщина защитного слоя бетона; $D_k(t)$ – изменение диаметра арматурного стержня при коррозии; $d_k(t)$ – изменение размера продуктов коррозии в твердом состоянии вокруг арматурного стержня; $L_{kmax} = z_6 - z_5$ – наибольший линейный размер коррозионного дефекта арматуры; $L_{zmax} = z_8 - z_7$ – наибольший линейный размер продуктов коррозии на поверхности

бетона. Ось OZ направлена вдоль арматурного стержня; ось OY направлена нормально к поверхности бетона и перпендикулярно оси арматурного стержня.

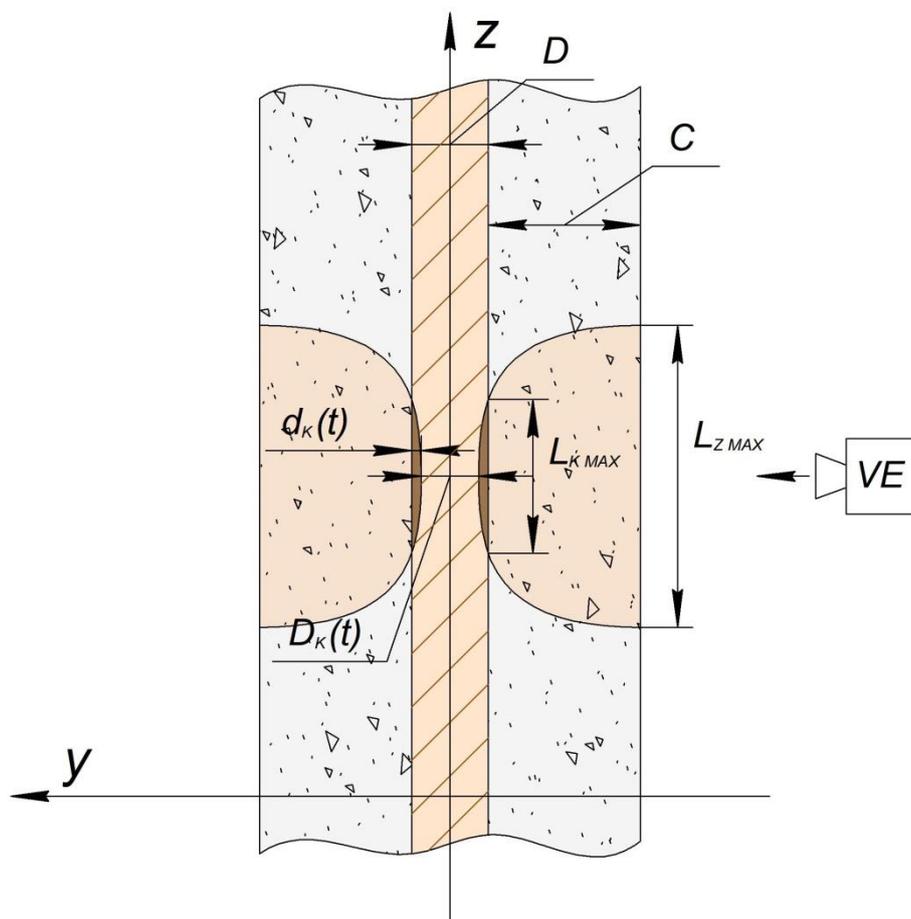


Рисунок 5.33 – Схема распространения коррозии в защитном слое арматуры

Для определения площади коррозионного пятна на поверхности бетона рассмотрим обозначения, приведенные на рисунке 5.34. Оси координат на рисунке соответствуют принятому порядку. Ось OZ направлена вдоль арматурного стержня; ось OY направлена перпендикулярно оси арматурного стержня и по касательной к поверхности бетона. На плоской развертке ось OY направлена горизонтально влево.

Поскольку коррозионное пятно располагается над арматурным стержнем, являющимся источником продуктов коррозии, то задача будет

сводиться к определению металла, вышедшего с поверхности арматурного стержня, и определению остаточного сечения арматуры.

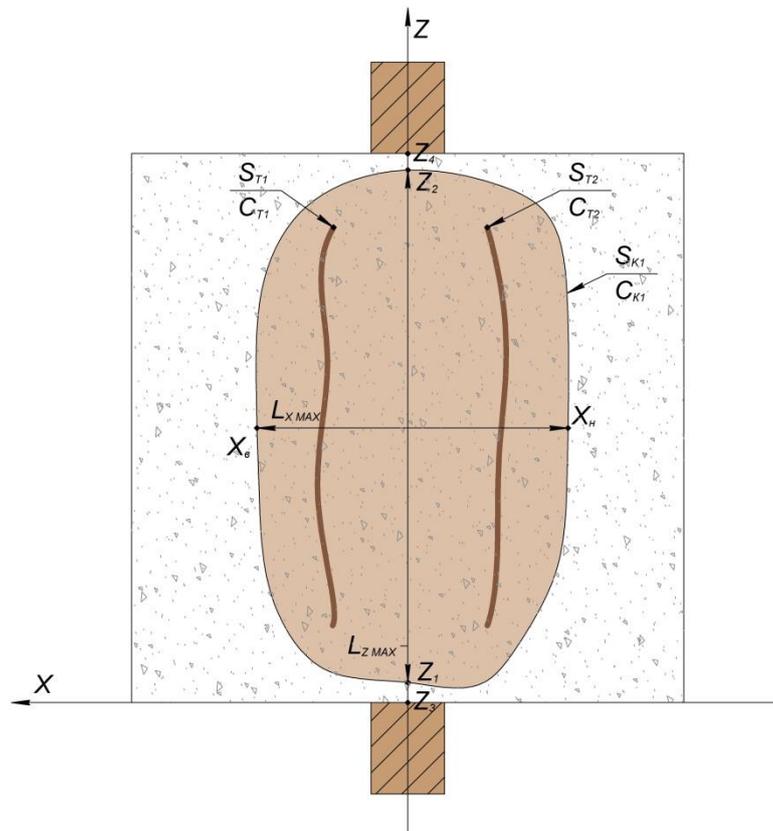


Рисунок 5.34 – Схема определения площади коррозионного пятна и коррозионной трещины

Размеры коррозионного пятна обозначим $L_{zmax} = z_4 - z_3$ – наибольший линейный размер продуктов коррозии на поверхности бетона по оси Z , $L_{xmax} = X_B - X_H$ – наибольший линейный размер продуктов коррозии на поверхности бетона по оси X .

Площадь пятна коррозии найдем как сумму двух половин

$$S_{K1} = \int_{z_3}^{z_4} [f_{KB}(z) + f_{KH}(z)] dz, \quad (5.8)$$

где $f_{KB}(z)$, $f_{KH}(z)$ – зависимости, описывающие линию края коррозионной области верхняя и нижняя соответственно; z_3 , z_4 – координаты по оси Z , соответствующие максимальному размеру коррозионного пятна по оси.

Для вычисления площади коррозионного пятна на практике, на цифровом изображении выбираются положения осей OX и OZ , границы интегрирования z_3, z_4 и выполняется численное интегрирование по выражению (5.8), представляющему собой сумму двух площадей с границей по оси OZ .

Для определения площади трещин, по которым транспортируется большой поток продуктов коррозии, поступают аналогично. На оси OZ отмечаются проекции наибольшего размера трещины z_1, z_2 . Трещина имеет верхнюю и нижнюю границы, тогда площадь раскрытия трещины найдется как разность площадей верхней и нижней границы:

$$S_{T1} = \int_{z_1}^{z_2} [f_{ТВ}(z) - f_{ТН}(z)] dz, \quad (5.9)$$

где $f_{ТВ}(z), f_{ТН}(z)$ – зависимости, описывающие линию края трещины верхняя и нижняя соответственно; z_1, z_2 – координаты по оси Z , соответствующие максимальному размеру коррозионной трещины по оси.

При необходимости, сложное коррозионное пятно можно представить суммой нескольких пятен индивидуального размера, тогда выражение будет представлено в виде суммы

$$S_K = \sum_{i=1}^n S_{Ki}, \quad (5.10)$$

где n – количество простых областей коррозии.

Аналогично площадь от нескольких коррозионных трещин можно представить суммой площадей нескольких трещин индивидуального размера, тогда выражение будет представлено в виде суммы

$$S_T = \sum_{i=1}^m S_{Ti}, \quad (5.11)$$

где m – количество отдельных трещин.

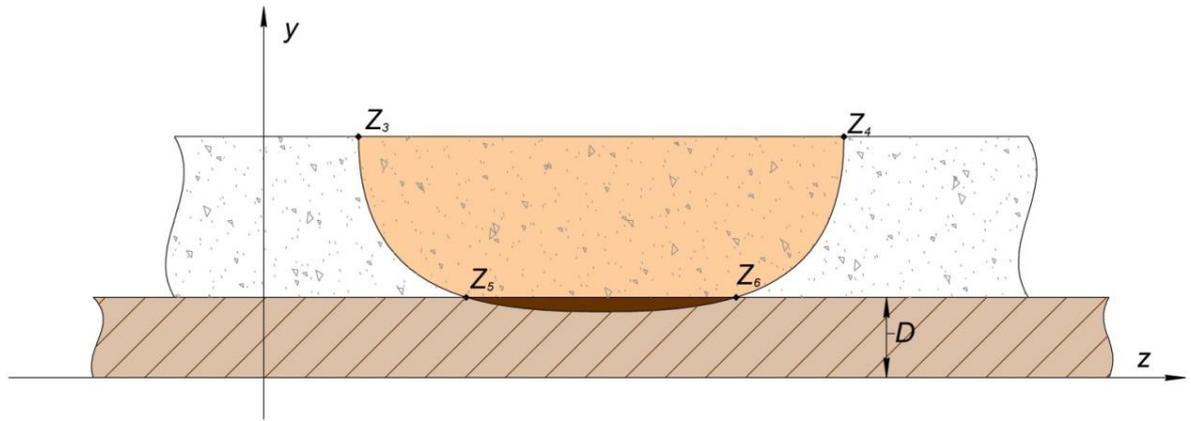


Рисунок 5.35 – Схема для определения объема бетона, содержащего продукты коррозии

На рисунке 5.35 приняты следующие обозначения z_3, z_4 – координаты по оси Z , соответствующие максимальному размеру коррозионного пятна, z_5, z_6 – координаты по оси Z , соответствующие максимальному размеру коррозионного дефекта на арматурном стержне. Форма границы распространения продуктов коррозии в результате конвекции и диффузии в общем случае может быть представлена экспоненциальной или линейной зависимостью. В этом случае форму фигуры, соответствующую бетону с продуктами коррозии, можно описать усеченным конусом, в верхнем основании которого находится овал, а в нижнем – овал или прямоугольник.

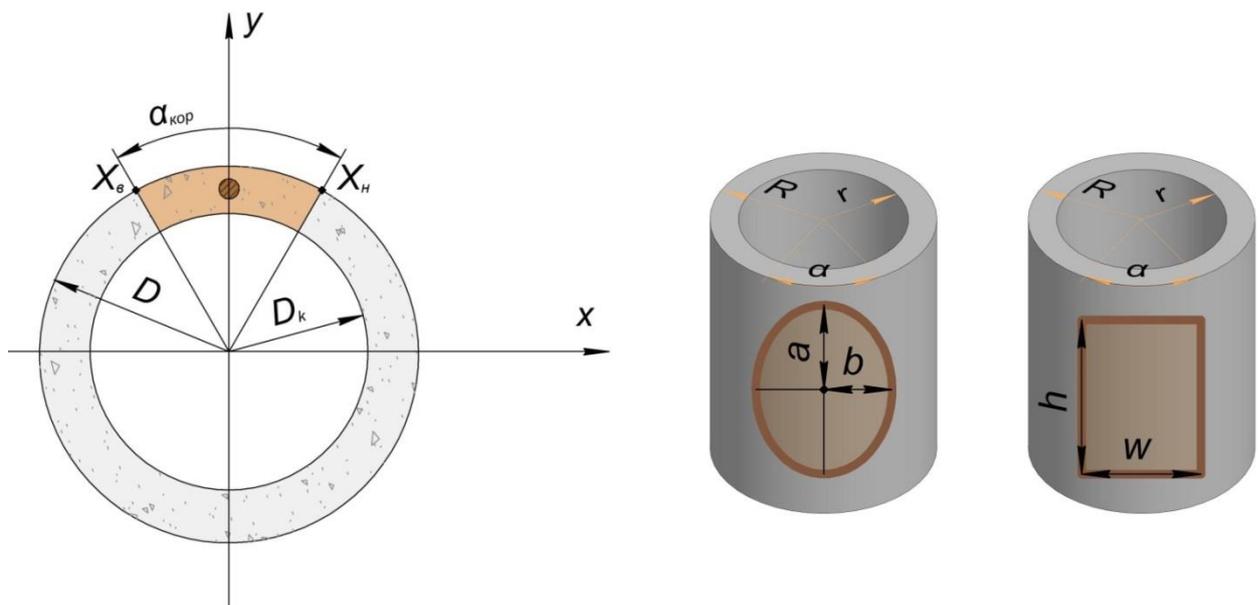


Рисунок 5.36 – Схема и обозначения для определения объема продуктов коррозии

При этом верхняя граница соответствует пятну коррозии на поверхности, а нижняя граница соответствует форме коррозии арматурного стержня.

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. Для упрощения расчетов примем площадь коррозионного пятна в форме эллипса с диагоналями a , b , как показано на рисунке 5.36.

$$S_{\text{овала}} = \pi \cdot a \cdot b; \text{ если принять, что } h = 2w, \text{ то } S_{\text{прямоуг}} = h \cdot w = 2w^2.$$

$$\text{Если принять, что } S_{\text{овала}} = S_{\text{прямоуг}}, \text{ тогда } \pi \cdot a \cdot b = 2w^2.$$

$$w = \sqrt{\frac{\pi \cdot a \cdot b}{2}}; \quad h = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b}; \quad \alpha = \frac{w}{R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{180^\circ \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{2}}}{\sqrt{\pi} \cdot R};$$

$$S_{\text{б.сект}} = \frac{\pi \cdot R^2}{360^\circ} \cdot \alpha = \frac{\sqrt{\pi} \cdot R \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{2}}}{2}; \quad S_{\text{м.сект}} = \frac{\pi \cdot r^2}{360^\circ} \cdot \alpha = \frac{\sqrt{\pi} \cdot r^2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{2}}}{2 \cdot R};$$

$$\Delta S = S_{\text{б.сект}} - S_{\text{м.сект}} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot R \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{2}}}{2} - \frac{\sqrt{\pi} \cdot r^2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{2}}}{2 \cdot R} = \frac{\left(\frac{R^2}{4} - \frac{r^2}{4}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b}}{R}; \quad (5.12)$$

$$V = \Delta S \cdot h = \frac{\sqrt{2} \sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{R^2}{4} - \frac{r^2}{4}\right) \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b}}{R} = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot (R^2 - r^2)}{2 \cdot R}. \quad (5.13)$$

Масса продуктов коррозии растворенных в объеме бетона определится по выражению (5.14)

$$m_{\text{корр}} = V_{\text{корр}} \cdot \rho_{\text{корр}}; \quad (5.14)$$

где $V_{\text{корр}}$, $\rho_{\text{корр}}$ – объем бетона и плотность продуктов коррозии.

Объем продуктов коррозии, определяется через объем бетона и измеренную концентрацию на поверхности (C):

$$V_{\text{корр}} = V_{\text{бет корр}} \cdot C; \quad (5.15)$$

Масса железа, вышедшая из арматуры, определяется по выражению:

$$m_{\text{ст}} = m_{\text{корр}} \cdot k_{\text{стр}}; \quad (5.16)$$

где $m_{\text{корр}}$ – масса продуктов коррозии, растворенная в объеме бетона; $k_{\text{стр}}$ – коэффициент структуры, определяющий неравномерность распределения продуктов коррозии.

Масса стали в твердом состоянии, вышедшая из арматурного стержня, определяется выражением:

$$m_{\text{ст}} = V_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}} ; \quad (5.17)$$

Объем стали в твердом состоянии, определяется выражениями (5.18) и (5.19),

$$V_{\text{ст}} = \frac{m_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ст}}} ; \quad (5.18)$$

$$V_{\text{ст}} = (D - D_{\text{к}}) \cdot L_{\text{к}} ; \quad (5.19)$$

где D , $D_{\text{к}}$, $L_{\text{к}}$ – диаметр арматуры в исходном состоянии, диаметр арматуры после воздействия коррозии, длина коррозионного участка.

Потеря диаметра арматурного стержня после воздействия коррозии, определится выражением:

$$(D - D_{\text{к}}) = \frac{V_{\text{корр}} \cdot S_{\text{корр}} \cdot k_{\text{стр}}}{\rho_{\text{ст}} \cdot L_{\text{к}}} . \quad (5.20)$$

Таким образом, измерив, площадь продуктов коррозии на поверхности, определив концентрацию продуктов коррозии с принятыми допущениями можно определить изменение сечения арматурного стержня. В результате проведенных исследований получены относительно простые технические средства, позволяющие средствами неразрушающего контроля определять изменения сечения арматурных стержней полых железобетонных опор, которые определяют их несущую способность. В этом случае можно воспользоваться Указаниями по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций ОАО «РЖД» [133], для которых определено снижение на 20% сечения открытых металлических конструкций, с возможностью их инструментального обследования, для признания их острodefектными.

5.5 ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты разработки и исследования технических средств оптического контроля коррозионного состояния по параметрам изображения внутренней поверхности полый железобетонной опоры. Изображения получают при помощи мехатронного комплекса на основе видеоэндоскопа с гибким оптическим зондом. Обосновано количество изображений для непрерывной развертки внутренней поверхности железобетонной опоры, обусловленное оптическими параметрами видеоэндоскопа.

2. Разработана информационная система диагностирования железобетонных опор контактной сети для хранения параметров панорамного изображения и параметров диагностируемых объектов – опор контактной сети.

3. Приведены результаты исследования оптических изображений для определения коррозионного состояния. Выполнена градуировка и получена цветовая шкала на основе испытания образцов с известным содержанием продуктов коррозии в бетоне. Представлены результаты определения концентрации продуктов коррозии на поверхности образца с неизвестным коррозионным состоянием по распределению цвета на поверхности объекта контроля.

4. 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. Таким образом, представлены технические средства и методика неразрушающего контроля для определения уменьшения сечения арматурных стержней железобетонных опор. Получен относительно простой и достоверный способ определения снижения несущей способности железобетонных опор в процессе эксплуатации.

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 (\square ад) не более 3 %.

3. Разработан опытный образец технических средств диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор с

использованием мобильного мехатронного видеоэндоскопического 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 значением 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.

6. 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исайчева, А. Г. Совершенствование методики диагностирования железобетонных опор контактной сети: дисс. канд. техн. наук: 05.22.07. – Екатеринбург, 2001. – 173 с.
2. ГОСТ 19330 – 2013 «Стойки для опор контактной сети железных дорог. Технические условия» (изменение № 1 принято протоколом МГС от 30 октября 2018 №113 – П). М.: АО "Кодекс", 2019 –. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108025> (дата обращения 20.12.2020).
3. ГОСТ 26633 – 2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.– М. : Изд-во Стандартиформ, 2016. – 12 с.
4. ГОСТ 22904 – 93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2010. – 11 с.
5. Адриан, П. Металлы (Metalshandbook), – Physical Acoustics Corporation (PAC) / Адриан, П. 9-ое издание, т. 17, ASM International, 1989. 514 с.
7. Подольский, В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкция, эксплуатация, диагностика / Подольский В. И. // ВНИИЖТ. Москва 2017. – 152 с.
8. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля (под редакцией проф. В. В. Сухорукова) / Алешин Н. П., Потапов А. В. // М.: Высшая школа, 1991. 321 с.
9. Грешников, В. А. Акустическая эмиссия. / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот // М.: Изд-во стандартов, 1976.
10. Алексеев, С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С. Н. Алексеев // «Стройиздат». НИИЖБ Госстроя СССР, 1968. 225 с
11. Вайнштейн, А. Л. Коррозионные повреждения опор контактной сети /А. Л. Вайнштейн, А. В. Павлов // «Транспорт». Москва, 1988. 111 с.
12. Sriramadasu, R. C. Detection and assessment of pitting corrosion in rebars using scattering of ultrasonic guided waves. NDT and E International /

Banerjee, S., Lu, Y. // Vol. 101 (January 2019), pp. 53-61.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.10.005>.

13. Lu, Y. Quantitative evaluation of crack orientation in aluminium plates based on Lamb waves. / . Lu Y., Ye L, Su Z, Huang N. Smart // Mater Struct 2007;16:1907–14. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/047>.

14. Wang, Y. Lamb waves for fatigue damage identification in FRP-reinforced steel plates. / Wang, Y., Guan R, Lu Y. // Nonlinear Ultrasonics 2017;80:87–95. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.05.004>.

15. Li, J. Guided waves for debonding identification in CFRP-reinforced concrete beams. / Li J, Lu Y, Guan R, Qu W. // Construct Build Mater 2017; 131:388–99. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.058>.

16. Sikdar, S. Ultrasonic guided wave propagation and disband identification in a honeycomb composite sandwich structure using bonded piezoelectric wafer transducers / Sikdar, S., Banerjee S, Ashish G. // J Intell Mater Syst Struct 2016;27:1767–79. <https://doi.org/10.1177/1045389X15610906>.

17. Rose, J.L. Ultrasonic guided waves in solid media. / Rose J.L. // Cambridge university press; 2014. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107273610>.

18. Raghavan, A. Review of guided wave structural health monitoring / Raghavan A., Cesnik // Shock Vib Digest 2007; 39:91–114. <https://doi.org/10.1177/0583102406075428>.

19. Rose, J.L. A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing. / Rose J.L., Ditri J.J., Pilarski A., Rajana K., Carr F. // NDT E Int 1994; 27 :307–10. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(94\)90211-9](https://doi.org/10.1016/0963-8695(94)90211-9).

20. Кузнецов, А. А. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий / Кузнецов, А. А., Брюхова А. С. // Омский научный вестник № 6 (162). 2018. С. 160–164.

21. Кремерс, Д. А. Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия, пер. с англ. под ред. Зорова Н. Б. / Кремерс, Д. А. Радзиемски. Л. И. // М.: Техносфера, 2009. 360 с.

22. Лабутин, Т.А. Определение хлора в бетонах на воздухе методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. / Лабутин. Т.А., Попов А.М., Райков С.Н., Зайцев С.М., Лабутина Н.А., Зоров Н.Б. // Журнал прикладной спектроскопии Т.80, № 3. 2013. С. 325

23. Wilsch, G. Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy / Wilsch, G., Weritz F., Schaurich D., Wiggenhauser H. // Construction and Building Materials, 2005, V.19, P.724-730.

24. Millar, S. Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). / Millar S., Wilsch G., Eichler T., Gottlieb C., Wiggenhauser H. // im Bauwesen – automatisierte Baustuffanalyse . Beton – und Stahlbetonbau 110 (2015), pp. 501-510.

25. Кандаев, В. А. Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы международной научно-практической конференции / Кандаев В. А., Пономарев А. В., Колесник А. В. // Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. С 102–108.

26. Патент № 2439536 Российская Федерация, МПК G01N17/00. Способ определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор / Кандаев В. А., Авдеева К. В., Кандаев А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2010132089; заявл. 29.07.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1. – 8 с.: ил. 5.

27. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта / Котельников А. В., Кандаев В. А. // – М: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 552 с.

28. Кандаев, В. А. Определение параметров границы раздела «арматура – бетон» по результатам анализа переходного процесса / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Пономарев. // Известия Транссиба. – 2014. – №4 (20). – С. 85–92.

29. Патент № 2285235 Российская Федерация, МПК G01N21/954, G01B11/30. Устройство для визуального и измерительного контроля

внутренних полостей: опубликовано 10.10.2006 / Маклашевский В. Я., Кеткович А. А.; патентообладатель Войсковая часть 75360.

30. Патент № 2352921 Российская Федерация, МПК G01N21/954. Дефектоскоп для контроля внутренней поверхности труб: опубликовано 20.04.2009 / Забрусков Н. Ю., Богданов Е. А.; патентообладатель ЗАО НПП «Нефтетрубосервис».

31. Патент № 2150690 Российская Федерация, МПК G01N21/954. Оптический дефектоскоп для контроля внутренней поверхности жидкостных трубопроводов: опубликовано 10.06.2000 / Мордаев В.И., Русанов В. М., Гришанов В.Н., Сазонникова Н.А.; патентообладатели Мордаев В.И., Русанов В.М., Гришанов В.Н., Сазонникова Н.А.

32. Патент № 167680 Российская Федерация, G01 N21/88 G01N21/954. Устройство для определения количественного состава продуктов коррозии арматуры на труднодоступных поверхностях железобетонных изделий: опубликовано 10.01.2017 / Кандаев В. А., Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Бучельникова О. С.; патентообладатель ОмГУПС.

33. Патент № 2460062 Российская Федерация, МПК G01 N21/88. Способ определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор линий электропередач и контактной сети: опубликовано 27.08.2012, Кандаев В. А., Авдеева К. В., Никифоров М. А.; патентообладатель ОмГУПС.

34. Чекулаев, В. Е. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтным воздушным линиям. – справочник. / В. Е. Чекулаев // Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М.: Трансиздат, 2001. – 350 с.

35. Нормативно – методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий. Справочник. ЦЭ МПС. М.: Транспорт, 2001. – 512 с.

36. Герасимова, В. Г. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. // – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 520 с .

37. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2008 г. – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 113 с.

38. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2009 г. – М.: ОАО «РЖД», 2010. – 95 с.

39. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2010 г. – М.: ОАО «РЖД», 2011. – 104 с.

40. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2011 г. – М.: ОАО «РЖД», 2012. – 110 с.

41. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2012 г. – М.: ОАО «РЖД», 2013. – 116 с.

42. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2013 г. – М.: ОАО «РЖД», 2014. – 120 с.

43. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2014 г. – М.: ОАО «РЖД», 2015. – 138 с.

44. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2015 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 123 с.

45. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2017. – 137 с.

46. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2017 г. – М.: ОАО «РЖД», 2018. – 119 с.

47. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2018 г. – М.: ОАО «РЖД», 2019. – 100 с.

48. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2019 г. – М.: ОАО «РЖД», 2020. – 113 с.

49. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). Департамент

электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М.: Трансиздат, 2002 г. – 184 с.

50. МПС РФ, Департамент электрификации и электроснабжения. Технологические карты для работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог: утв. 21.11.98; ЦЭ/№197-5/1-2 /. – М.: [б. и.], 1997-2000. Кн. 2: Техническое обслуживание и текущий ремонт: сборник. – 1999. – 427 с.

51. Павлов, П. В. Физика твердого тела. / Павлов П. В. // – М.: Высшая школа, 2000 г. – 494 с.

52. Бородулин, В. Н. Диэлектрики. / Бородулин, В. Н. // – Изд-во МЭИ. М.: 1993. – 60 с.

53. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники. / Пасынков, В. В., Сорокин В. С. // – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.

54. Богатенков, И. М. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов. / Богатенков И. М., Иманов Г. М., Кизеветтер В. Е. и др.; Под ред. Г. С. Кучинского. // – СПб: изд. ПЭИПК, 1998. – 700 с.

55. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. / Радченко, В. Д. // М.: Транспорт, 1975. – 360 с.

56. Техника высоких напряжений. Перенапряжения в устройствах электрической тяги. Профилактические испытания изоляции: / Егоров, В. В. // Учебное пособие для вузов ж-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2004. – 188 с.

57. Разевиг Д. В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1976. – 488 с.

58. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения: Учеб. для вузов / Под общ. ред. Кучинского. Г. С. // – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

59. Комолов, А. А. О возможности применения информации о токе утечки через поверхность загрязненной и увлажненной изоляции для целей диагностики ее электрической прочности / А. А. Комолов, В. М. Руцкий // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 2. – С. 60–65.

60. Комолов, А. А. Проблемы эксплуатации высоковольтной изоляции в условиях загрязненной атмосферы / А. А. Комолов, С. В. Коркина, В. М. Руцкий // Известия Самарского науч. центра Рос. академии наук. – Темат. выпуск. – 2010. – № 1. – С. 482–484.

61. Бунзя, А. А. Разработка элементов системы диагностики высоковольтной изоляции устройств электроснабжения тяговых подстанций: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Бунзя Александр Андреевич. Екатеринбург, 2011. – 157 с.

62. Куценко, С. М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта: дис. канд. техн. наук: 05.14.12 / Куценко Сергей Михайлович. Томск, 2006. – 143 с.

63. Кузьменко, А. Ю. Диагностирование изоляции участка контактной сети железных дорог постоянного тока / А. А. Кузнецов, А. Д. Родченко, А. Ю. Кузьменко // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. – С. 286–290.

64. Кузьменко, А. Ю. Разработка технических средств и методики контроля состояния изоляторов контактной сети постоянного тока / А. А. Кузнецов, Е. А. Кротенко, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). С. 110–116.

65. Демирчан, К. С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 4-е изд. / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Спб.: Питер, 2006. – 576 с.

66. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Электронный ресурс]: учебник для бакалавров, для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов "Электротехника, электромеханика и электротехнологии", "Электроэнергетика", "Приборостроение": допущено Министерством образования РФ / Л. А. Бессонов. // – 12-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2014. Режим доступа: <http://www.biblio-online.ru>.

67. Зажирко, В. Н. Периодические режимы однофазных и трехфазных электрических цепей: учебное пособие / В. Н. Зажирко [и др.] // ; Омский государственный университет путей сообщения. – 2-е изд. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 125 с.

67. Кузьменко, А. Ю. Моделирование и экспериментальное исследование тестовых воздействий для контроля изоляторов контактной сети постоянного тока / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, Е. А. Артюкова // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013.– С. 23-27.

68. Кузнецов, А. П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 1989 г. – 94 с.

69. Зажирко, В. Н. Компьютерное моделирование в дисциплинах "Теоретические основы электротехники" и "Электротехника" / В. Н. Зажирко // учебное пособие Омский государственный университет путей сообщения; ред. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 88 с.

70. Кузьменко, А. Ю. Моделирование процесса дистанционного диагностирования изоляторов контактной сети / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба. – 2014. – № 4 (20). – С. 92–97.

71. Кузьменко, А. Ю. Исследование аппаратного комплекса и методики контроля состояния изоляторов контактной сети постоянного тока / Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2012». – Выпуск 4. Том 2. – Одесса: Куприенко, 2012 – ЦИТ: 412-0537 – С. 39-42.

72. Серебряков, А. С. Электротехника и электроника. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Multisim / А. С. Серебряков. // учебное пособие для студентов вузов – М.: Высшая школа, 2009. – 335 с.

73. Марченко, А. Л. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim [Электронный ресурс]: / А. Л. Марченко, С. В. // Освальд учебное пособие для студентов высших учебных заведений,

обучающихся по неэлектротехническим направлениям подготовки бакалавров 550000 – технические науки и по неэлектротехническим направлениям подготовки дипломированных специалистов, 650000 – техника и технологии. – М.: ДМК Пресс, 2010. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com>.

74. Хернитер, М. Е. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств [Электронный ресурс]: пер. с англ. / М. Е. Хернитер. // – М.: ДМК Пресс, 2009. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com>.

75. Ли, В. Н. Влияние электромагнитного поля контактной сети на трещино-образование в железобетонных опорах / В.Н. Ли, Л.С. Демина // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всерос. молодежной научно-практ. конф. с междунар. участием (20-22 апр. 2011): В 5 т. / под ред. А. Ф. Серенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. – 2011. – Т.1. – С. 205-210.

76. Бессонов, В.А. Определение токов в арматуре железобетонных опор контактной сети, индуктированных тяговой нагрузкой / В.А. Бессонов, В.С. Матющенко, В.Н. Балабанов // Совершенствование и повышение эффективности устройств системы тягового электроснабжения в условиях Дальнего Востока и БАМ: межвузовский сборник научных трудов. – Хабаровск: ХаБииЖТ, 1992. – 65 с.

77. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей: Справ. кн. / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. - 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.

78. Патент № 2347231 Российская федерация, МПК G01R 31/00. Способ неразрушающего контроля железобетонных опор контактной сети железнодорожного транспорта / А.В. Ефимов, А.В. Паршин, Е.А. Русакова ; заявитель и патентообладатель ВГБОУ ВО «УрГУПС». – № 2007111099/28 ; заявл. 26.03.2007 ; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 6 с.

79. Кузнецов, А. А. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий / Кузнецов А. А., Брюхова А. С. // Омский научный вестник № 6 (162), 2018. С. 160 – 164.
80. Mehran Zeinalian, Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network, / Mehran Zeinalian, Mehrdad Zamani Khorasgani // Civil and Mechanical Engineering, 2018, no. 7, pp. 863 – 876.
81. Kuznetsov, A. A. Application of Experiment Planning Methods in Researching of Reinforced Concrete Constructions Corrosion Process / Kuznetsov, A.A. Bryukhova A.S., Volkova N.V. // Materials Science Forum Vol. 992 pp. 857-863 / doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992>.
82. Артамонов, В.С. Защита от коррозии транспортных железобетонных конструкций. / Артамонов В.С. // – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 126 с.
83. Шамшетдинов, К. Л. Исследование поляризационных характеристик трубной стали в цементном камне / Шамшетдинов, К. Л., Ловачев В. А., Глазов Н. П. и др. // Коррозия и защита трубопроводов, скважин, газопромыслового и газоперерабатывающего оборудования. Реф. сб. ВНИИОЭНГ. – М., 1979. № 6. – С. 11 - 20.
84. Москвин, В. М. Пассивация и нарушение пассивности стальной арматуры в бетоне / Алексеев С. Н., Новгородский В. И. // Защита металлов. 1965. Т. 1. № 5. – С. 564 - 599.
85. Бернацкий, А. Ф., Целебровский Ю. В., Чунчин В. А. Электрические свойства бетона. / Бернацкий А. Ф., Целебровский Ю. В., Чунчин В. А. // – М.: Энергия, 1980. – 204 с.
86. Кандаев, В. А. Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 225 с.

87. Алексеев, С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С. Н. Алексеев. // – Москва: Научно-исследовательский институт бетона и железобетона, 1968. – 225 с. – Текст: непосредственный.

88. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог: учебник для вузов ж.-д транспорта / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. // – Москва: УМК МПС России, 2000 – 512 с.

89. C. Andrade Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modeling // Materials and Structures (2019) 52:2 pp. 1 – 26 [https://doi.org/10.1617/s11527-018-1301-1\(0123456789\)](https://doi.org/10.1617/s11527-018-1301-1(0123456789)).

90. С. Н. Леонович, А. В. Степанова Деформирование и разрушение железобетонных конструкций: моделирование в условиях хлоридной коррозии // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2012. № 1 (24). С 81 – 83.

91. Леонович С. Н. Моделирование трещинообразования в бетоне под действием корродирующей арматуры // Вестник БНТУ, № 6, 2010. С. 14-20.

92. J. Ožbolt*, F. Oršanić, M. Kušter and G. Balabanić Modeling damage of concrete caused by corrosion of steel reinforcement // VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. FraMCoS-8. March 10-14, 2013. Toledo, Spain. pp. 1-12.

93. J Ožbolt, G Balabanić and F Oršanić Modelling corrosion of steel reinforcement in concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 615, 7th International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum 30 September to 2 October 2019, Stuttgart, Germany. DOI 10.1088/1757-899X/615/1/012011.

94. Коробейников А. Г., Ткалич В. Л., Пирожникова О. И. Моделирование процесса коррозии арматуры в железобетонной конструкции на объекте транспортной инфраструктуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 483 – 488. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-483-488.

95. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Конечно-элементное моделирование процессов разрушения и оценка ресурса

элементов автодорожного моста с учётом коррозионных повреждений // Инженерно-строительный журнал, №7, 2012 С. 32-42.

96. Брюхова А. С. Совершенствование метода и технических средств контроля коррозионного состояния железобетонных конструкций с применением спектральных методов анализа материалов / Автореферат дисс. на соискание ученой степ. канд. техн. наук по спец 05.11.13. Омск. 02.12.2020. 22с.

97. Кузнецов, А. А. Результаты испытания переносного прибора контроля изоляторов контактной сети / Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю. // Омский научный вестник. – 2015. – №1(137). С. 120-123.

98. Ли, В.Н. Дополнительные факторы образования трещин в железобетонных опорах контактной сети / В. Н. Ли, Л. С. Демина, А. С. Сапов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. Ростов н/Д.: Изд-во «D&V». – 2013. – № 2 (50). – С. 111-117.

99. Бенин, А. В. Моделирование процесса разрушения элементов железобетонных конструкций под действием коррозии арматуры / А. В. Бенин А. С. Семенов, С. Г. Семенов // Известия ПГУПС. – 2010. – № 2, С. 138-149.

100. Брюхова, А. С., Оценка деградации железобетонных изделий по продуктам коррозии арматуры методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. / Кузнецов А. А., Селиверстова И. В., Попов А. М., Лабутин Т. А., Зоров Н. Б. // Журнал прикладной спектроскопии. 2020; 87(5). С. 719-723.

101. Москвин, В. М. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры / В. М. Москвин, С. Н. Алексеев, Г. П. Вербецкий, В. И. Новгородский. // М.: Стройиздат, 1971. 144с.

102. Кенио, Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. / Кенио, Т. // Пер. с англ. – М.: Академия. 1987. 200 с.

103. Евдокимов, Ю. К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в

программной среде LabVIEW / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков // – М.: ДМК Пресс, 2009. 400 с.

104. Агеев, Е. В. Повышение информативности процесса диагностирования двигателей автомобилей за счет технической эндоскопии / А. В. Щербаков Ю. Г., Алехин С. А., Грашков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 1(76). С. 18-26.

105. Кузнецов, А. А. Система позиционирования оптического зонда для исследования внутренних поверхностей полых железобетонных конструкций / Брюхова А. С., Демин Ю. В. // Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 157 – 166.

106. Кузнецов, А. А. Исследование процесса коррозии железобетонных опор контактной сети с оценкой параметров прочности / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, К. И. Фомиченко, А. А. Запрудский // Известия Транссиба. – 2020. - №2(42).

107. Брюхова, А. С. Определение химического состава на внутренних поверхностях полых железобетонных конструкций при воздействии коррозии / А. С. Брюхова, Н. В. Волкова, А. Ю. Кузьменко, А. А. Кузнецов // Омский научный вестник. - 2020. - № 5(173). - С. 123–128. - DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-123-128.

108. Kuznetsov, A. A. Optical Controls Application for Diagnostics Corrosion Condition of Reinforced Concrete Structures / A. A. Kuznetsov, A. V. Ponomarev, Ya. V. Sharapova / International science and technology conference "Earth science" 25-26 January 2021, City of Vladivostok, Russian Federation // IOP Conference Series: Earth and Environmental. – 2021. – Vol.720. - DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012143. – (дата обращения: 01.02.2022). - Текст: электронный.

109. Xin Zhang, In situ Raman spectroscopy study of corrosion products on the surface of carbon steel in solution containing Cl and SO₄ / Xin Zhang, Kui Xiao, Chaofang Dong, Junsheng Wu, Xiaogang Li, Yizhong Huang // Engineering Failure Analysis. – 2011. - V. 18. - P. 1981–1989. – Текст: непосредственный.

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

111. Motamedi M., Faramarzi F., Duran O. New concept for corrosion inspection of urban pipeline networks by digital image processing. Paper presented at: IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society; 2012 Oct 25; Montreal, QC: IEEE; 2012. p. 1551-1556.

112. Lohade D.M., Chopade P.B. Real Time Metal Inspection for Surface and Dimensional Defect Detection Using Image Processing Techniques. Paper presented at: EEECOS-2016 – 3rd International Conference on Electrical, Electronics, Engineering Trends, Communication, Optimization and Sciences; 2016. June. p. 873-877.

113. Ranjan R.K., Gulati T. Condition assessment of metallic objects using edge detection. Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng. 2014; 4(5). p. 253-258.

114. Choi K.Y., Kim S.S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing. Corrosion Science. 2005. Jan 1; 47(1). p. 1-15.

115. Medeiros F.N., Ramalho G.L., Bento M.P., Medeiros L.C. On the evaluation of texture and color features for nondestructive corrosion detection. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2010 Dec 1; 2010(1). p. 817473.

116. Itzhak D., Dinstein I., Zilberberg T. Pitting corrosion evaluation by computer image processing. Corrosion Science. 1981 Jan 1; 21(1). p. 17-22.

117. Ji G., Zhu Y., Zhang Y. The corroded defect rating system of coating material based on computer vision. In Transactions on Edutainment VIII 2012 (pp. 210-220). Springer, Berlin, Heidelberg.

118. Bondada V., Pratihara D. K., Kumar C. S. Detection and quantitative assessment of corrosion on pipelines through image analysis // International

Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMa2018), Computer Science 133 (2018) p. 804–811.

119. Кузнецов, А. А., Совершенствование методов диагностирования железобетонных конструкций в системе электроснабжения железных дорог в полевых условиях / Брюхова А. С., Волкова Н. В., Волчанин Г. В. // 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.

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

121. 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.

122. Кузнецов, А. А. Формирование панорамного изображения цилиндрической поверхности для управляемого эндоскопа / Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Волчанин Г. В., Фоменко А. В. // Polish Journal of Science № 42, 2021.

123. Кузнецов, А. А. Определение коррозионного состояния железобетонных конструкций по параметрам обработки видеоизображения / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. А. Запрудский, Г. В. Волчанин // Сборник докладов шестнадцатой научной конференции «Инновационные

проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте», посвященной Дню Российской науки 8 февраля 2022 г. ОмГУПС. Омск. 2022.

124. 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.

125. Патент на полезную модель № 207785. Российская Федерация, МПК G01 N17/00, G01 N21/88. Устройство диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор контактной сети № 2021121614: заявлено 20.07.2021: опубликовано 16.11.2021. Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Волчанин Г. В., Фомиченко К. И., Брюхова А. С.

126. 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. *Lecture Notes in Networks and Systems / Springer Natures / (4) 2022. p. 54-60.* <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012014>

127. Патент № 2528585. Российская федерация, МПК G01N 17/00 (2006.01). Способ определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор: № 2013104209/28: заявлено 31.01.2013: опубликовано 20.09.2014 / Кандаев В. А., Авдеева К. В., Серебрянников Э. В. – 8 с.

128. Биргер, И. А. *Техническая диагностика*. / М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

129. Дмитренко, И. Е. *Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики*. / М.: Транспорт, 1986. 144 с.

130. Дмитренко, И. Е., *Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Учебник для вузов ж.-д. трансп.* / Сапожников В. В., Дьяков Д. В. // Под ред. И. Е. Дмитренко. М.: Транспорт, 1994. – 263 с.

131. Клюев, В. В. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник* / Под ред. В. В. Клюева – М.: Машиностроение, 1995 - 488 с.

132. Пархоменко, П. П. Основы технической диагностики. / В 2-х книгах. Кн. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. Под ред. П. П. Пархоменко, М.: Энергия, 1976, 464 с.

133. Улиг, Г. Г., Коррозия и борьба с ней. Введение коррозионную науку и технику: Ревиз Р. У. / Пер. с англ. Под ред. А. М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. Пер. изд., США, 1985. – 456 с.: ил.

134. Кандаев, В. А., Переносной прибор определения коррозионного состояния арматуры в подземной части железобетонных опор контактной сети / В.А. Кандаев, В.В. Петров, К.В. Авдеева, Ю.М. Елизарова, А.В. Кандаев, И.В. Федоров, А.В. Протченко // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: материалы научно-практической конференции. – Омск, 2009. – С. 80-84.

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

136. Волчанин, Г. В. Анализ изображений поверхности железобетонных образцов подверженных коррозии / Г. В. Волчанин, А. А. Кузнецов // 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.

137. 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.

138. 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.

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

140. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети. Распоряжение ОАО «РЖД» №1047/р от 18.04.2022. 116 с.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 207785

**Устройство диагностирования коррозионного состояния
внутренней поверхности железобетонных опор
контактной сети**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Кузнецов Андрей Альбертович (RU), Пономарев Антон Витальевич (RU), Волчанин Георгий Викторович (RU), Фомиченко Кирилл Игоревич (RU), Брюхова Анна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2021121614

Приоритет полезной модели 20 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 16 ноября 2021 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 20 июля 2031 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Западно-Сибирская железная дорога –
филиал открытого акционерного общества «Российские железные дороги»

АКТ

от «08» ноября 2023 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

г. Омск

Главный инженер
Омской дистанции
электроснабжения (ЭЧ-2)
Западно-Сибирской дирекции
по энергообеспечению

Об использовании
результатов научных
исследований и разработок
в производстве



И. А. Сухих

«08» ноября 2023 г.

Основание: разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненные под руководством заведующего кафедрой «Теоретическая электротехника», профессора, д.т.н. Кузнецова А. А., при личном участии аспиранта Волчанина Г. В.

Предложена методика и технические средства диагностирования коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети системы электроснабжения железных дорог постоянного тока. Сущность методики заключается в использовании оптических средств контроля на основе видеоэндоскопа, получения панорамного изображения внутренней поверхности железобетонной опоры с дальнейшей обработкой полученных изображений. Применена градуировка оптической системы с использованием образцов сравнения с заданным количественным содержанием продуктов коррозии. Получены критерии распознавания предельных уровней содержания продуктов коррозии на внутренней поверхности полый железобетонной опоры.

Разработка выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения № АААА-А18-118091790073-6.

Составлен комиссией в составе:

Представитель Западно-Сибирской железной дороги:

заместитель начальника Дорожной электротехнической лаборатории Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению Зап.-Сиб. ж.д. Хусаинов Е. К.;
начальник ремонтно-ревизионного цеха Омской дистанции электроснабжения (ЭЧ-2) Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению Барышев А. А.

Представители ОмГУПС:

заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника», профессор, д. т. н. Кузнецов А.А.; аспирант Волчанин Г. В.

Разработки ОмГУПС, характеризующиеся основными особенностями (признаками):

Предложенная методика оптического контроля коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети используется совместно с имеющимися электрохимическими и акустическими методиками контроля. Результатом предложенной методики является документированный отчет о состоянии подземной части железобетонной опоры с указанием наличия и степени коррозионного воздействия на опору, наличия дефектов типа трещина, нарушение сплошности исследуемой поверхности. Наличие информационной системы хранения изображений позволяет следить за развитием дефектов на заданных опорах с течением времени.

Предложены технические средства на основе видеоэндоскопа и мехатронного комплекса, позволяют получать панорамное изображение подземной части железобетонной опоры. Обработка изображений выявленных дефектов позволяет реализовать простой метод определения количественного содержания продуктов коррозии на поверхности бетона.

Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:

Рекомендуется широкое использование указанных в акте разработок ОмГУПС на железных дорогах ОАО «РЖД» при проведении непрерывного мониторинга за состоянием опорного хозяйства системы тягового электроснабжения.

Составлен в трех экземплярах:

1-й экземпляр – ОмГУПС, ЦБП;

2-й экземпляр – Омской дистанции электроснабжения (ЭЧ-2) Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению;

3-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

Председатель комиссии


_____ Е. К. Хусаинов


_____ А. А. Барышев

Члены комиссии:


_____ А. А. Кузнецов


_____ Г. В. Волчанин



УТВЕРЖДАЮ

Директор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Омский государственный
университет путей сообщения
(ОМГУПС (ОМНИИТ))»

Т. В. Комякова

11 2023 г.

о внедрении результатов диссертационной работы
Волчанина Георгия Викторовича в учебный процесс
в Омском государственном университете путей сообщения

Комиссия в составе:

Баландина С. А. – к. и. н., доцента, начальника учебно-методического управления,

Блинова П. Н. – к. т. н., доцента, директора института наземных транспортных систем,

Фоменко В. К. – к. т. н., доцента, директора института повышения квалификации и переподготовки,

Кузнецова А. А. – д. т. н., профессора, заведующего кафедрой «Теоретическая электротехника»,

составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Волчанина Г.В., а именно: методика оценки предаварийного состояния железобетонных опор контактной сети железных дорог постоянного тока; методика обработки видеоизображений для оценки количественного содержания продуктов коррозии на поверхности, а так же технические средства для получения панорамного изображения подземной части полых железобетонных опор на основе видеоэндоскопа, внедрены в учебный процесс на основании решения заседания кафедры «Теоретическая электротехника» от 25 октября 2023 г., протокол № 3.

Указанные результаты используются при изучении дисциплины «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» аспирантами, обучающимися по научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды», и выполнении выпускных квалификационных работ студентами очной формы обучения по направлению 12.03.01 «Приборостроение» (направленность «Приборы и методы контроля качества и диагностики») и 27.04.01 «Стандартизация и метрология» (направленность «Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение»).

Предложенная методика и технические средства используются в учебном процессе в институте повышения квалификации и переподготовки (ИПКП) при повышении квалификации специалистов железных дорог по направлениям «Техническое обслуживание и диагностика опор контактной сети» и «Эксплуатация, ремонт и обслуживание контактной сети».

Начальник учебно-методического управления

С. А. Баландин

Директор института наземных транспортных систем

П. Н. Блинов

Директор института повышения квалификации и переподготовки

В. К. Фоменко

Заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника»

А. А. Кузнецов