

На правах рукописи



ДЕМИНА Людмила Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ИХ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

Научный руководитель:

Ли Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник транспорта РФ, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), кафедра «Системы электроснабжения», профессор.

Официальные оппоненты:

Смердин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», профессор;

Ковалев Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электроснабжение транспорта», и.о. заведующего кафедрой.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения».

Защита состоится «20» апреля 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 218.003.07 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: Россия, 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, главный корпус, ауд. 204.

С диссертацией, авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДВГУПС» (www.dvgups.ru) и на официальном сайте (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, ФГБОУ ВО «ДВГУПС», учёному секретарю диссертационного совета Д.218.003.07, e-mail: kabalyk@festu.khv.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
Д 218.003.07, к.т.н., доцент



Ю.С. Кабалык

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В рамках реализации долгосрочной программы развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 г. поставлена цель расширения и модернизации железнодорожной инфраструктуры, расширения сети тяжеловесного, скоростного и высокоскоростного движения. В ходе реализации программы предусмотрен рост объёма тяжеловесного движения, сокращение времени движения поездов с запада на восток до 7 дней.

Для обеспечения увеличения грузооборота по участкам Забайкальской и Дальневосточной железных дорог требуется поддерживать в рабочем состоянии существующую электроэнергетическую инфраструктуру. Важным элементом внедряемых технических средств должны стать системы, основанные на современных диагностических комплексах, производящих оценку текущего состояния отдельных элементов и позволяющих производить прогноз возможного отказа.

На участках электрифицированных железных дорог в настоящее время основными элементами поддерживающих конструкций контактной сети являются железобетонные опоры. Срок эксплуатации многих опор превышает нормируемый в 40 лет, что многократно увеличивает риск возникновения повреждений, а значит, может привести к отказу контактной сети и простоя поездов.

Увеличение затрат на замену всех дефектных опор, имеющихся в парке опорного хозяйства, является нецелесообразным. Поэтому становится актуальной задача ранжирования парка опор по степени дефектности.

Действующие нормативные требования по оценке текущего состояния опорного хозяйства не позволяют произвести детальную оценку и получить необходимый результат. Контроль за изменением только одного фактора, вызывающего повреждение, не позволяет произвести градацию и плановое распределение ремонта. Более того, проведённое диагностическое обследование и ремонт, произведённый на основе полученных данных, не гарантируют возможность эксплуатации опоры в течение какого-либо определённого срока.

Поэтому выявление дополнительных факторов, влияющих на несущую способность опор контактной сети, разработка новых способов и методов контроля, а также программно-аппаратных комплексов диагностики и прогнозирования текущего состояния является важной задачей обеспечения работоспособного состояния системы тягового электроснабжения.

Степень разработанности темы исследования

Диссертационное исследование выполнено на основе работ отечественных и зарубежных учёных, которые занимались вопросами воздействия эксплуатационных факторов на трещинообразование в железобетонных опорах контактной сети, электрокоррозией и коррозией железобетона, совершенствованием конструкций, технологией ремонта и способами неразрушающего контроля, оценкой несущей способности и прогнозированием сроков их службы (Андреев О.А., Афанасьев В.А., Вакуленко А.Г., Галкин А.Г., Гуков А.И., Запрудский А.А., Исайчева А.Г., Кандаев В.А., Кандаев А.В., Ковалев А.А., Кудрявцев А.А., Кудрявцев С.А., Ли В.Н., Михеев В.П., Подольский В.И., Селедцов Э.П., Сидоров О.А., Смердин А.Н., Стоянович Г.М., Трубицин М.А., Shimizu M., Ueda H., Zhao X. и многие другие).

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, дополняют имеющиеся научные труды.

Объектом исследования являются железобетонные опоры контактной сети электрифицированных железных дорог переменного тока.

Предметом исследования являются физико-механические процессы, протекающие в железобетонных опорах контактной сети, способы и методы оценки состояния опорных конструкций системы тягового электроснабжения.

Цель исследования – повышение эффективности эксплуатации железобетонных опор контактной сети электрифицированных железных дорог путём оценки их остаточной несущей способности и прогнозирования срока службы.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Оценить влияние природно-климатических факторов и электромагнитного воздействия на дефектообразование бетонной части опор;
2. Создать имитационную модель промежуточной консольной опоры контактной сети, учитывающую исследованные в диссертации эксплуатационные воздействия;
3. Разработать методику прогнозирования остаточного ресурса опор контактной сети;
4. Предложить порядок проведения диагностического обследования железобетонных опор.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Выявлены дополнительные факторы, влияющие на трещинообразование железобетонных опор контактной сети, позволяющие оценить напряжённое состояние бетонной части;
2. Получена имитационная модель промежуточной консольной опоры, позволяющая произвести оценку влияния эксплуатационных воздействий на её несущую способность;
3. Разработана методика прогнозирования остаточного ресурса опор контактной сети, позволяющая на основе срока службы и величины дефектов для конкретных условий эксплуатации определить их остаточную несущую способность.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Установлено влияние дополнительных эксплуатационных факторов на образование трещин в бетоне опор. Полученные результаты позволяют применять комплексный подход к оценке несущей способности опор контактной сети.
2. Разработана в среде SolidWorks модулем SolidWorks Simulation имитационная 3D модель промежуточной консольной железобетонной опоры контактной сети, позволяющая определить напряжённое состояние опоры при заданных нагрузках в расчётных режимах с учётом дополнительного влияния природно-климатических факторов; получены эпюры, отражающие характерные точки, в большей степени предрасположенные к появлению трещин. Предложена кривая усталости (жизни) железобетонной опоры, позволяющая (с учётом влияния дополнительных факторов трещинообразования) получить представление о наличии разрушений и степени повреждения бетона.
3. Доказана необходимость повышения достоверности результатов визуальной и аппаратной диагностики на основании проведённых разрушающих испытаний.
4. Предложена методика прогнозирования состояния железобетонных опор контактной сети, позволяющая оценить остаточную несущую способность и предполагаемый срок службы опор для конкретных условий эксплуатации.

Личный вклад автора состоит: в проведении факторного анализа и классификации причин появления дефектов опор контактной сети, влияющих на несущую

способность железобетонных опор, с последующим формированием задач теоретических и экспериментальных исследований; в разработке имитационной модели, позволяющей оценить состояние бетонной части опор с учётом влияния дополнительно выявленных эксплуатационных факторов; в разработке методики прогнозирования срока службы опор; определении порядка проведения диагностического обследования железобетонных опор с оценкой их остаточного ресурса.

Методология и методы исследований. Теоретические и экспериментальные исследования проведены на основе методов системного подхода с использованием теорий электрического и электромагнитного полей, основ строительной механики, математического моделирования на ЭВМ процессов напряжённого состояния опор контактной сети с применением универсальной математической программы Mathcad, компьютерной программы проектирования SolidWorks с реализацией вычислений методом конечных элементов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Дополнительные факторы, приводящие к образованию трещин в опорах контактной сети, позволяющие с их учётом оценить прочность бетонной части.

2. Имитационная модель промежуточной консольной опоры, позволяющая определить напряжённое состояние опоры при заданных нагрузках в расчётных режимах с учётом дополнительного влияния природно-климатических факторов и отражающая характерные места повреждений.

3. Методика прогнозирования остаточного ресурса железобетонных опор контактной сети, позволяющая оценить текущее состояние и остаточную несущую способность, с учётом дополнительных выявленных факторов трещинообразования в условиях эксплуатации на Дальнем Востоке.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты теоретических и практических исследований приняты к использованию Дальневосточной дирекцией по энергообеспечению – структурным подразделением Трансэнерго – филиалом ОАО «Российские железные дороги», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Научные результаты диссертации нашли применение в ходе научно-исследовательской работы, при проведении научно-технических экспертиз, а также в ходе реализации учебного процесса по дисциплинам «Контактная сеть и линии электропередач», «Диагностика силового оборудования электроэнергетических систем», «Эксплуатация технических средств обеспечения движения поездов» в лаборатории неразрушающего контроля кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС.

Степень достоверности научных положений, выводов и полученных результатов подтверждается корректностью использования положений физики твердого тела, математического моделирования; подтверждена практической реализацией и экспериментальной проверкой материалов исследования, разрабатываемых методов контроля состояния железобетонных опор.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на:

– всероссийской научно-практической конференции представителей производства, учёных транспортных вузов и инженерных работников «Наука, творчество и образование в области электроснабжения – достижения и перспективы», г. Хабаровск, ДВГУПС, 11-12 ноября 2010 г.;

- всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования», г. Хабаровск, ДВГУПС, 21-23 апреля 2010 г., 10-13 апреля 2012 г.;
- всероссийской молодёжной научно-практической конференции с международным участием «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке», г. Хабаровск, ДВГУПС, 20-22 апреля 2011 г.; 23-25 апреля 2013 г.;
- международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 14 июня 2019 г.;
- международном симпозиуме «ELTRANS 10.0», г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 9-11 октября 2019 г.;
- международной научной конференции «Актуальные проблемы зелёной архитектуры, гражданского строительства и экологии «ТРАСЕЕ 2019»», г. Москва, 20-22 ноября 2019 г.;
- 78-й межвузовской студенческой научно-практической конференции «Научно-техническому и социально-экономическому развитию Дальнего Востока России – инновации молодых», г. Хабаровск, ДВГУПС, 20-23 марта 2020 г.;
- VIII международной научной конференции «Транспорт Сибири – 2020», г. Новосибирск, 22-27 мая 2020 г.;
- всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива», г. Хабаровск, ДВГУПС, 19-20 ноября 2020 г.;
- всероссийской научно-технической конференции «Транспорт Урала – 2020», г. Екатеринбург, 17 ноября 2020 г.;
- заседаниях и научно-технических семинарах кафедры «Системы электроснабжения», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2010–2013, 2019–2020 гг.

Научные достижения. Новизна и значимость полученных результатов настоящего исследования удостоены номинации за лучший доклад на двух Всероссийских конференциях.

Публикации. Основные положения диссертации нашли отражение в 17 печатных работах, из них 2 работы представлены в журналах, входящих в международную базу научного цитирования Scopus, 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объём диссертации. Работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 147 наименований, шести приложений. Текст диссертационной работы изложен на 162 страницах печатного текста, включает 15 таблиц, 42 рисунка.

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

В главе 1 представлен анализ конструктивных особенностей и работы железобетонных опор контактной сети, рассматриваются причины появления дефектов, а также факторы, влияющие на несущую способность.

На основании проведённого анализа установлено, что в эксплуатации дирекций находится 112160 дефектных опор контактной сети. Наибольший удельный вес дефектных опор контактной сети наблюдается в дирекциях: Красноярской – 22%, Восточно-Сибирской – 18,8%, Дальневосточной – 16%, Южно-Уральской – 7,8%, Северо-Кавказской – 6,1%, Куйбышевской и Юго-Восточной – по 4,8%.

На основании проведённых исследований и обобщения опыта эксплуатации, все причины дефектообразования условно были классифицированы на технологические, конструктивные и вызванные влиянием внешних воздействий. Все эти факторы оказывают негативное влияние на опору. Изменение напряжённого состояния материала опор вызывается статическими нагрузками, динамическими воздействиями от ветра и подвижного состава, а также температурными воздействиями. Воздействие токов утечки, агрессивное влияние почвы и атмосферы приводит к изменению физико-механических свойств материала опор. Длительное воздействие одних или неблагоприятное сочетание других может привести к появлению дефектов, и, как следствие к снижению несущей способности опор.

В процессе эксплуатации на опоры контактной сети (КС) воздействует ряд факторов. Предлагаемая нами их классификация представлена на рис. 1.

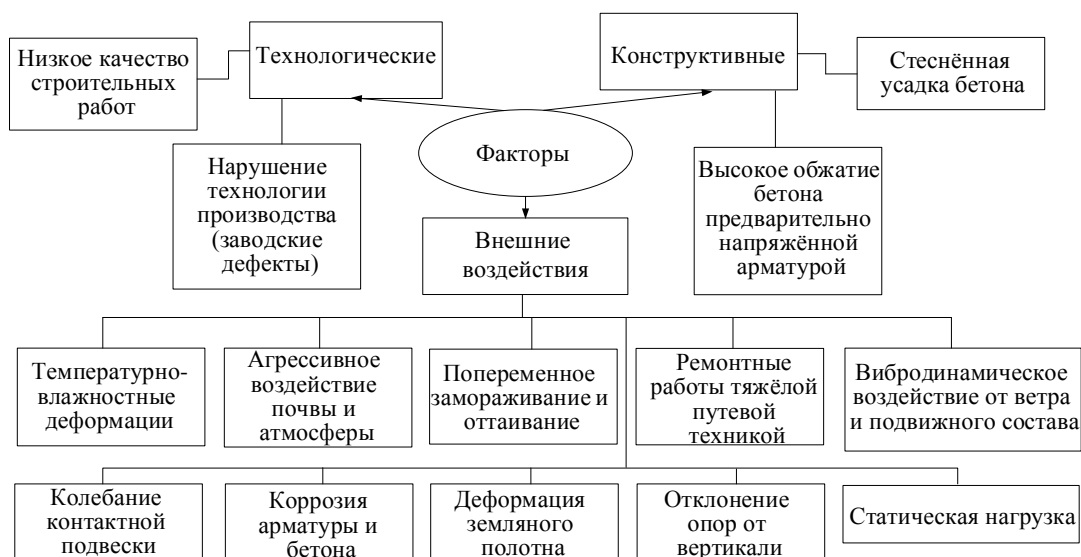


Рис. 1. Факторы, влияющие на несущую способность железобетонных опор контактной сети

Многочисленные наблюдения за состоянием опор контактной сети в ходе эксплуатации позволили констатировать, что основными проблемами повреждения опор контактной сети являются трещины в бетоне – продольные и поперечные.

На основании проведённого анализа было выявлено, что продольные трещины в опорах являются самым распространённым видом повреждений. Главной причиной развития продольных трещин в опорах в эксплуатационный период является воздействие природно-климатических факторов, которые вызывают изменение температуры в теле опоры, что приводит к появлению напряжений в поверхностных слоях бетона, снижающих прочность бетона на растяжение. Комплекс температурных воздействий окружающей среды на опоры контактной сети довольно велик, но проявляется он неравномерно и не одновременно.

Причиной появления поперечных трещин являются силовые факторы. Они могут быть также обусловлены недостаточным сцеплением арматуры с бетоном. Раскрытие таких трещин более 0,5 мм не допускается.

В диссертационной работе особое внимание уделяется дополнительным факторам образования трещин, таким как термомеханический эффект, возникающий при воздействии солнечной инсоляции и электромагнитное поле контактной подвески.

Оценка остаточной несущей способности железобетонных опор, используемых в электросетях различного назначения, является довольно сложной задачей, т.к. часть дефектов носит скрытый характер, а сложное физико-химическое сочетание арматуры и бетона требует комплексного подхода к решению данной проблемы.

Определение прочности бетона и характеристик трещин на поверхности сегодня выполняется неразрушающим ультразвуковым методом при поверхностном прозвучивании. Рассмотрено разработанное нами устройство для оперативного измерения глубины заложения опоры контактной сети «ИДОКС», позволяющее оценить целостность бетона в подземной части опор.

В главе 2 представлен анализ дефектообразования в железобетонных опорах контактной сети вследствие температурно-влажностных деформаций.

В процессе эксплуатации опоры подвергаются сложному температурному воздействию, наиболее значимыми составляющими которого являются: периодические суточные колебания температуры наружного воздуха, солнечная инсоляция, тепловые удары от выпадающих осадков и движущихся воздушных масс, перепад температур между надземной и подземной частями опор в зоне входа их в грунт, конвективное воздействие подвижного состава, попеременное замораживание и оттаивание и др.

В целом, характеризуя температурно-влажностные напряжения, возникающие в опорах вследствие температурной несовместимости деформаций наружных и внутренних слоёв бетона, следует отметить, что они являются наиболее жёсткими, опасными напряжениями и комплексно воздействуют на опору. Причём большинство из них в отдельности имеют небольшую величину и вряд ли могут являться основной причиной появления трещин в бетоне опор. Однако необходимо учитывать, что эти напряжения суммируются с напряжениями, возникающими в бетоне вследствие других причин. В результате этого суммарные напряжения в теле опоры могут превзойти прочность бетона на растяжение и вызвать сначала появление одиночных трещин, а со временем множество продольных трещин и сетку трещин, резко снижающих несущую способность. Стоит отметить, что при определении величин температурных напряжений в теле опор необходимо учитывать и региональную особенность величин температур.

В работе проведено моделирование температурного распределения по поверхности опор при воздействии холодного ветра с дождём (рис. 2).

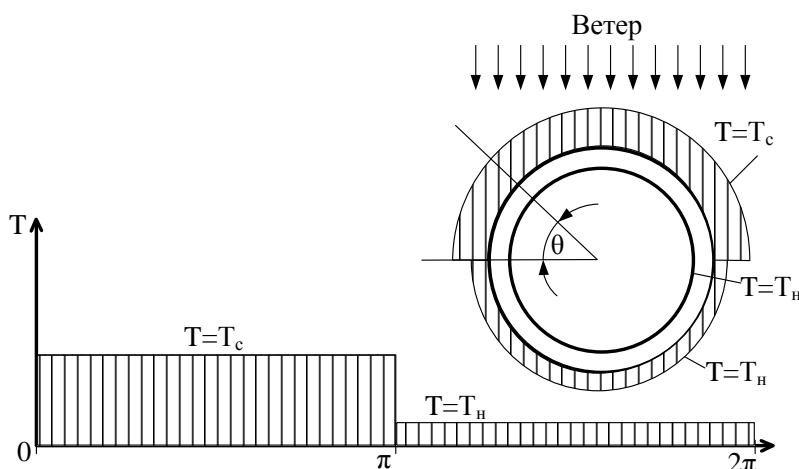


Рис. 2. Распределение температуры по граничным поверхностям опоры: температура поверхности опоры с наветренной стороны T , равная температуре ветра (дождя) T_c ; температура подветренной стороны T_n ; температура на внутренней поверхности (постоянна) и равна T_n

Расчёт температурного поля в бетоне центрифугированных опор, появляющегося под воздействием холодного ветра и дождя, сводится к решению уравнения теплопроводности Фурье при граничных условиях

$$T = \left\{ \begin{array}{l} T_c \text{ при } \pi \geq \theta \geq 0 \\ T_n \text{ при } 2\pi \geq \theta \geq \pi \end{array} \right\} \text{ при } r = a, \quad (1)$$

$$T = T_n \text{ при } 2\pi \geq \theta \geq 0 \quad \text{при } r = b$$

где r – радиус опоры, см; b – наружный радиус опоры, см; a – внутренний радиус опоры, см; θ – угол поворота, рад.

В результате расчётов, используя приведённые значения коэффициента линейного температурного расширения $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ 1/град, коэффициента Пуассона $\mu = 0,15$, при заданных размерах $b = 20,5$ см, $a = 14,5$ см, имеем выражение для определения напряжений во внешних слоях цилиндра

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E (T_c - T_n)}{1 - \mu} (0,3 + 0,32 \sin\theta). \quad (2)$$

Холодные дожди и ветры, попадая на опоры, вызывают быстрое понижение температуры её поверхности. В результате возникает перепад температур по периметру и толщине стенки. Получено, что максимум растягивающих напряжений $\sigma_{\theta\theta\max} = 1,787$ МПа (17,87 кгс/см²) (рис. 3) находится на той половине поверхности опоры, на которую воздействует холодный ветер и дождь. Данное значение напряжения велико и достигает величины, близкой к допустимой (2,1 МПа), что, в свою очередь, может провоцировать появление трещин.

Для опор контактной сети, являющихся тонкостенными конструкциями, значительное влияние оказывают внутрисуточные колебания температуры воздуха. Полученный график изменения температурных напряжений на наружной поверхности опоры при суточных колебаниях температуры представлен на рис. 4.

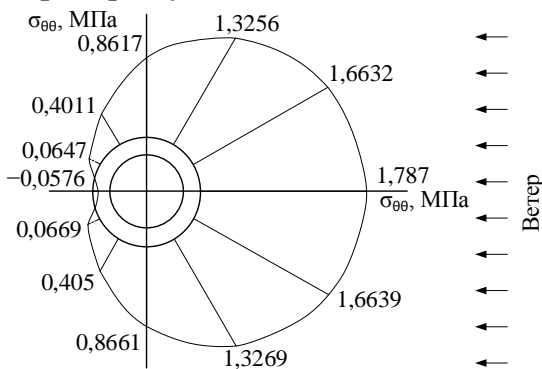


Рис. 3. Распределение напряжений во внешних слоях поперечного сечения опоры

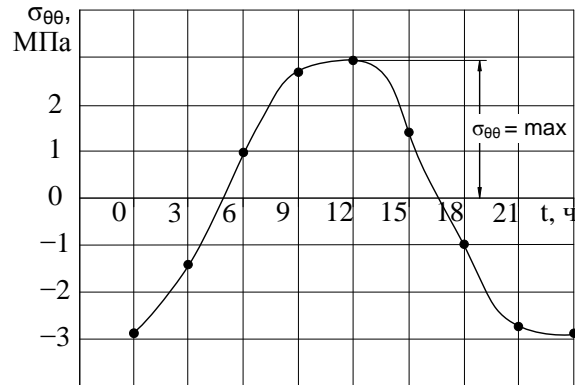


Рис. 4. Кривая изменений температурных напряжений на наружной поверхности железобетонной опоры при суточных колебаниях температуры окружающей среды

Для внешней боковой поверхности цилиндра ($r = r_1$) выражение тангенциальных напряжений определяется как

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E}{1 - \mu} \left\{ -T_0 \cos \frac{2\pi t}{\tau} + \frac{2T_0}{(r_0^2 - r_1^2) b_0(r_0)} \left\{ r_0 b_1(r_0) \cos \frac{\pi}{2} \left[4 \frac{t}{\pi} + \beta_0(r_0) - \beta_1(r_0) + \frac{1}{2} \right] - \right. \right. \quad (3)$$

$$\left. \left. - r_1 b_1(r_1) \cos \frac{\pi}{2} \left[4 \frac{t}{\pi} + \beta_0(r_0) - \beta_1(r_1) + \frac{1}{2} \right] \right\} \right\},$$

где T_0 – амплитуда колебаний температуры на наружной поверхности; p – частоты колебаний, $1/ч$; t – время, ч; r_0 – условный наружный радиус опоры, см; r – условный текущий радиус опоры, см; τ – период колебаний, ч. Значения функций $b_0(r)$, $\beta_0(r)$ в выражении определяются по таблицам Янке.

Согласно расчётам, наибольшие растягивающие напряжения в момент, когда $\cos pt = 1$ при амплитуде $T_0 = 7^\circ C$, составляют $\sigma_{00} = 2,919$ МПа ($29,19$ кгс/см²) и возникают на наружной поверхности опоры. Напряжения такой величины, превышающие нормативное значение напряжения на растяжение, могут служить причиной преждевременного появления продольных трещин.

Определено влияние солнечной инсоляции на напряжённое состояние опоры. Найдены касательные растягивающие напряжения в поперечном сечении стержня, возникающие при перемещении теплового луча по поверхности опоры, направленные противоположно нему. Получено, что максимальные растягивающие напряжения возникают на северной стороне опоры в нижней её части, где диаметр опоры наибольший, $\sigma = 1,19$ МПа ($11,9$ кгс/см²).

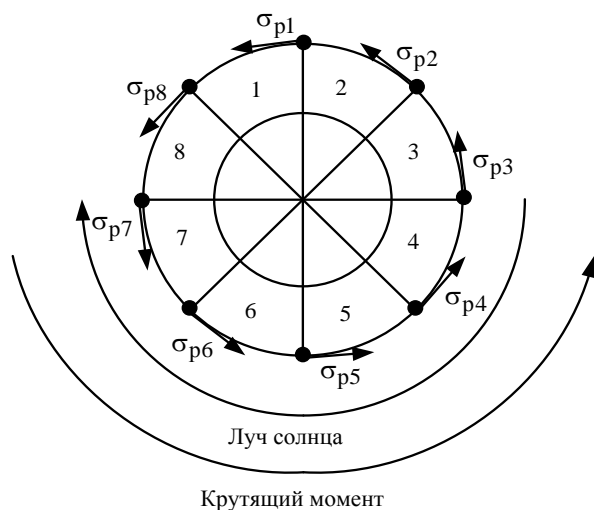


Рис. 5. Схема возникновения термомеханического эффекта

В главе 3 представлено исследование дополнительного фактора (к силовым) трещинообразования в железобетонных опорах контактной сети.

Установлено влияние электромагнитного поля контактной сети на появление поперечных трещин в верхней части опор.

Электрический ток, индуктируемый в спиральной арматуре опоры, мА

$$I_{ap} = \frac{E}{Z}, \quad (4)$$

где E – электродвижущая сила, наведённая током контактной подвески в арматурном кольце, В; Z – полное сопротивление кольца арматуры, Ом.

Для проведения расчётов составлена расчётная схема для определения токов в спиральной арматуре железобетонных опор. Определены величины полного сопротивления кольца арматуры $Z = 0,01642$ Ом и индуктированного тока $I_{ap} = 13,26$ мА.

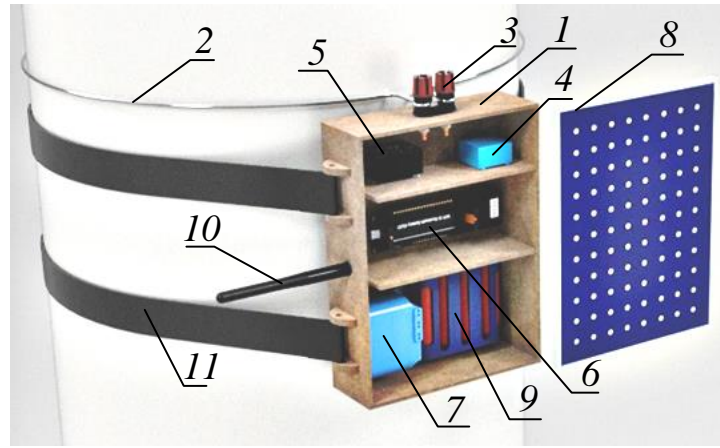
Для оценки величины наведённого тока в арматуре были проведены экспериментальные исследования с помощью специально сконструированного устройства (рис. 6).

Выявлено, что при перемещении теплового луча по поверхности опоры, вследствие неравномерного нагрева её поверхности, возникают растягивающие касательные напряжения, которые, в свою очередь, приводят к появлению крутящего момента (рис. 5).

Рассчитан максимальный крутящий момент опоры $M_{кр} = 5515,94$ даН·м.

Это явление названо нами термомеханическим эффектом (совместное действие температурных напряжений и напряжений при кручении) и является ведущей причиной образования продольных трещин. Следует особо отметить, что данное явление ранее не учитывалось и предложено нами как новый фактор, влияющий на продольное трещинообразование.

Рис. 6. Устройство определения наведённого тока в арматуре железобетонных опор контактной сети переменного тока: корпус 1, раздвижной магнитопровод 2, который представляет собой стальное арматурное кольцо, клемник 3, датчик тока 4, преобразователь питания 5, контроллер 6, контроллер питания 7, солнечная панель 8, аккумулятор 9, wi-fi антенна 10, ремень (застёжка) 11



Устройство позволяет производить измерение токов, которые протекают в витковой арматуре опор через раздвижной магнитопровод, при этом возможно использование различных магнитопроводов и крепежей для разных типов опор (заявка на полезную модель от 23.10.2020 г. рег. №2020138400).

Доказав влияние электромагнитного поля и определив величину индуцируемого тока, описано появление возможных термических процессов в теле опоры. Превышение температуры арматуры над температурой окружающей среды, при прохождении по ней найденных индуцированных токов определяется из дифференциального уравнения, °С

$$c m \Theta'(t) = I_{\text{ар}}^2 \frac{\rho_{20}}{S} \left[1 + \alpha (T_{\text{окр}} + \Theta(t) - 20) \right] - \varpi P (\Theta(t))^h, \quad (5)$$

где P – периметр провода арматуры; c – удельная теплоёмкость стали; m – площадь сечения провода арматуры; ρ – удельное электрическое сопротивление стали при температуре 20 °С; S – площадь сечения провода арматуры; α – температурный коэффициент изменения сопротивления; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С; ϖ – коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды, равный $\varpi = 6,72$, h – угловой коэффициент прямой, равный $h = 1,25$; $\Theta(t)$ – превышение температуры арматуры над температурой окружающей среды, °С.

Уравнение (5) решается численным методом Рунге–Кутта в программной среде Mathcad. Превышение температуры витковой арматуры над температурой бетона может достигать $4,3 \cdot 10^{-3}$ °С. С течением времени происходит нагрев бетона, в первую очередь, в месте сцепления его со спиральной арматурой и далее в тепловой процесс будут включаться другие слои бетона, находящиеся ближе к поверхности. Это повлечёт к постепенному подсушиванию бетона и изменению его первоначальной структуры, снижая, тем самым, его прочность на растяжение.

Для оценки величины диэлектрических потерь в бетоне опор рассмотрен однопутный участок контактной сети с цепной подвеской ПБСМ-95+МФ-100 и проводами ДПР (АС-70), расположенными с полевой стороны.

Удельные потери мощности от токов абсорбции в бетоне, кВт/м³ находятся из выражения

$$p = E^2 f \frac{\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}}, \quad (6)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость бетона; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота тока питающей сети, Гц.

Тогда потери мощности от наведённых токов в арматуре опор, $Вт \cdot 10^{-3}$,

$$P = I_{ap}^2 R, \quad (7)$$

где R – активное сопротивление витка спирали, $R = 0,0114$ Ом; I_{ap} – расчётное значение индуцируемого тока, мА.

В ходе проведённых расчётов получены зависимости суммарных потерь мощности от сквозных токов и токов абсорбции и от наведённого тока в арматуре опоры при токе в контактной сети 500 А.

Токи, индуцированные в спиральной арматуре, под действием электромагнитного поля контактной подвески, способствуют нагреванию поперечной арматуры, и, как следствие, нагреву бетона. Определено, что диэлектрические потери мощности дополнительно рассеиваются в бетоне, влияя на его температурный режим, вызывая местный нагрев, который может привести к термическому ослаблению связей в бетоне. Вероятнее всего, этот процесс начнётся изнутри, в месте сцепления бетона с арматурой.

Очевидно, что ослабление и потерю связей между структурными элементами в теле опоры при внешнем осмотре выявить не удастся. Однако, как только «высушивание» бетона достигнет поверхности опоры, будут заметны «высолы». Этот процесс будет способствовать появлению трещин.

В главе 4 представлено моделирование промежуточной консольной железобетонной опоры контактной сети электрифицированных железных дорог, учитывающее эксплуатационные воздействия, а также результаты обследования опор программно-аппаратными комплексами.

Вся основная работа проводилась в модуле SolidWorks Simulation. Инженерный анализ осуществлялся методом конечных элементов, точность расчётов достигалась за счёт представления конструкции в виде триангулированной сетки.

Получена имитационная 3D модель промежуточной консольной опоры с учётом направлений действующих нагрузок (рис. 7).

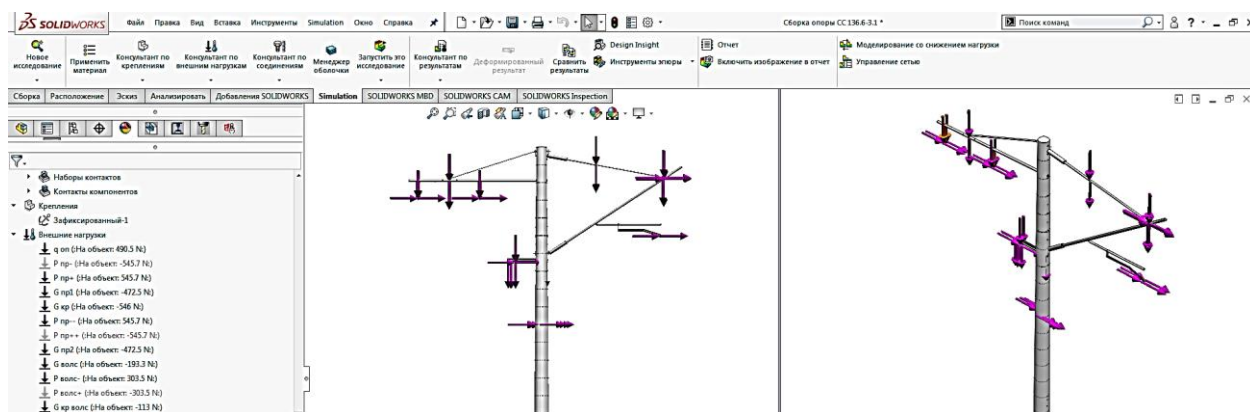


Рис. 7. Модель промежуточной консольной опоры с учётом направлений действующих нагрузок в программной среде SolidWorks

В диссертационной работе предлагается помимо нормативных нагрузок учитывать эксплуатационные воздействия на опору, вызывающие дополнительные нагрузки. А именно: суточные колебания температуры окружающей среды, воздействия холодного ветра с дождём и термомеханический эффект, который включает в себя совместное действие температурных напряжений и напряжений при кручении.

Разработанная имитационная модель опоры позволяет произвести многофакторный анализ природно-климатических воздействий.

Предложено использовать усовершенствованную единую классификацию дефектов железобетонных опор, в которой приведены допустимые размеры поврежденных центрифугированных стоек, с указанием возможных причин появления, вида дефектов, графических схем, собранные воедино.

Проведена оценка результатов обследования железобетонных опор на Дальневосточной железной дороге на основе визуальной, аппаратной диагностики и разрушающих испытаний.

Для проведения разрушающих испытаний были выбраны две опоры контактной сети под номерами 65, 71 на перегоне Угольная – Океанская. По результатам визуального осмотра данные опоры признаны остродефектными.

До проведения разрушающих испытаний на рассматриваемых опорах (в нагруженном состоянии) были произведены измерения прибором УК-14ПМ. Согласно полученным данным сделан вывод, что опора №65 выработала свой ресурс и подлежит замене, т.к. показатель П2 больше 1,4. Опора №71 снизила свою несущую способность, т.к. показатель П2 больше допустимого (1,1), но меньше предельного (1,4) значения. Хотя по результатам визуального осмотра опора №71 была признана остродефектной и заменена на новую, но приборная диагностика до начала разрушающих испытаний показала, что опора может ещё находиться в эксплуатации.

По результатам разрушающих испытаний выявлено, что опоры могут находиться в эксплуатации: остаточная несущая способность опор №65 и №71 составляет 44% и 43% соответственно.

Результаты проведённых измерений и испытаний свидетельствуют о том, что приборная диагностика не всегда достоверна и допустима: измерения, проведённые прибором УК-14ПМ, не подтверждены разрушающими испытаниями опор.

В результате визуального осмотра 19-ти остродефектных опор лишь 7 опор по результатам приборной диагностики действительно требуют замены.

Доказана необходимость повышения достоверности результатов приборных исследований для оценки несущей способности железобетонных опор контактной сети.

В главе 5 представлена разработанная методика прогнозирования остаточного ресурса опор контактной сети.

Получена расчётная кривая усталости (жизни), которая построена по данным статического анализа, где циклическая нагрузка – это суммарная нелинейная нагрузка на опору с учётом заданного временного диапазона, при этом каждый последующий цикл суммирует полученные повреждения.

В ходе анализа усталостных явлений были получены эпюры срока жизни (рис. 8, *а*) и повреждений (рис. 8, *б*), представленные в цветовом градиенте (от синего до красного). Разработанная программа на основе коэффициента нагрузки определяет скорректированное знакопеременное напряжение (из значений напряжений в статическом исследовании) для каждого узла и определённого типа события усталости.

Эпюра повреждений наглядно отображает повреждения опоры (цветовой градиент) в зависимости от количества циклов. Красным цветом показаны места, подверженные разрушению. Полученные данные свидетельствуют о том, что повреждения возникают через 25 лет (в соответствии с кривой усталости) и, в первую очередь, в местах закладных деталей, пяты консоли, тяги и условного обреза фундамента. Во вторую очередь, ориентировочно через 29–30 лет, страдают места вентиляционных отверстий, т.к. они близко расположены к УОФ и испытывают наибольшую нагрузку.

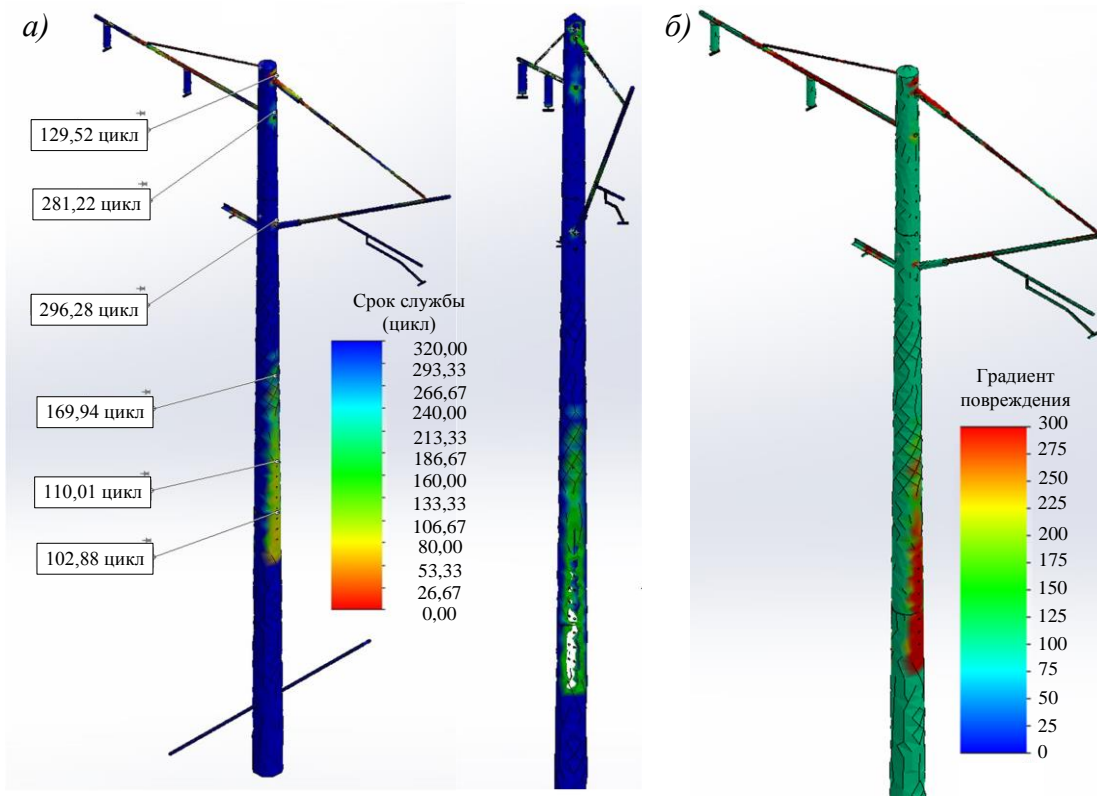


Рис. 8. Эпюра срока жизни (а) и повреждений (б) железобетонной опоры контактной сети

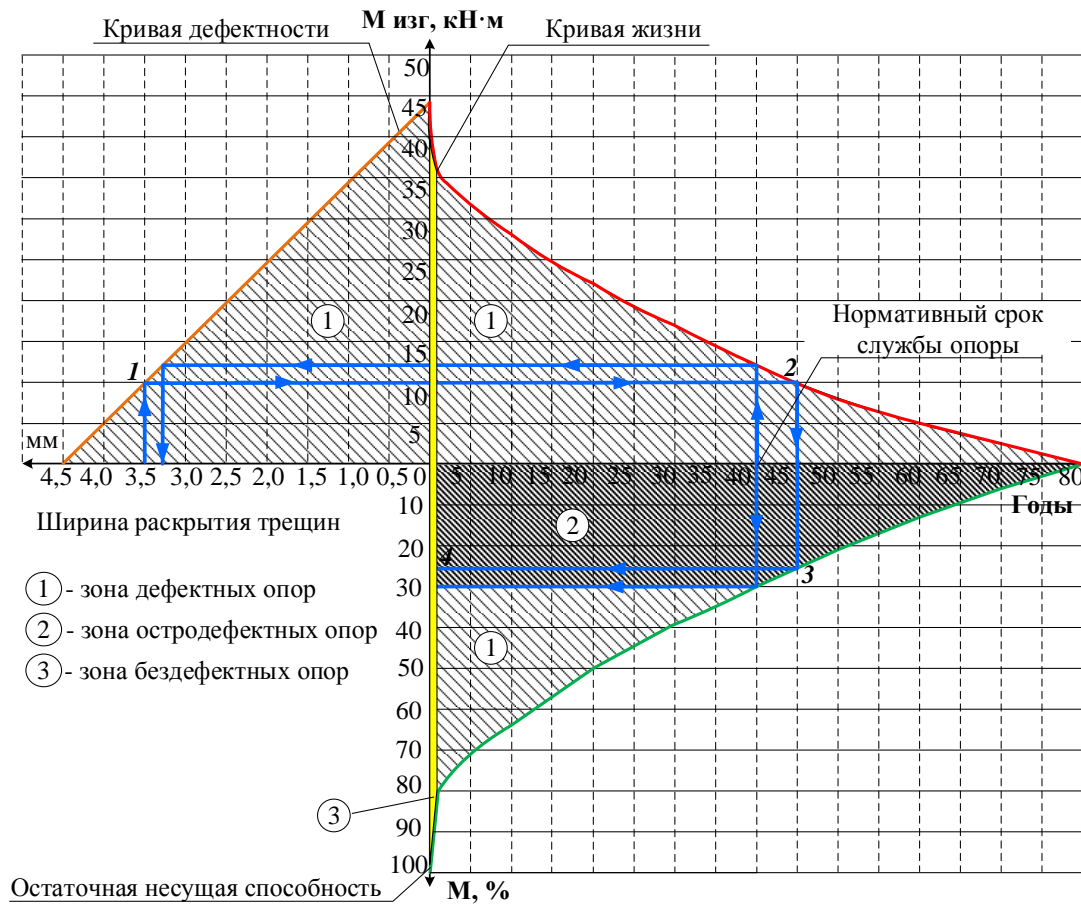


Рис. 9. Номограмма для определения остаточного ресурса опор

Эпюра срока жизни отображает срок службы опоры, где синим цветом показаны участки, которые через 80 лет не придут в негодность. Также отмечены характерные зоны (участки от красного до зеленого градиента), которые начнут разрушаться в первую очередь с указанием периода наступления разрушения.

Предлагается номограмма для определения остаточного срока службы опор на примере климатических условий города Хабаровска в зависимости от ширины раскрытия трещин (при допущении прямолинейной зависимости изгибающего момента) и кривой жизни (см. рис. 9). В случае отсутствия продольных трещин необходимо воспользоваться осью срока эксплуатации опоры.

Если пользоваться данными обследования бетонной части опор ультразвукового прибора УК-1401 (УК-14ПМ), то дефектность опор на номограмме можно оценивать показателем П2. Технология определения остаточной несущей способности при этом не меняется.

Разработанный порядок проведения диагностического обследования железобетонных опор с оценкой их остаточного ресурса представлен на рис. 10.



Рис. 10. Рекомендуемый порядок проведения диагностического обследования железобетонных опор с оценкой их остаточного ресурса

Разработанная методика прогнозирования остаточного ресурса железобетонных опор контактной сети, реализованная в программной среде SolidWorks модулем SolidWorks Simulation, позволяет на основе срока службы и величины дефектов для конкретных условий эксплуатации определить их остаточную несущую способность с возможностью ранжирования по степени дефектности. Адекватность результатов расчёта по полученной имитационной модели подтверждена достаточно высокой степенью согласования с результатами разрушающих испытаний (расхождение составляет не более 10%).

Реализация методики прогнозирования состояния железобетонных опор контактной сети позволит сэкономить средства в объёме 134396,89 руб. при замене опоры по плану (графику), исключая дополнительные затраты, связанные с задержкой движения поездов при внезапном изломе или падении опоры и затрат на внеплановую замену опоры контактной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый комплекс исследований позволил решить ряд теоретических и практических задач, направленных на повышение эффективности эксплуатации железобетонных опор контактной сети электрифицированных железных дорог путём оценки их остаточной несущей способности и прогнозирования срока службы.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования состоят в следующем:

1. В процессе эксплуатации на железобетонные опоры контактной сети воздействует ряд факторов, приводящих к появлению дефектов и, как следствие, к снижению несущей способности опор. Выявлена необходимость оценки влияния природно-климатических факторов и электромагнитного воздействия на дефектообразование бетонной части опор.

2. Определены дополнительные факторы, приводящие к образованию трещин в опорах контактной сети, позволяющие с их учётом оценить прочность бетонной части: термомеханический эффект, возникающий при перемещении теплового луча по поверхности опоры; влияние электромагнитного поля контактной подвески.

3. Создана имитационная модель промежуточной консольной опоры контактной сети в среде SolidWorks, учитывающая исследованные в диссертации эксплуатационные воздействия, позволяющая определить напряжённое состояние опоры при заданных нагрузках с учётом дополнительного влияния природно-климатических факторов.

4. По результатам визуальной, аппаратной диагностики опор на исследуемом участке ДВЖД и на основании проведённых разрушающих испытаний доказана необходимость повышения достоверности результатов исследований для оценки несущей способности железобетонных опор контактной сети.

5. Разработана методика прогнозирования остаточного ресурса железобетонных опор контактной сети, позволяющая на основе срока службы и величины дефектов для конкретных условий эксплуатации определить их остаточную несущую способность, реализованная в виде номограммы.

6. Реализация методики прогнозирования состояния железобетонных опор контактной сети при замене только одной опоры по плану (графику) позволит сэкономить средства в размере 134396,89 руб.

В качестве рекомендаций и перспектив дальнейшей разработки темы диссертационного исследования предусматривается рассмотреть влияние вибрационной нагрузки от колебаний путевой структуры и проводов контактной подвески на остаточный ресурс железобетонных опор.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, входящие в международную систему цитирования Scopus

1. Li, V. Assessment of the concrete part of the contact system supports in the field / V. Li, L. Demina, S. Vlasenko // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 164. – P. 03028.
2. Li, V.N. Assessment of the impact of the electromagnetic field of the catenary system on crack formation in reinforced concrete supports / V.N. Li, L.S. Demina, S.A. Vlasenko, E.Y. Tryapkin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – № 918. – P. 012118.

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации

3. Ли, В.Н. Опрокидывающий момент опоры контактной сети / В.Н. Ли, А.С. Сапов, Л.С. Демина // Мир транспорта. – 2012. – № 2 (40). – С. 4-11.
4. Ли, В.Н. Дополнительные факторы образования трещин в железобетонных опорах контактной сети / В.Н. Ли, Л.С. Демина, А.С. Сапов // Вестник РГУПС. – 2013. – № 2 (50). – С. 111-117.
5. Ли, В.Н. Модель промежуточной консольной железобетонной опоры контактной сети электрифицированных железных дорог, учитывающая эксплуатационные воздействия / В.Н. Ли, Л.С. Демина // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 80-85.

Прочие публикации

6. Ли, В.Н. Определение напряжений в бетонной части железобетонных опор контактной сети, возникающих под воздействием холодного ветра с дождём / В.Н. Ли, Л.С. Демина // Наука, творчество и образование в области электроснабжения – достижения и перспективы / ДВГУПС. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. – С. 7-10.
7. Ли, В.Н. Температурные напряжения в железобетонных опорах при суточных колебаниях температуры окружающей среды / В.Н. Ли, Л.С. Демина // Наука, творчество и образование в области электроснабжения – достижения и перспективы / ДВГУПС. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. – С. 11-16.
8. Ли, В.Н. Температурные напряжения в бетонной части железобетонных опор контактной сети / В.Н. Ли, Л.С. Штакал // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования : тр. Всерос. научно-практ. конф. : в 6 т. / ДВГУПС ; под ред. О.Л. Рудых. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2010. – Т.1. – С. 208-211.
9. Колокольцев, И.В. Анализ причин дефектообразования в железобетонных опорах контактной сети / И.В. Колокольцев, Л.С. Штакал // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования : тезисы докл. 68-й студен. науч. конф. / ДВГУПС. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. – С. 15.
10. Ли, В.Н. Влияние электромагнитного поля контактной сети на трещинообразование 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.
11. Ли, А.Г. Анализ методов оценки несущей способности железобетонных опор контактной сети магистральных железных дорог / А.Г. Ли, Л.С. Демина // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования : тр. Всерос. молодежной научно-практ. конф. (10-13 апр. 2012 г.) : в 3 т. / ДВГУПС ; под ред. Б.Е. Дынькина, А.Ф. Серенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – Т. 1. – С. 135-139.

12. Демина, Л.С. Факторы, влияющие на несущую способность железобетонных опор контактной сети / Л.С. Демина // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : тр. Всерос. молодежной науч.-практ. конф. с междунар. участием 23-25 апреля 2013 года / ДВГУПС ; под ред. А.Ф. Серенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2013. – Т.1. – С. 24-29.
13. Ли, В.Н. К вопросу трещинообразования в железобетонных опорах контактной сети / В.Н. Ли, Л.С. Демина // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 4 (21). – С. 97-100.
14. Демина, Л.С. Модель промежуточной консольной железобетонной опоры контактной сети электрифицированных железных дорог в среде SolidWorks / Л.С. Демина, В.Н. Ли // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Материалы Международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре : Изд-во КнАГУ, 2019. – С. 97-101.
15. Демина, Л.С. Моделирование нагрузок, действующих на опору контактной сети электрифицированных железных дорог / Л.С. Демина, В.Н. Ли // Eltrans 10.0 : тез. докладов Десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0». В 2 частях. Часть 1. – Санкт-Петербург : Изд-во ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. – С. 53-54.
16. Попов, М.Е. Оценка результатов обследования железобетонных опор ультразвуковым дефектоскопом / М.Е. Попов, Л.С. Демина, В.Н. Ли // Научно-техническому и социально-экономическому развитию Дальнего Востока России – инновации молодых : тезисы докладов 78-й Межвузовской студенческой научно-практической конференции (20-23 марта 2020 г.). В 2 т. Т. 1 / под ред. А.З. Ткаченко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2020. – С. 125.
17. Ли, В.Н. Организация контроля состояния опорного хозяйства системы тягового электроснабжения / В.Н. Ли, Л.С. Демина, С.А. Власенко // Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2020. – С. 36-41.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Демина Людмила Сергеевна

Подписано в печать 05.02.2021.
Уч.-печ. л. 1,2. Зак. 27. Тираж 100 экз.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.