

Научная статья

УДК 624.3

doi:10.52170/1815-9265_2026_80_109

Методика предиктивного прогнозирования при проведении мониторинга технического состояния искусственных сооружений

Олег Владимирович Осетинский^{1✉}, Юрий Георгиевич Лазарев²,
Андрей Анатольевич Белый³

^{1, 2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ «Комплексные Системы и Сети», Санкт-Петербург, Россия

³ «K2 Инжиниринг», Москва, Россия

³ Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

¹ 89095847909@mail.ru✉

² lazarev-yurij@yandex.ru

³ andbeliy@mail.ru

Аннотация. В статье предложена методика предиктивного прогнозирования технического состояния искусственных сооружений на основе интеграции данных автоматизированных систем мониторинга, эталонной расчетной модели и библиотеки дефектных сценариев. Методика направлена на повышение достоверности определения фактического технического состояния конструкции и точности прогноза его изменения во времени, включая оценку остаточного ресурса. Подход основан на представлении состояния конструкции в виде многомерного вектора признаков напряженно-деформированного состояния с последующим применением методов таксономического анализа для оценки близости к эталонному и дефектным состояниям.

Введен интегральный показатель – таксономический индекс технического состояния, позволяющий количественно оценивать степень деградации конструкции и выделять переходные состояния на ранних стадиях развития дефектов. Разработан алгоритм классификации, обеспечивающий оценку наиболее вероятного типа дефекта (коррозия, усталостная трещина, заклинивание опорных частей) и ориентировочную локализацию по библиотеке сценариев.

Реализован предиктивный контур, основанный на анализе временных рядов диагностических признаков, позволяющий прогнозировать развитие деградационных процессов и оценивать остаточный ресурс конструкции. Показано, что предложенная методика обеспечивает переход от порогового контроля к многомерному анализу состояния, повышает информативность данных мониторинга и обоснованность решений по управлению эксплуатационными рисками.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной методики для повышения надежности и безопасности эксплуатации мостовых сооружений за счет раннего выявления дефектов и планирования ремонтных мероприятий на упреждающей основе.

Ключевые слова: предиктивное прогнозирование, предиктивная аналитика, мониторинг технического состояния, искусственные сооружения, мосты, напряженно-деформированное состояние, таксономический анализ, остаточный ресурс, дефектные сценарии

Для цитирования: Осетинский О. В., Лазарев Ю. Г., Белый А. А. Методика предиктивного прогнозирования при проведении мониторинга технического состояния искусственных сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 109–118. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_109.

Original article

Predictive forecasting methodology for monitoring the technical condition of artificial structures

Oleg V. Osetinsky^{1✉}, Yuri G. Lazarev², Andrey A. Bely³

^{1, 2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

¹ 'Complex Systems and Networks', Saint-Petersburg, Russia

³ 'K2 Engineering', Moscow, Russia

³ Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

¹ 89095847909@mail.ru

² lazarev-yurij@yandex.ru

³ andbeliy@mail.ru

Abstract. This paper proposes a methodology for predictive forecasting of the technical condition of artificial structures based on the integration of automated monitoring data, a reference numerical model, and a library of defect scenarios. The purpose of the methodology is to improve the reliability of determining the actual technical condition of a structure and the accuracy of forecasting its future change and remaining useful life. The approach is based on representing the structural state as a multidimensional feature vector of the stress-strain state, followed by the application of taxonomic analysis methods to assess proximity to reference and defective conditions.

An integral indicator – the taxonomic condition index – is introduced to quantitatively evaluate the degree of structural degradation and to identify transition states at early stages of defect development. A classification algorithm is developed to identify the most probable dominant defect type (corrosion, fatigue crack, bearing malfunction), to provide scenario-based localization and to estimate its parameters.

A predictive framework based on time series analysis of diagnostic features is implemented, enabling forecasting of degradation processes and estimation of the remaining service life. It is shown that the proposed methodology provides a transition from threshold-based monitoring to multidimensional state assessment, improves the informativeness of monitoring data, and enhances decision-making in infrastructure risk management.

The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed methodology for improving the reliability and safety of bridge structures through early defect detection and proactive maintenance planning.

Keywords: predictive forecasting, predictive analytics, monitoring technical condition, artificial structures, bridges, stress-strain state, taxonomic analysis, remaining useful life, defect scenarios

For citation: Osetinsky O. V., Lazarev Yu. G., Bely A. A. Predictive forecasting methodology for monitoring the technical condition of artificial structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):109–118. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_109.

Введение

В условиях цифровизации инженерной инфраструктуры [1] и роста требований к надежности и безопасности объектов транспортного комплекса особую актуальность приобретает переход от реактивных стратегий управления техническим состоянием к проактивным. Одним из ключевых инструментов такого перехода является предиктивное прогнозирование (predictive analytics), представляющее собой совокупность методов анализа данных, математического моделирования и машинного обучения, направленных на выявление закономерностей деградации и прогнозирование будущих состояний технических систем.

Предиктивные методы широко применяются в железнодорожной отрасли [2–4], энергетике [5, 6], авиационной технике [7], военных системах связи [8], нефтегазовой отрасли [9], электротехнических и гидравлических системах [10, 11]. Современные исследования также направлены на интеграцию предиктивных моделей в системы искусственного интеллекта и цифровых двойников [12]. Общей тенденцией для всех указанных областей является переход от анализа отдельных параметров к комплексной обработке многомерных данных и формированию интегральных показателей технического состояния, что позволяет выявлять ранние стадии деградации и оценивать остаточный ресурс.

В области строительных конструкций данный подход реализуется в рамках Structural

Health Monitoring (SHM), предусматривающего сбор и анализ данных о состоянии конструкции. При этом основным ограничением современных систем мониторинга остается интерпретация больших массивов данных [13–22].

Традиционные методы анализа данных мониторинга [23], основанные на пороговых значениях контролируемых параметров, позволяют фиксировать уже сформировавшиеся отклонения, но недостаточно чувствительны к ранним стадиям повреждений, когда изменения носят скрытый характер и проявляются лишь в изменении структуры напряженно-деформированного состояния.

В настоящей работе под изменением структуры напряженно-деформированного состояния понимается устойчивое перераспределение не отдельно взятого параметра, а совокупности взаимосвязанных признаков: напряжений, деформаций и температурно обусловленных поправок в контрольных сечениях. Такое перераспределение проявляется, например, в изменении соотношений между усилиями в поясах, раскосах и опорных зонах фермы при одинаковом уровне внешней нагрузки. Поэтому ранний дефект может не приводить к превышению порогового значения отдельного датчика, но менять многомерный профиль отклика конструкции.

В этой связи актуальной задачей является разработка методик, обеспечивающих переход от порогового контроля к многомерному анализу состояния конструкции с учетом возмож-

ных сценариев ее деградации. Такой подход предполагает рассмотрение объекта как динамической системы, способной развиваться по различным траекториям повреждения, и требует использования предиктивных моделей, интегрирующих данные мониторинга, расчетные модели и знания о типовых дефектах.

Особое значение данная задача приобретает для искусственных сооружений, в частности железнодорожных мостов, эксплуатация которых сопровождается воздействием переменных нагрузок, климатических факторов и процессов усталостного разрушения. Высокая стоимость отказов и потенциальные последствия аварий обуславливают необходимость раннего выявления дефектов и обоснованного прогнозирования остаточного ресурса.

Целью работы является повышение достоверности определения фактического технического состояния искусственных сооружений и точности прогнозирования его изменения в будущем за счет разработки и обоснования методики, интегрирующей данные автоматизированного мониторинга, эталонную расчетную модель и библиотеку дефектных сценариев. Достижение указанной цели позволит обеспечить раннее выявление деградационных процессов, оценку остаточного ресурса конструкции и повышение обоснованности решений по управлению эксплуатационными рисками.

Теоретические исследования

Методика основана на сопоставлении фактических измерений автоматизированной системы контроля и мониторинга инженерных конструкций с эталонной расчетной моделью и библиотекой дефектных моделей, а также на

таксономическом анализе вектора параметров напряженно-деформированного состояния.

Таксономический анализ используется для классификации состояний объектов в многомерном признаковом пространстве на основе оценки расстояний до центров классов. Теория таксономического анализа позволяет на множестве размещенных на плоскости объектов выделить локальные неоднородности, таксоны, таким образом, чтобы сумма расстояний от объектов таксонов до центров таксонов была минимальной по всем таксонам. При преобразовании множества критериев в один необходимо определять весовые коэффициенты или другие функции влияния отдельных критериев на общий критерий. Также при формулировке задачи оптимизации требуется вводить ограничения, которые имеют неформальный характер.

Ниже приведен практический метод предиктивной аналитики для мониторинга мостового сооружения в виде фермы по данным о напряженно-деформированном состоянии (схему общей архитектуры можно увидеть на рис. 1), где сравниваются эталонная (исправная) модель и модели с типовыми дефектами: трещинами, коррозией и заклиниванием опорных частей.

1. Формирование базы сценариев.

Строится эталонная конечно-элементная модель фермы (без повреждений), затем формируется библиотека дефектных сценариев с параметризацией: положение и длина трещины, степень потери сечения от коррозии, тип и степень ограничения подвижности опор.

Эталонная модель формируется как параметризованная расчетная модель, калиброван-

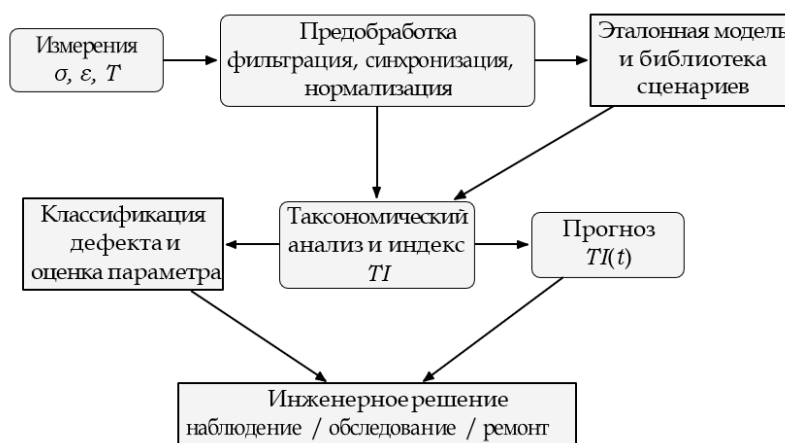


Рис. 1. Схема общей архитектуры методики предиктивной аналитики

ная по данным приемочных испытаний и раннего «здорового» периода эксплуатации. Учитывается геометрия, граничные значения, температурные показатели и статистика временной нагрузки.

Библиотека дефектных классов включает сценарии коррозии, усталостного разрушения и заклинивания опорных частей.

Под статистикой временной нагрузки в данной методике понимается совокупность распределений, описывающих эксплуатационное воздействие подвижной нагрузки на сооружение: интенсивность прохода транспортных единиц, массу и осевые нагрузки, скорость, интервалы между проходами, повторяемость характерных схем загрузки, а также сезонную изменчивость этих параметров. В эталонной модели указанная статистика используется для формирования набора расчетных загрузок и их весов, для задания доверительных диапазонов отклика исправной конструкции и для отделения изменений, вызванных эксплуатационной нагрузкой, от изменений, связанных с развитием дефекта.

2. Набор диагностических признаков напряженно-деформированного состояния.

Для каждого сценария и для реальных измерений под нагрузкой формируется вектор признаков:

$x = (\sigma_1, \dots, \sigma_m, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, t_1, \dots, t),$ (1)
где σ – напряжения в контрольных сечениях; ε – деформации по тензодатчикам; t – температура в узлах.

Для устойчивости к шуму выполняется фильтрация, синхронизация по времени и усреднение по окнам нагружения.

Контрольные сечения выбираются не произвольно, а по совокупности инженерных и расчетных критериев: расположению зон максимальных усилий по эталонной модели, чувствительности отклика к моделируемым де-

фектам, доступности установки и обслуживания датчиков, а также необходимости различать дефекты разной природы. В демонстрационном примере выбраны три сечения: нижний пояс в зоне максимального изгиба; раскос панели, чувствительный к потере площади сечения при коррозии; приопорный узел или соседнее сечение, чувствительное к ограничению подвижности опорной части. Количество сечений принято как минимальный демонстрационный набор, при практическом внедрении размерность вектора признаков увеличивается в соответствии со схемой мониторинга конкретного сооружения.

3. Нормализация и таксономические расстояния.

Признаки стандартизируются:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{s_j}, \quad (2)$$

где μ_j и s_j – среднее и стандартное отклонение признака j по обучающей выборке.

Далее вычисляется расстояние до эталона и до центров дефектных моделей (например, евклидово или Махаланобиса):

$$d_i^{(0)} = \|z_i - z_{ref}\|, \quad d_i^{(c)} = \|z_i - z_c\|, \quad (3)$$

где $c \in \{\text{трещина, коррозия, заклинивание}\}$.

4. Таксономический индекс технического состояния.

Вводится интегральный индекс близости к исправному состоянию:

$$TI_i = 1 - \frac{d_i^{(0)}}{d^*}, \quad d^* = \bar{d} + 2s_d, \quad (4)$$

где $\bar{d}$ и s_d – статистики расстояний для исправных режимов.

Чем меньше TI_i , тем выше риск деградации (рис. 2). Для интерпретации можно использовать следующие зоны:

- норма ($TI \geq 0,8$),
- предупреждение ($0,6 \leq TI < 0,8$),
- дефект ($TI < 0,6$).

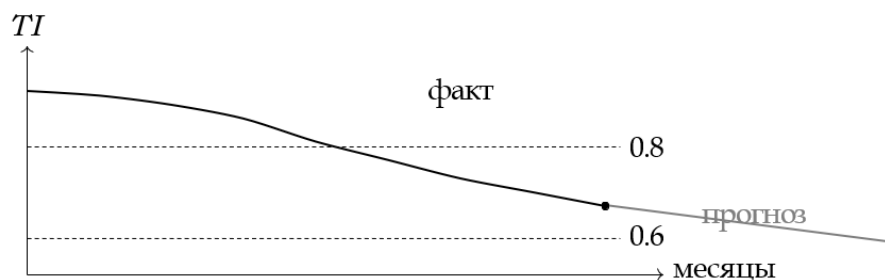


Рис. 2. Динамика индекса технического состояния

Указанные границы не являются универсальными нормативными константами, а представлены примером объектно ориентированной калибровки. В практической реализации они назначаются по данным исправного периода эксплуатации, результатам расчетного моделирования и проверки разделимости дефектных сценариев. Зона «норма» должна включать доверительный диапазон исправных наблюдений с учетом эксплуатационной и температурной изменчивости, зона «предупреждение» соответствует устойчивому выходу вектора признаков за этот диапазон без однозначного сближения с дефектным таксоном, а зона «дефект» назначается при устойчивом уменьшении расстояния до одного из дефектных классов относительно расстояния до эталона. Поэтому для другого сооружения значения 0,8 и 0,6 подлежат повторной калибровке.

5. Таксономическая классификация типа дефекта.

После фиксации отклонения от эталона тип дефекта определяется по минимальному расстоянию:

$$\hat{c} = \arg \min_i d_i^{(c)}. \quad (5)$$

Дополнительно оценивается степень повреждения (например, длина трещины или процент коррозии) через регрессию по подмножеству наиболее информативных признаков.

Результат классификации следует трактовать как выбор наиболее вероятного дефектного сценария из заданной библиотеки, а не как абсолютно однозначное заключение по одному измеренному параметру. Одному и тому же значению отдельного контролируемого параметра могут соответствовать различные дефекты, поэтому решение принимается по многомерному вектору признаков, по индексу уверенности и по устойчивости результата во времени. Локализация дефекта обеспечивается тем, что каждый сценарий библиотеки содержит пространственную привязку: элемент, панель фермы, узел или опорную часть. Если наиболее близким оказывается класс «усталостная трещина», первоочередному обследованию подлежит тот элемент или узел, чей сценарий имеет минимальное расстояние до измеренного вектора; при низком индексе уверенности результат рассмат-

ривается как неоднозначный и требует дополнительного контроля или инструментального обследования.

6. Предиктивный контур (прогноз).

По временным рядам индекса TI_i и ключевым признакам напряженно-деформированного состояния строится прогноз деградации (например, ARIMA/LSTM/градиентный бустинг):

$$TI(t + \Delta t) = f(TI(t), TI(t - 1), x(t)). \quad (6)$$

По моменту пересечения порога определяется остаточный ресурс до перехода в опасную зону.

Результаты исследования

Для проверки работоспособности методики рассмотрен демонстрационный расчетный пример ферменного пролетного строения, оснащенного датчиками напряжений, деформаций и температуры в трех контрольных сечениях. Исходные данные выбраны исходя из типовой схемы мониторинга мостового сооружения и наиболее характерных для ферменных конструкций дефектных сценариев: коррозионной потери площади элемента, усталостного снижения жесткости вследствие трещины и нарушения работы опорной части. Такой набор позволяет показать различие дефектов, близких по влиянию на отдельные параметры, но отличающихся по многомерному профилю отклика.

За контролируемый параметр принято текущее состояние конструкции при испытании под нагрузкой, формируем вектор признаков:

$$x = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, t_1, t_2, t_3), \quad (7)$$

где σ_i – напряжения в контрольных сечениях, МПа; ε_i – деформации по тензодатчикам, мкм/м; t_i – температуры в узлах, °С.

Первое сечение соответствует зоне максимального изгиба нижнего пояса, второе – раскосу панели с повышенной чувствительностью к коррозионной потере площади, третье – опорной зоне, в которой изменение условий опирания сильнее всего влияет на перераспределение усилий. Три сечения использованы для компактности иллюстрации; при обследовании реального объекта число сечений и датчиков определяется проектом мониторинга и результатами анализа чувствительности.

Библиотека дефектных классов (медианные центры таксонов в нормированных координатах) представлена в таблице.

Задача аналитики состояния по измеренным значениям

По вектору измерений x_{meas} требуется определить соответствие состояния одному из дефектных классов: D1, D2, D3. Для этого сравниваем нормированный вектор z_{meas} с медианными центрами C_r (рис. 3) и вычисляем расстояния:

$$d_r = \|z_{meas} - C_r\|_2, \quad r \in \{1, 2, 3\}. \quad (8)$$

Правило решения

$$\hat{r} = \arg \min_i d_r, \text{ класс состояния} = D_{\hat{r}}.$$

Для количественной интерпретации используем индекс уверенности (чем ближе к единице, тем надежнее выбор):

$$q = 1 - \frac{d_{\min}}{d_{2nd}}, \quad (9)$$

где $d_{\min}$ – минимальное расстояние; d_{2nd} – второе по величине близости (второе минимальное).

В рассматриваемом примере нормированный измеренный вектор принят равным $z_{meas} = (0,12; 0,06; 0,09; 0,15; 0,10; 0,11; 0,02; 0,02; 0,01)$.

Евклидовы расстояния до медианных центров составляют: $d_{D1} = 0,024$; $d_{D2} = 0,133$; $d_{D3} = 0,168$.

Минимальное расстояние соответствует классу D1, а индекс уверенности равен $q = 1 - 0,024/0,133 \approx 0,82$. Следовательно, текущее состояние наиболее соответствует дефектному классу D1 – прогрессирующей коррозии раскоса, а оценка параметра дефекта находится на уровне $\alpha \approx 10...12\%$ (рис. 4). Выбор D1 объясняется тем, что измеренный профиль одновременно показывает рост признаков, связанных с перераспределением усилий в раскосе, и не демонстрирует характерного для заклинивания опоры увеличения температурно-зависимых и приопорных признаков. При этом вывод о коррозии следует рассматривать как основание для адресного обследования указанного раскоса, а не как замену визуально-инструментальной проверки.

Длительность наблюдения 12 месяцев на рис. 4 выбрана как минимальный интервал,

Медианные центры таксонов в нормированных координатах

Класс	Параметр дефекта	Пример центра C_r
D1	Коррозия раскоса, $\alpha = 12\%$ потери площади	0,11; 0,05; 0,08; 0,16; 0,09; 0,10; 0,02; 0,02
D2	Усталостная трещина, эквивалентная потеря жесткости $\beta = 18\%$	0,07; 0,03; 0,15; 0,10; 0,06; 0,19; 0,01; 0,01
D3	Заклинивание опоры, ограничение перемещения $\gamma = 0,6$	0,18; 0,16; 0,05; 0,20; 0,18; 0,07; 0,06; 0,05

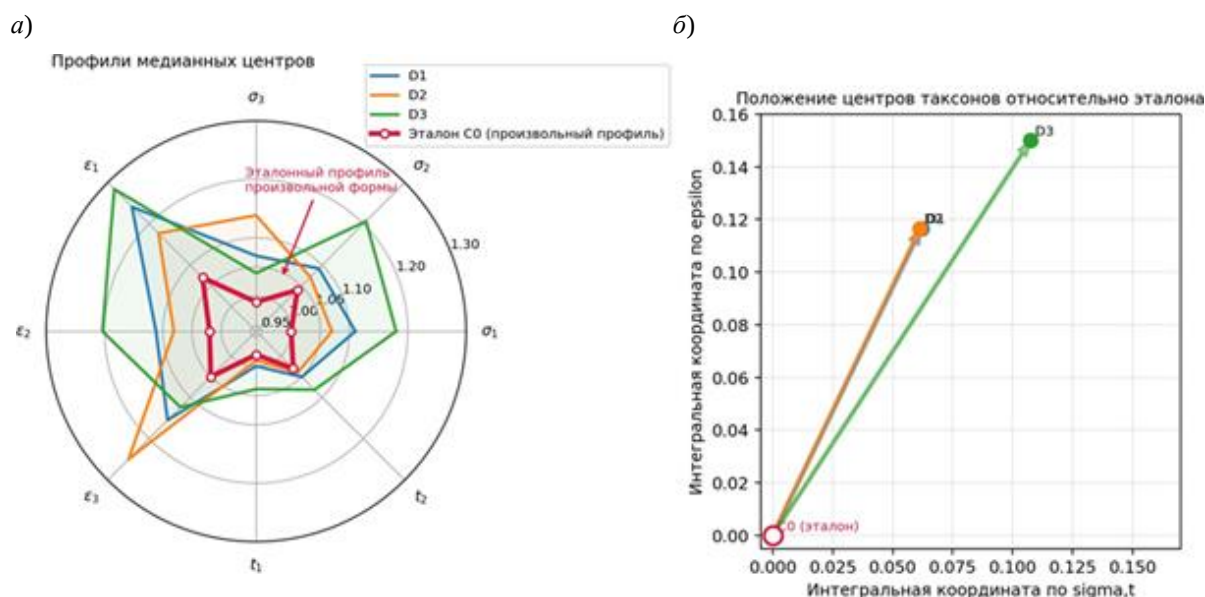


Рис. 3. Динамика индекса технического состояния:

а – профили медианных центров D1–D3 по нормированным признакам; б – их положение относительно эталона C0 в интегральной проекции признакового пространства

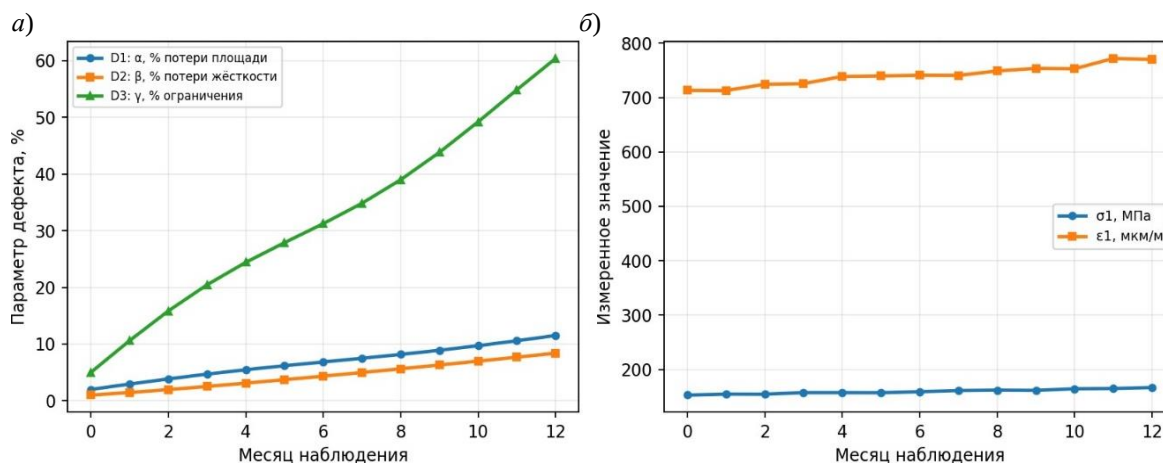


Рис. 4. Примерные графики развития дефектов D1–D3 (а) и соответствующей реакции измеряемых признаков (б)

охватывающий полный годовой цикл температурных воздействий и сезонной изменчивости временной нагрузки. Это позволяет отделить регулярную сезонную составляющую от устойчивого тренда деградации. При наличии архива мониторинга за несколько лет тот же алгоритм может быть применен к более длинному временному ряду, что повысит устойчивость прогноза остаточного ресурса.

Заключение

Разработана и обоснована методика предиктивного прогнозирования технического состояния искусственных сооружений, направленная на повышение достоверности определения фактического технического состояния и точности прогноза его изменения во времени. Методика основана на интеграции данных автоматизированного мониторинга, эталонной расчетной модели и библиотеки дефектных сценариев.

Предложенный подход обеспечивает переход от порогового контроля к многомерной

классификации состояния конструкции по вектору признаков напряженно-деформированного состояния. Введенный таксономический индекс позволяет количественно оценивать степень деградации, идентифицировать доминирующий дефектный сценарий и прогнозировать развитие повреждений.

Уточнено, что идентификация дефекта выполняется как вероятностный выбор наиболее близкого сценария из заранее сформированной и пространственно размеченной библиотеки. Поэтому результат методики должен использоваться для назначения адресного обследования и уточняющей диагностики, особенно в случаях низкого индекса уверенности или близких состояний до нескольких дефектных классов.

Реализация предиктивного контура обеспечивает возможность оценки остаточного ресурса и повышения обоснованности решений по управлению эксплуатационными рисками мостовых сооружений.

Список источников

1. Шестакова Е. Б. Цифровой инжиниринг. Основы и примеры из практики : монография. Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2024. 191 с.
2. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Петербургский университет путей сообщения. Санкт-Петербург, 2016. 171 с.
3. Федотов М. В. Предиктивная диагностика оборудования тепловоза на основе интеллектуального анализа данных : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федотов Михаил Владимирович ; ПГУПС. Санкт-Петербург, 2021. 205 с.
4. Гаранин М. А., Дмитриев В. В., Верстина Ю. Д. Управление железнодорожными станциями на основе данных // Транспортное дело России. 2025. № 5. С. 279–285. EDN EYRAGY.
5. Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В. Составление прогнозов применительно к воздушным линиям электропередач с помощью предиктивной аналитики // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1 (100). С. 20–30. DOI 10.37493/2307-907X.2024.1.2.

6. Левин В. М., Боярова Д. А. Распределенная система предиктивного управления состоянием оборудования электрических сетей по наработке на дефект // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 3. С. 123–134. DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Волков И. А., Бобин К. Н. Методика предиктивного прогнозирования дефектов при технической эксплуатации самолета // Наука. Промышленность. Оборона : труды XXIV Всероссийской научно-технической конференции : в 4 томах / под редакцией А. В. Гуськова. Новосибирск, 2023. С. 216–218. EDN LJQXMK.
8. Шмидт А. А., Косырев А. В. Анализ научно-методического аппарата диагностики и контроля, мониторинга и прогнозирования технического состояния военной техники связи // Техника средств связи. 2023. № 4 (164). С. 81–92. DOI 10.24412/2782-2141-2023-4-81-92.
9. Захаров О. В., Захаров И. В., Бочаров Н. В. Использование предиктивной аналитики и машинного обучения для прогноза аварий в процессе строительства нефтяных и газовых скважин // Современные проблемы машиноведения : сборник научных трудов : в 2 частях. Гомель, 2025. С. 163–167. EDN LBFKAA.
10. Помелов В. Н., Андреев В. В. Разработка методики прогнозирования и верификации гидравлического сопротивления для каналов различной геометрии на основании предиктивной модели // Ядерные технологии: от исследований к внедрению : сборник материалов научно-практической конференции. 2018. С. 42–43. EDN VNRVST.
11. Аунг Ч. М., Портнов Е. М., Подопригора В. Д. Разработка методики предиктивного анализа надежности электротехнических устройств // Перспективы науки. 2025. № 6 (189). С. 64–70. EDN LTYZYY.
12. Попова Е. С., Нефедов А. В. Интеграция методики пошагового прогнозирования состояния сложных технических объектов в системы искусственного интеллекта // Искусственный интеллект. Теория и практика. 2025. № 4 (12). С. 87–89. EDN WXRKPV.
13. Бушуев С. В., Ускова М. Л., Попов А. Н. Оценка влияния систем технической диагностики и мониторинга на надежность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в эксплуатации // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 68–72. EDN SVNLDD.
14. Донец Н. А., Афанасьев В. С. Оценка экономической эффективности мониторинга технического состояния мостовых сооружений. Часть 1 // Транспортное строительство. 2016. № 1. С. 15–17. EDN VOOPTV.
15. Донец Н. А., Афанасьев В. С. Экономическая эффективность мониторинга технического состояния мостовых искусственных сооружений. Часть 2 // Транспортное строительство. 2016. № 2. С. 2–4. EDN VOOPLYV.
16. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 1. С. 124–148. EDN VXJDHV.
17. Яшнов А. Н. Методология сквозного мониторинга технического состояния мостовых сооружений в их жизненном цикле : специальность 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Яшнов Андрей Николаевич ; СГУПС. Новосибирск, 2023. 376 с.
18. Гусев Г. Н. Деградация датчиков в системе интеллектуального деформационного мониторинга и метод ее диагностики // Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций. Пермь, 2024. С. 136–137. EDN CLOJBF.
19. Махонько А. А., Лазарев Ю. Г., Антонюк А. А. Технический аспект работы акселерометров в составе системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 401–418. DOI 10.17816/transsyst630992.
20. Кочетков А. В., Валиев Ш. Н. Рискориентированный подход при эксплуатации мостов // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 4 (113). С. 25–29. EDN LIQEXA.
21. Махонько А. А., Лазарев Ю. Г. Оценка работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2025. № 62 (88). С. 28–34. EDN ZQXSOZ.
22. Белый А. А., Павлов Е. И. Надежность систем мониторинга объектов транспортной и гражданской инфраструктуры // Инновационные транспортные системы и технологии. 2026. Т. 12, № 1. С. 76–95. DOI 10.17816/transsyst701828.
23. Особенности и современные методы обеспечения контроля технического состояния искусственных сооружений с пролетными строениями в виде железнодорожных ферм / О. В. Осетинский, А. А. Белый, А. А. Антонюк, Г. В. Осадчий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (71), спецвыпуск. С. 55–65. DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_55.

References

1. Shestakova E. B. Digital Engineering. Fundamentals and practical examples: monograph. Moscow: IPR Media; 2024. 191 p. (In Russ.).
2. Efanov D. V. Functional testing and monitoring of railway automation and telemechanics devices: monograph. Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. St. Petersburg; 2016. 171 p. (In Russ.).
3. Fedotov M. V. Predictive diagnostics of diesel locomotive equipment based on intelligent data analysis. Specialty 05.22.07 'Railway Rolling Stock, Train Traction, and Electrification'. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. St. Petersburg; 2021. 205 p. (In Russ.).
4. Garanin M. A., Dmitriev V. V., Verstina Yu. D. Data-driven railway station management. *Transport Business of Russia*. 2025;(5):279–285. (In Russ.). EDN EYRAGY.
5. Kondrashova Yu. N., Tretyakov A. M., Shalimov A. V. Forecasting for overhead power transmission lines using predictive analytics. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2024;(100):20–30. (In Russ.). DOI 10.37493/2307-907X.2024.1.2.
6. Levin V. M., Boyarova D. A. Distributed system for predictive condition monitoring of electrical grid equipment based on Time-to-Failure. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems*. 2025;27(3):123–134. (In Russ.). DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Volkov I. A., Bobin K. N. Methodology for predictive forecasting of defects during aircraft technical operation. *Science. Industry. Defense. Proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Technical Conference: in 4 volumes*. Edited by A. V. Guskov A.V. Novosibirsk; 2023. P. 216–218. (In Russ.). EDN LJQXMK.
8. Schmidt A. A., Kosyrev A. V. Analysis of the scientific and methodological framework for diagnostics, control, monitoring, and forecasting the technical condition of military communication equipment. *Communication Equipment Technology*. 2023;(164):81–92. (In Russ.). DOI 10.24412/2782-2141-2023-4-81-92.
9. Zakharov O. V., Zakharov I. V., Bocharov N. V. Use of predictive analytics and machine learning to forecast accidents during oil and gas well construction. *Modern Problems of Mechanical Engineering. Proceedings in 2 parts*. Gomel; 2025. P. 163–167. (In Russ.). EDN LBFKAA.
10. Pomelov V. N., Andreev V. V. Development of a methodology for forecasting and verifying hydraulic resistance in channels of various geometries based on a predictive model. *Nuclear Technologies: From Research to Implementation. Proceedings of the Scientific and Practical Conference*. 2018. P. 42–43. (In Russ.). EDN VNRVST.
11. Aung Ch. M., Portnov E. M., Podoprigora V. D. Development of a methodology for predictive reliability analysis of electrical devices. *Prospects of Science*. 2025;(189):64–70. (In Russ.). EDN LTYZYY.
12. Popova E. S., Nefedov A. V. Integration of the step-by-step state forecasting methodology for complex technical objects into artificial intelligence systems. *Artificial Intelligence. Theory and Practice*. 2025;(12):87–89. (In Russ.). EDN WXRKPV.
13. Bushuev S. V., Uskova M. L., Popov A. N. Impact of technical diagnostics and monitoring systems on the reliability of railway automation and telemechanics devices during operation. *Transport of the Urals*. 2014;(42):68–72. (In Russ.). EDN SVNLDD.
14. Donets N. A., Afanasyev V. S. Assessment of the economic efficiency of monitoring the technical condition of bridge structures. Part 1. *Transport Construction*. 2016. No. 1. P. 15–17. (In Russ.). EDN VOOPTV.
15. Donets N. A., Afanasyev V. S. Economic efficiency of monitoring the technical condition of bridge structures. Part 2. *Transport Construction*. 2016;(2):2–4. (In Russ.). EDN VOOPYV.
16. Efanov D. V. Emergence and development prospects of functional control and monitoring systems for railway automation and telemechanics devices. *Automation in Transport*. 2016;2(1):124–148. (In Russ.). EDN VVJDHV.
17. Yashnov A. N. Methodology for end-to-end monitoring of the technical condition of bridge structures throughout their lifecycle. Specialty 2.1.8 'Design and construction of roads, subways, airfields, bridges, and transport tunnels'. Dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Siberian Transport University. Novosibirsk; 2023. 376 p. (In Russ.).
18. Gusev G. N. Sensor degradation in an intelligent deformation monitoring system and a method for its diagnosis. *Mechanics of Deformable Solids in Materials and Structures Design*. Perm; 2024. P. 136–137. (In Russ.). EDN CLOJBF.
19. Makhonko A. A., Lazarev Yu. G., Antonyuk A. A. Technical aspects of accelerometer operation within the structural health monitoring system of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal (part of the Western High-Speed Diameter Highway in St. Petersburg). *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2024;10(3):401–418. (In Russ.). DOI 10.17816/transsyst630992.
20. Kochetkov A. V., Valiev Sh. N. Risk-based approach to bridge operation. *Transport of the Russian Federation*. 2024;(113):25–29. (In Russ.). EDN: JIQEXA.
21. Makhonko A. A., Lazarev Yu. G. Performance assessment of the structural health monitoring system for the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal (part of the Western High-Speed Diameter Highway in St. Petersburg). *Putevoy Navigator*. 2025;(88):28–34. (In Russ.). EDN ZQXSOZ.

22. Bely A. A., Pavlov E. I. Reliability of monitoring systems for transport and civil infrastructure facilities. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2026;12(1):76–95. (In Russ.). DOI 10.17816/transsyst701828.

23. Osetinsky O. V., Bely A. A., Antonyuk A. A., Osadchy G. V. Features and modern methods for monitoring the technical condition of artificial structures with railway truss spans. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(71):55–65. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_55.

Информация об авторах

О. В. Осетинский – начальник отдела ООО «Комплексные Системы и Сети», аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Ю. Г. Лазарев – доктор технических наук, профессор, директор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

А. А. Белый – доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, академик Международной академии транспорта, технический директор ООО «K2 Инжиниринг», профессор кафедры «Мосты и тоннели» Ташкентского государственного транспортного университета.

Information about the authors

O. V. Osetinsky – Head of the Department at Complex Systems and Networks LLC, Postgraduate Student at the Higher School of Industrial, Civil, and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Yu. G. Lazarev – Doctor of Engineering, Professor, Director of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

A. A. Bely – Doctor of Engineering, Academician of Russian Transport Academy, Academician of International Transport Academy, Technical Director K2 Engineering LLC, Professor of the Bridges and Tunnels Department, Tashkent State Transport University.

Статья поступила в редакцию 15.05.2026; одобрена после рецензирования 25.06.2026; принята к публикации 08.09.2026.

The article was submitted 15.05.2026; approved after reviewing 25.06.2026; accepted for publication 08.09.2026.