

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst703885>

© Т.А. Заруцкая

Российский университет транспорта
(Москва, Россия)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СРОКА СЛУЖБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ОАО «РЖД»

Цель. Разработка методологии предиктивной аналитики остаточного ресурса железобетонных опор контактной сети, интегрирующей прогнозное моделирование с нормативами ОАО «РЖД» для перехода от планово-предупредительных ремонтов к проактивному управлению.

Методы. Исследование базируется на распоряжении ОАО «РЖД» № 1047р. Предложена двухуровневая методология: первый этап — категорирование техсостояния опор согласно нормативу; второй — прогноз достижения предельных состояний по критериям коррозии арматуры, снижения прочности бетона и развития трещин с использованием физико-механического моделирования.

Результаты. Разработана двухуровневая методология прогнозирования остаточного ресурса. Для каждого из трех ключевых критериев (коррозия арматуры, потеря прочности бетона, раскрытие трещин) выведены формализованные расчетные формулы. Они позволяют количественно оценить временной интервал до наступления предельного состояния конструкции, что обеспечивает объективную основу для ранжирования опор по очередности вывода в ремонт или замены.

Заключение. Предложенная методология является основой для интеграции в системы предиктивного обслуживания и цифровые двойники инфраструктуры, обеспечивая переход к проактивному управлению жизненным циклом объектов.

Ключевые слова: предиктивная аналитика; остаточный ресурс; железобетонные опоры; прогнозное обслуживание; деградация бетона; коррозия арматуры; цифровой двойник.

Как цитировать:

Заруцкая Т.А. Разработка методологии предиктивной аналитики остаточного ресурса срока службы железобетонных опор контактной сети с учетом нормативных требований ОАО «РЖД» // Инновационные транспортные системы и технологии. 2026. Т.12, № 1. С. 96–113. doi: 10.17816/transsyst703885

Heading 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL STUDIES

Topic: Design and construction of roads, subways, airfields, bridges, and transport tunnels

© **T.A. Zarutskaya**

Russian university of transport
(Moscow, Russia)

DEVELOPMENT OF PREDICTIVE METHOD TO ANALYZE RESIDUAL LIFE OF REINFORCED CONCRETE OVERHEAD LINE SUPPORTS BASED ON REGULATIONS OF JSC RUSSIAN RAILWAYS

AIM: This work aimed to develop a predictive method to analyze the residual life of reinforced concrete overhead line supports integrating predictive modeling in the standards of JSC Russian Railways for the transition from scheduled preventive maintenance to proactive management.

METHODS: The study is based on Order No. 1047r of JSC Russian Railways. A two-tier method is proposed; the first stage involves the support health classification based on the standards; the second stage involves the prediction of limit states based on criteria, such as reinforcement corrosion, concrete strength loss, and crack development, using physical and mechanical modeling.

RESULTS: We developed a two-level method for predicting the residual life and derived formalized calculation formulas for each of the three key criteria (reinforcement corrosion, concrete strength loss, crack development). They allow to measure the time to the limit state of the structure, which provides a reliable basis for support ranking based on the order of taking out of service for repair or replacement.

CONCLUSION: The proposed method provides the basis for integration into predictive maintenance systems and digital infrastructure twins, ensuring the transition to proactive lifecycle management of facilities.

Keywords: predictive analysis; residual life; reinforced concrete supports; predictive maintenance; concrete degradation; reinforcement corrosion; digital twin.

To cite this article:

Zarutskaya TA. Development of Predictive Method to Analyze Residual Life of Reinforced Concrete Overhead Line Supports Based on Regulations of JSC RUSSIAN RAILWAYS. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2026;12(1):96–113. doi: 10.17816/transsyst703885

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие железнодорожного транспорта, характеризующееся ростом скоростей и интенсивности движения, предъявляет принципиально новые требования к управлению инфраструктурой. Традиционная система планово-предупредительных ремонтов, основанная на нормативных сроках, все чаще демонстрирует свою экономическую и эксплуатационную неэффективность: она ведет как к необоснованным затратам на преждевременное обслуживание еще исправных активов, так и к риску внезапных отказов из-за недооценки реального износа. В этих условиях внедрение предиктивных стратегий обслуживания становится ключевым императивом для обеспечения надежности, безопасности и экономической эффективности гигантской инфраструктурной сети ОАО «РЖД».

Предиктивное, или прогнозное, обслуживание представляет собой парадигму, при которой решения о ремонте и замене принимаются на основе фактического и прогнозируемого технического состояния объекта, а не на основе календарного плана. Основу этого подхода составляют три взаимосвязанных технологических компонента: непрерывный мониторинг и сбор больших данных (Big Data), интеллектуальный анализ (предиктивная аналитика) собранных данных и создание цифровых двойников объектов инфраструктуры.

Как отмечено в стратегических документах компании, цифровая трансформация и внедрение прорывных технологий являются для ОАО «РЖД» приоритетным направлением развития [1, 2]. Активно ведутся работы по созданию цифровых двойников инфраструктуры — точных виртуальных копий физических объектов, которые позволяют моделировать их работу, оценивать влияние различных факторов и, что наиболее важно, прогнозировать остаточный ресурс [3]. Такие двойники создаются на основе единой платформы для проектирования и ведения технической документации и интегрируют данные из различных диагностических и информационных систем. Это позволяет не только обнаруживать ненадежные элементы, но и с высокой точностью планировать сроки их замены и объемы ремонтных работ, существенно экономя время и ресурсы.

Внедрение предиктивных стратегий сталкивается с комплексом вызовов: необходимость модернизации нормативной базы, технологическая сложность интеграции разнородных систем и изменение корпоративной культуры, требующее от персонала перехода от реактивных к проактивным

действиям [4–6]. Однако преимущества такого перехода очевидны. Он ведет к существенному повышению надежности инфраструктуры, минимизации рисков аварийности, значительной экономии средств за счет оптимизации ремонтного фонда и, в конечном итоге, к созданию качественно новой, интеллектуальной и устойчивой транспортной системы.

Электрифицированные магистрали формируют комплексную инфраструктуру, где опоры контактной сети выступают одним из ключевых элементов. На электрифицированных участках опоры расположены на расстоянии 60–70 м, т.е. парк опор в хозяйстве «Трансэнерго» очень обширен и требует пристального внимания, поскольку это связано с безопасностью движения поездов и надежной работой всей магистрали. Основная сложность диагностики железобетонных опор контактной сети заключается в необходимости выявления критических дефектов, локализованных в труднодоступных для прямого наблюдения зонах – подземной и внутренней части конструкции, которые развиваются скрыто под воздействием агрессивной комбинации эксплуатационных факторов (электрокоррозия от блуждающих токов, циклические механические и ветровые нагрузки, химическое воздействие грунтов) [7–15]. В условиях ограниченных ресурсов для одновременной замены такого объема конструкций и сокращения штата обслуживающего персонала, на первый план выходит задача внедрения и развития современных методов предиктивной аналитики по точечному обслуживанию опорного хозяйства. Внедрение предиктивных стратегий обслуживания инфраструктуры опорного хозяйства «Трансэнерго» ОАО «РЖД» требует не только научно-технического обоснования, но и строгой регламентации.

В статье обсуждается разработка методологии предиктивной аналитики остаточного ресурса срока службы железобетонных опор контактной сети с учетом нормативных требований ОАО «РЖД».

НОРМАТИВНАЯ ОСНОВА – КЛЮЧЕВЫЕ ПРИНЦИПЫ

Сегодня основным отраслевым нормативным документом для опорного хозяйства является «Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети» (Распоряжение ОАО «РЖД» №1047р), далее Указание [8]. В данном документе содержится единая система критериев, классификаций и процедур по диагностике опорного хозяйства. Автором предлагается интеграция этих требований

в методологию расчета остаточного ресурса, что позволит перевести его из области научного прогнозирования в плоскость инженерной практики, обеспечивая юридическую и техническую обоснованность принимаемых решений.

Указание устанавливает императивные правила, которые становятся исходными данными для любой модели. В ходе проведенного анализа, автором выделено, три наиболее весомых параметра, которые предлагается взять в качестве исходных для расчета остаточного ресурса в контексте Указаний: классификация технического состояния; обязательность инструментального контроля; регламентация сроков и видов ремонта. Рассмотрим каждый из этих параметров более подробно и обоснуем выбор каждого из них:

1. Классификация технического состояния. В соответствии с Указанием, опоры по их состоянию подразделяются на три категории: «нормативное», «дефектная» и «остродефектная» (предельное). Категория определяется по комплексу дефектов, регламентированных в Приложении № 2. Например, наличие продольной трещины шириной раскрытия более 0,3 мм или оголение арматуры на площади более 10 см² автоматически переводит конструкцию в категорию «дефектная». Это не рекомендация, а основа для выдачи предписания на ремонт.
2. Обязательность инструментального контроля. Например, для центрифугированных опор оценка несущей способности методом ультразвуковой диагностики (в соответствии с Приложением № 3) является не рекомендуемой, а обязательной процедурой при углубленном обследовании. Полученное значение прочности бетона (в МПа) – это не справочная величина, а официальный параметр для сравнения с нормативным минимумом.
3. Регламентация сроков и видов ремонта. В Указании для каждой категории состояния предписывает конкретные сроки выполнения ремонтных работ и их виды (усиление, замена подземной части, полная замена). Например, устранение повреждений опор, отнесенных к «дефектному» состоянию, должно быть выполнено в течение года с момента обнаружения.

Таким образом, расчет остаточного ресурса в контексте Указаний – это не только прогноз времени до физического разрушения, но и определение нормативно допустимого интервала безопасной эксплуатации до момента обязательного выполнения ремонтного вмешательства.

СИНТЕЗ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ И НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ: ПОШАГОВАЯ МЕТОДОЛОГИЯ

Выполним синтез прогнозной модели и нормативных требований. Методология становится двухуровневой: сначала выполним категорирование по Указаниям, а затем – уточненный расчет.

Синтез прогнозной модели и нормативных требований выполним в три этапа:

Этап 1: Первичное отнесение к категории состояния.

Этап 2: Прогнозный расчет времени до перехода в дефектное состояние.

Этап 3: Синтез нормативного и прогнозного решений.

Рассмотрим каждый из этих этапов более подробно.

Этап 1: Первичное отнесение к категории состояния. На основе данных комплексной диагностики (визуальный осмотр, УЗК, измерение потенциалов) опора классифицируется в соответствии с Приложением № 2 Указаний следующим образом:

- «Остродефектная», т.е. остаточный ресурс равен нулю. Опишем это состояние следующим выражением:

$$T_{\text{ост(норм)}} = 0.$$

В соответствии с Указанием при выявлении «остродефектной» опоры требуется ее замена: в течении 1 месяца если это анкерная опора; в течении 3 месяцев если это промежуточная опора; до 1 года если опора стоит под жесткой поперечиной.

- «Дефектная» – остаточный ресурс меньше или равен одному году. Опишем это состояние следующим выражением:

$$T_{\text{ост(норм)}} \leq 1 \text{ года}.$$

Ресурс лимитирован предписанием на ремонт в течение года.

- «Ограниченно дефектная» и «нормативное» состояние: Расчет переходит к следующему шагу для определения прогнозного срока до перехода в следующую, недопустимую категорию.

Еще раз отметим, что этот этап определяет «правовой» ресурс – Указание, т.е. это технически точный и понятный вариант.

В данную классификацию дополнительно введен новый термин «Ограниченно дефектная». Это даст нам преимущество и определенную

свободу при формировании прогнозной модели. Термин «ограниченно дефектная» четко занимает место между «нормальной» и «дефектной» опорой, указывая, что дефекты есть и их характер ограничен, т.е. локализован, не критичен для несущей способности. Указанное обстоятельство является важным аспектом при формировании прогнозной модели.

Этап 2: Прогнозный расчет времени до перехода в дефектное состояние. Здесь предлагается использовать аппарат математического моделирования, но с нормативно заданными критериями отказа. В соответствии с Указанием выделены следующие критерии отказа: по коррозии арматуры, по снижению несущей способности и по развитию трещин. Разработаем математические модели для каждого выявленного критерия.

1. Критерий по коррозии арматуры ($T_{\text{корр(норм)}}$). Норматив задает не абстрактную «критическую» глубину, а конкретные признаки. Модель прогнозирует время достижения этих признаков.

Предельное состояние по Указаниям: оголение арматуры, коррозия с потерей сечения более 10%, глубокие продольные трещины от коррозии.

Целевой результат расчета – прогнозное время до достижения арматурой предельно допустимого состояния. Предлагается следующая формула для расчета остаточного ресурса по коррозионному критерию:

$$T_{\text{корр(норм)}} = \frac{A_{\text{доп}} - A_{\text{факт}}}{\pi \cdot d \cdot V_{\text{корр}}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{доп}}$ – минимально допустимая площадь поперечного сечения арматурного стержня, при которой его несущая способность еще соответствует нормативным требованиям с учетом 10% потери, мм²; $A_{\text{факт}}$ – фактическая площадь сечения, оцененная по данным УЗК и потенциалам, мм²; $V_{\text{корр}}$ – скорость коррозии, глубина коррозионного разрушения (уменьшение радиуса стержня) за единицу времени. Ключевой и самый неопределенный параметр, мм/год; d – начальный диаметр стержня арматуры, т.е. номинальный диаметр арматурного стержня до коррозии, мм.

Если при диагностике уже зафиксировано оголение, т.е. защитный слой отсутствует ($c \leq 0$), то $T_{\text{корр(норм)}}$ корректируется в сторону резкого снижения.

Числитель в формуле (1) ($A_{\text{доп}} - A_{\text{факт}}$) это «запас» площади сечения (в мм²), который еще можно потерять до перехода в предельное состояние.

В знаменателе формулы (1), произведение $(\pi \cdot d)$ – это периметр (длина окружности, размерность мм) арматурного стержня, т.е. коррозия действует по всей поверхности стержня, погруженной в агрессивную среду. А весь знаменатель в формуле (1) – это скорость потери площади сечения (мм²/год). Он показывает, сколько «квадратных миллиметров металла» растворится за год по всей поверхности.

Таким образом, в формуле (1) деление запаса площади $(A_{\text{доп}} - A_{\text{факт}})$ на скорость потери площади $(\pi \cdot d \cdot V_{\text{корр}})$ и дает время в годах, через которое запас будет исчерпан.

Физическая логика выведенной формулы (1) решает задачу: За какое время (Т) при текущей скорости коррозии ($V_{\text{корр}}$) арматура потеряет еще $(A_{\text{доп}} - A_{\text{факт}})$ квадратных миллиметров своего сечения,

Рассмотрим ключевые ограничения разработанной модели и практические аспекты.

1. Предположение о равномерной коррозии – основной недостаток. В реальности чаще возникает питтинговая (точечная) коррозия, которая снижает несущую способность гораздо быстрее при той же усредненной потере сечения. Поэтому результат формулы – это оптимистичная (верхняя) оценка ресурса.
2. Непостоянство скорости коррозии ($V_{\text{корр}}$). Скорость зависит от влажности, температуры, концентрации хлоридов. Использование постоянного значения – это упрощение. В прецизионных моделях $V_{\text{корр}}$ задают как функцию времени и условий.
3. Важность определения $A_{\text{факт}}$. Наиболее сложная задача диагностики – точно измерить текущее сечение арматуры без вскрытия бетона. Косвенные методы (ультразвук, вихретоковый) имеют погрешность 15–25%.

Нормативный критерий ($A_{\text{доп}}$) часто является определяющим. В современных нормативах, действующем Указании РЖД, предельное состояние может наступать не по потере сечения, а ранее – при оголении арматуры или раскрытии продольных трещин от коррозии более 0,3 мм. В этом случае формула модифицируется:

$$T_{\text{корр(норм)}} = \frac{C - 0}{V_{\text{карб}}}, \quad (2)$$

где C — толщина защитного слоя бетона от поверхности до арматурного стержня, мм; $V_{\text{карб}}$ — скорость карбонизации, мм/год.

Стоит отметить, что ноль в числителе формулы (2) — это не математическая необходимость, а смысловой акцент. Он указывает, что отсчет времени ведется от поверхности бетона (глубина 0) до момента достижения фронтом карбонизации арматуры (глубина c). Это делает формулу более прозрачной для понимания физики процесса.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что формула (1) и (2) – это практический инструмент для инженерной оценки, который должен применяться с пониманием его ограничений и в обязательной увязке с конкретными нормативами, определяющими предельное состояние конструкции.

2. Критерий по снижению несущей способности ($T_{\text{нес(норм)}}$).

Указания требуют контроля прочности бетона ультразвуковым методом (Приложение № 3).

Предельное состояние по Указаниям: отклонение измеренной прочности от проектной не должно превышать 25%.

Целевой результат расчета: остаточный ресурс (время) до достижения бетоном предельной прочности.

На основании этого определим предельно допустимую прочность бетона на сжатие для опоры ($R_{\text{пред}}$). Это будет границей, при достижении которой конструкция переходит в категорию дефектного состояния. Опишем это математической формулой:

$$R_{\text{пред}} = 0,75 \cdot R_{\text{проект}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{проект}}$ – проектная (начальная) прочность бетона, заложенная при изготовлении опоры, МПа.

Соответствует классу бетона. Справочная величина берется из паспорта конструкции или проектной документации.

В формуле (3) 0,75 (75%) это нормативный коэффициент снижения прочности. Указывает, что снижение проектной прочности более чем на 25% считается недопустимым. Устанавливается отраслевыми нормативами (в данном случае – Указанием РЖД, п. 5.6 и Приложение № 3) [7].

Ресурс определяется временем снижения прочности от текущего значения $R_{\text{тек}}$ (по УЗК) до предельного $R_{\text{пред}}$.

Далее необходимо определить $T_{\text{нес(норм)}}$ остаточный ресурс (время) до достижения бетоном предельной прочности $R_{\text{пред}}$. Остаточный ресурс является целевым результатом всего расчета, единица измерения – годы (лет):

$$T_{\text{нес(норм)}} = \frac{R_{\text{тек}} - R_{\text{пред}}}{V_{\text{R}}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{тек}}$ – текущая прочность бетона в опоре на момент обследования, МПа; V_{R} – скорость снижения прочности бетона во времени, устанавливаемая по результатам периодического мониторинга. МПа/год.

Показатель V_{R} определяется либо по данным наблюдений (мониторинга) на основе 2+ измерений в разные годы, либо по справочным моделям деградации для данного типа бетона и агрессивности среды.

В случае определения по данным мониторинга показатель V_{R} определим по формуле (5):

$$V_{\text{R}} = \frac{R_{\text{тек1}} - R_{\text{тек2}}}{t_2 - t_1}. \quad (5)$$

Рассмотрим ключевые ограничения разработанной модели и практические аспекты.

1. Нормативная основа: Коэффициент 0,75 (25% снижения) – это не физический предел разрушения бетона, а консервативный нормативный порог, установленный для обеспечения запаса надежности. Фактическое разрушение наступает при значительно большем снижении прочности.
2. Метод измерения $R_{\text{тек}}$:
 - ультразвуковой метод (УЗК, по ГОСТ 17624) – основной в диагностике РЖД. Скорость прохождения ультразвука через бетон коррелирует с его прочностью по предварительно построенным тарировочным графикам;
 - измерения проводят на сухих участках опоры (без отслоений) и учитывают влажность бетона, которая влияет на показания.
3. Определение V_{R} – главная сложность:
 - скорость деградации непостоянна. На начальном этапе (карбонизация, микротрещины) она может быть малой, затем – резко возрасти при коррозии арматуры и развитии трещин;
 - для ответственных конструкций необходим периодический мониторинг (раз в 2–3 года) для уточнения V_{R} и корректировки прогноза $T_{\text{нес(норм)}}$.
4. Интеграция с общей оценкой: Рассчитанный ресурс $T_{\text{нес(норм)}}$ всегда сравнивается с ресурсами по коррозии ($T_{\text{корр}}$) и трещиностойкости

($T_{\text{тр}}$). Окончательный остаточный ресурс опоры $T_{\text{ост}}$ принимается по минимальному из этих значений.

Полученные формулы (3) – (5) представляют собой формализованный, нормативно обоснованный алгоритм для перехода от единичного измерения прочности бетона ($R_{\text{тек}}$) к количественному прогнозу срока его службы. Они являются важным компонентом системы предиктивного обслуживания, позволяя планировать усиление или замену опор до достижения ими дефектного состояния.

3. Критерий по развитию трещин ($T_{\text{тр(норм)}}$)

Предельное состояние по Указаниям: достижение трещиной нормативно запрещенных размеров (например, ширины раскрытия 0,5 мм для поперечных трещин в подземной части).

Целевой результат расчета: остаточный ресурс до достижения трещиной предельного размера.

Для определения остаточного ресурса до достижения трещиной предельного размера используется модифицированный закон Париса, когда интегрирование ведется от текущей глубины трещины, соответствующей ее измеренной ширине $w_{\text{тек}}$ до предельно допустимой глубины трещины, соответствующей предельной ширине $w_{\text{пред}}$. С учетом Указаний, определим остаточный ресурс, что является целевой функцией расчета, т.е. (время) до достижения трещиной предельного размера с учетом анализа режима эксплуатации (например, проход поездов, суточные температурные циклы и т.д.). В силу того, что исследуемый процесс – нелинейный будем использовать математический интеграл по длине трещины « a » от текущего до предельного значения. В это случае суммируем время роста на каждом бесконечно малом участке:

$$T_{\text{тр(норм)}} = \frac{1}{f} \int_{a(w_{\text{тек}})}^{a(w_{\text{пред}})} (C^{-1} \cdot (\Delta\delta \cdot \sqrt{\pi \cdot \gamma \cdot a})^{-m}) da, \quad (6)$$

где f – частота нагружения, вызывающего раскрытие трещины (анализ режима эксплуатации (например, проход поездов, суточные температурные циклы), циклы/год или циклы/час; $a(w_{\text{тек}})$ – текущая (начальная) глубина трещины, соответствующая измеренной ширине $w_{\text{тек}}$ (измеряется при диагностике), мм, м; $a(w_{\text{пред}})$ – предельно допустимая глубина трещины, соответствующая предельной ширине $w_{\text{пред}}$ по нормам (задается нормативным документом), мм, м; C и m – эмпирические константы материала, характеризующие его усталостную трещиностойкость. Безразмерные (m) и зависящие от системы единиц (справочные данные для конкретной марки бетона и условий

эксплуатации (влажность, температура)); $\Delta\delta$ – размах напряжений (разность между максимальным и минимальным напряжением) в цикле нагружения в зоне трещины (определяется расчетом (например, методом конечных элементов) на основе нагрузок от веса, ветра, вибраций), МПа, Н/мм²; γ – безразмерный коэффициент геометрии, зависящий от формы трещины, конструкции элемента и способа нагружения (определяется по справочникам по механике разрушения для конкретной конфигурации (например, краевая трещина)); a – текущая переменная длина (глубина) трещины в процессе интегрирования, мм, м:

$$a = k \cdot w, \quad (7)$$

k – эмпирический коэффициент перехода от ширины к глубине.

Ключевым в данной формуле является размах коэффициента интенсивности напряжений (в явном виде в формуле не указан), определяется по формуле:

$$\Delta K = \Delta\delta \cdot \sqrt{\pi \cdot \gamma \cdot a}. \quad (8)$$

Формула (6) это – общее время $T_{\text{тр(норм)}}$, которое равно сумме (интегралу) всех малых приращений времени, необходимых для роста трещины на каждый малый шаг da , от текущей глубина трещины, соответствующей измеренной ее ширине $w_{\text{тек}}$ до предельно допустимая глубины трещины, соответствующей предельной ширине $w_{\text{пред}}$.

Рассмотрим ключевые ограничения разработанной модели и практические аспекты.

1. Модель может занижать ресурс и является консервативной, так как в основе лежит линейная механика разрушения.
2. Модель учитывает только усталостный рост трещин.
3. Ограничения по входным данным: точность измерений проведенных на линии – например, ширина трещины измеряется с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Может быть компенсировано многократными замерами и усреднением.
4. Разброс $\Delta\delta$, поскольку напряжения в опоре зависят от множества факторов.
5. Нормативные ограничения – дискретность категорий. Норматив задает жесткие пороги ($w_{\text{пред}}$), хотя физически разрушение может наступить позже.

Полученная модель критерия по развитию трещин ($T_{\text{тр(норм)}}$) физически обосновывает динамику разрушения, учитывает динамику нагружения опоры и позволяет прогнозировать остаточный ресурс.

Рекомендация: использовать критерий $T_{\text{тр(норм)}}$ для ответственных опор (мостовые переходы, станции, кривые малых радиусов) в сочетании с регулярным мониторингом и уточнением параметров по результатам наблюдений. Для массовой диагностики применять упрощенные методы с последующей верификацией по данной модели для «опор риска».

Как отмечалось ранее, железобетонная опора в процессе эксплуатации подвергается одновременно нескольким независимым процессам деградации: коррозия арматуры (химическое/электрохимическое разрушение); снижение прочности бетона (деградация материала); рост трещин (накопление усталостных повреждений). Каждый из этих процессов развивается со своей скоростью и приводит к потере несущей способности. Однако конструкция разрушится тогда, когда первый из этих процессов достигнет критического предела, независимо от состояния двух других. Таким образом, итоговый прогнозный ресурс примет следующий вид:

$$T_{\text{ост(прогноз)}} = \min(T_{\text{корр(норм)}}, T_{\text{нес(норм)}}, T_{\text{тр(норм)}}). \quad (9)$$

Полученное выражение (9) представляет собой дискретный выбор минимального значения остаточного срока службы железобетонной опоры, основанный на принципе лимитирующего фактора (или «слабого звена»).

Этап 3: Синтез нормативного и прогнозного решений.

Окончательная оценка остаточного ресурса ($T_{\text{ост}}$) принимается как наиболее консервативная (минимальная) из двух:

$$T_{\text{ост}} = \min(T_{\text{ост(норм)}}, T_{\text{ост(прогноз)}}). \quad (10)$$

Это означает, что даже если прогнозная модель дает 5 лет, но по Указаниям опора имеет неудовлетворительные дефекты, ее ресурс равен нулю или году (времени на ремонт). И наоборот, если нормативный ресурс еще не исчерпан, прогнозная модель позволяет планировать мероприятия на перспективу.

ИНТЕГРАЦИЯ В СИСТЕМУ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ПРИМЕР ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Данная методология напрямую стыкуется с циклом управления, предписанным Указаниями.

Рассмотрим практический пример. Диагностика выявила: продольную трещину шириной 0,2 мм (по Указаниям – «ограничено дефектная» состояние), скорость коррозии арматуры $V_{\text{корр}}=0,05$ мм/год, текущая глубина защитного слоя $c=15$ мм. Предельное состояние по коррозии – оголение ($c=0$).

Этап 1. Нормативный ресурс ($T_{\text{ост(норм)}}$): так как состояние «ограничено дефектная», немедленный ремонт не предписан. Нормативный ресурс формально не ограничен, но требуется контроль.

Этап 2. Прогнозный ресурс:

$$T_{\text{корр(прогноз)}} = \frac{15 \text{ мм}}{0,05 \text{ мм/год}} = 300 \text{ лет.}$$

Полученный результат 300 лет – это физический ресурс до оголения. Однако Указания требуют реагировать раньше. Критерием перехода в «дефектное» состояние может быть, например, достижение трещиной ширины 0,3 мм от коррозии. Если скорость роста трещины $V_{\text{тр}}=0,02$ мм/год, то время до перехода:

$$T_{\text{тр}} = \frac{0,3 - 0,2}{0,02} = 5 \text{ лет.}$$

Этап 3. Итоговый ресурс:

$$(T_{\text{ост}}): \min(\infty, 5 \text{ лет}) = 5 \text{ лет.}$$

Остаточный ресурс опоры – 5 лет. В систему предиктивного обслуживания закладывается: усиление контроля (ежегодные измерения трещины и потенциалов), планирование на 4-й год бюджета и графика работ по инъектированию трещины и восстановлению защитного слоя для предотвращения перехода в неудовлетворительную категорию.

ВЫВОДЫ

Интеграция отраслевых Указаний ОАО «РЖД» в методологию расчета остаточного ресурса трансформирует ее из чисто исследовательского

инструмента в рабочую процедуру для служб диагностики и ремонта. Она обеспечивает:

- законность решений: Все выводы имеют прямую ссылку на действующий норматив;
- согласованность действий: диагносты, расчетчики и ремонтные бригады оперируют единой системой критериев.
- экономическую эффективность: позволяет точно планировать ремонтный фонд, избегая как аварийных, так и излишне ранних замен.

Таким образом, современная стратегия обеспечения надежности опор контактной сети заключается в синергии трех элементов: передовых технологий неразрушающего контроля, точных математических моделей деградации и четких нормативных рамок. Только их сочетание позволяет реализовать истинно предиктивную модель обслуживания, гарантирующую безопасность и оптимизирующую жизненный цикл инфраструктуры.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors declare that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года на перспективу до 2030 года (Белая книга), утвержденная Распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р. Дата обращения: 11.02.2026. Режим доступа: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf
2. Актуализированная «Стратегия цифровой трансформации компании ОАО «РЖД» до 2025 года». Утверждена советом директоров ОАО «РЖД» от 25 октября 2019 г., актуализирована протокол №40 заседания правления ОАО «РЖД» от 23 августа 2021 г. Дата обращения: 09.02.2026. Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/4069?accessible=true&id=184629>
3. Верховых Г.В. Разработка и использование цифровых двойников для технического обслуживания и ремонта железнодорожной инфраструктуры // Global Railway Review. 2021. № 2. Дата обращения: 09.02.2026. Режим доступа: <https://www.globalrailwayreview.com/article/122490/digital-twins-maintenance-railway-infrastructure/>
4. В РЖД внедряют предиктивную аналитику и моделируют риски [internet] Дата обращения: 09.02.2026. Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/v-rzhd-vnedryayut-prediktivnuyu-analitiku-i-modeliruyut-riski/>

5. Предиктивная аналитика. [internet] Дата обращения: 09.02.2026. Режим доступа: <https://rzddigital.ru/technology/prediktivnaya-analitika/?ysclid=mlf6fn9r ey930925308>
6. Отчет об устойчивом развитии 2023. Инновационное развитие и цифровая трансформация. [internet] Дата обращения: 09.02.2026. Режим доступа: <https://sr2023.rzd.ru/ru/managerial-aspect/efficiency-improvement>
7. Горпинченко И.А., Заруцкая Т.А. Факторы, влияющие на несущую способность железобетонных конструкций опорного хозяйства контактной сети. В кн.: Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2024. С. 42-46. EDN: BSALVG
8. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети (утвержденные Распоряжением ОАО «РЖД» от 18.04.2022 г. №1047р) (редакция от 19.01.2023, №91/р). Дата обращения: 09.02.2026. Режим доступа: https://meganorm.ru/mega_doc/norm_update_01022025/kartochka_forma/0/ukazaniya_po_tekhnicheskomu_obslyuzhivaniyu_i_remontu.html
9. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат, 1981.
10. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г. и др. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5 (40) С. 86–144. doi: 10.5862/МСЕ.40.10
11. Селяев В.П., Селяев Е.Л., Кечуткина Е.Л. и др. Моделирование работы железобетонных конструкций с учетом совместного действия механических нагрузок и агрессивных сред // Эксперт: теория и практика. 2021. № 1(10). С. 19-26 doi: 10.51608/26867818_2021_1_19 EDN: QSBQUA
12. Uteuliyev V. Residual life assessment of overhead transmission lines 110 kV and above and determination of their reconstruction terms // E3S Web Conf. 2017. Vol. 25. doi: 10.1051/e3sconf/20172504005
13. Ueda H., Kudo T., Sasaki T. (Railway Technical Research Institute, Tokyo, Japan). Deterioration Diagnosis and Maintenance of Concrete Poles. Technical report. Tokyo: Railway Technical Research Institute (RTRI); 2004.
14. Alkam F., Lahmer T. A robust method of the status monitoring of catenary poles installed along high-speed electrified train tracks // Results in Engineering. 2021. T. 12. doi: 10.1016/j.rineng.2021.100289 EDN: PUFWCY
15. Галкин, А.Г., Окунев А.В., Ковалев А.А. Стратегия обслуживания опор контактной сети с учетом срока их эксплуатации. В кн.: Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта: сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию кафедры «Электроснабжение транспорта»: Омск, 2020. С. 37–45. EDN: JVLPHYK

REFERENCES

1. Strategy for Scientific and Technological Development of Russian Railways Holding for the Period up to 2025 with a Forecast up to 2030 (White Book), approved

- by Order of JSC Russian Railways No. 769/r dated April 17, 2018. (In Russ.) Accessed: 11.02.2026. Available from: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf
2. Updated “Digital Transformation Strategy of JSC Russian Railways until 2025”. Approved by the Board of Directors of JSC Russian Railways on October 25, 2019, updated by Protocol No. 40 of the Management Board Meeting of JSC Russian Railways on August 23, 2021. (In Russ.) Accessed: 09.02.2026. Available from: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/4069?accessible=true&id=184629>
 3. Verkhovnykh GV. Development and use of digital twins for maintenance and repair of railway infrastructure. *Global Railway Review*. 2021;(2). [internet] Accessed: 09.02.2026. Available from: <https://www.globalrailwayreview.com/article/122490/digital-twins-maintenance-railway-infrastructure/>
 4. Russian Railways introduces predictive analytics and risk modeling. *rzd-partner.ru* [internet] Accessed: 09.02.2026. Available from: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/v-rzhd-vnedryayut-prediktivnyuyu-analitiku-i-modeliruyut-riski/> (In Russ.)
 5. Predictive analytics. *rzddigital.ru* [internet] Accessed: 09.02.2026. Available from: <https://rzddigital.ru/technology/prediktivnaya-analitika/> (In Russ.)
 6. Sustainable Development Report 2023. Innovative development and digital transformation. *rzd.ru* [internet] Accessed: 09.02.2026. Available from: <https://sr2023.rzd.ru/ru/managerial-aspect/efficiency-improvement> (In Russ.)
 7. Gorpichenko IA, Zarutskaya TA. Factors affecting the bearing capacity of reinforced concrete structures of the catenary support system. In: *Transport Power Engineering. Current Problems and Tasks: Collection of Scientific Papers of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don; 2024:42–46. (In Russ.) EDN: BSALVG
 8. Instructions for the Maintenance and Repair of Catenary Support Structures (approved by Order of JSC Russian Railways No. 1047/r dated April 18, 2022) (as amended by Order No. 91/r dated January 19, 2023). (In Russ.) Accessed: 09.02.2026. Available from: https://meganorm.ru/mega_doc/norm_update_01022025/kartochka_forma/0/ukazaniya_po_tekhnicheskomu_obslyuzhivaniyu_i_remontu.html
 9. Kholmianskii MM. *Contact of Reinforcement with Concrete*. Moscow: Stroiizdat; 1981. (In Russ.)
 10. Benin AV, Semenov AS, Semenov SG, et al. Mathematical modeling of the destruction process of adhesion between reinforcement and concrete. Part 1. Models considering discontinuity of the connection. *Inzhenerno-Stroitel'nyi Zhurnal*. 2013;5(40):86–144. (In Russ.) doi: 10.5862/MCE.40.10
 11. Seliaev VP, Seliaev EL, Kechutkina EL, et al. Modeling the operation of reinforced concrete structures considering the combined action of mechanical loads and aggressive environments. *Ekspert: Teoriia i Praktika*. 2021;1(10):19–26. (In Russ.) doi: 10.51608/26867818_2021_1_19 EDN: QSBQUA
 12. Uteuliyev B. Residual life assessment of overhead transmission lines 110 kV and above and determination of their reconstruction terms. *E3S Web Conf*. 2017;25:04005. doi: 10.1051/e3sconf/20172504005

13. Ueda H, Kudo T, Sasaki T. *Deterioration Diagnosis and Maintenance of Concrete Poles*. Tokyo: Railway Technical Research Institute (RTRI); 2004.
14. Alkam F, Lahmer T. A robust method of the status monitoring of catenary poles installed along high-speed electrified train tracks. *Results Eng.* 2021;12:100289. doi: 10.1016/j.rineng.2021.100289 EDN: PUFWCY
15. Galkin AG, Okunev AV, Kovalev AA. Maintenance strategy for catenary poles considering their service life. In: *Influence of the Reliability of Power Supply Devices on Transport Operation: Collection of Scientific Papers of the All-Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the Department "Transport Power Supply"*. Omsk; 2020:37–45. (In Russ.) EDN: JVLPHY

Информация об авторе:

Заруцкая Татьяна Алексеева; канд. техн. наук, доцент, кафедры «Электроэнергетика транспорта»;
eLibrary SPIN: 8610-4903; ORCID: 0000-0002-0228-5383;
E-mail: zarutskaya_t@mail.ru

Information about the author:

Tatiana A. Zarutskaya; Cand. Sci. (Engineering), docent, Chair « Electric power industry of transport»;
eLibrary SPIN: 8610-4903; ORCID: 0000-0002-0228-5383;
E-mail: zarutskaya_t@mail.ru