

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ
СОСТОЯНИЕМ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ИНТЕРНЕТА
ВЕЩЕЙ**

Дворников Алексей Игоревич

Преподаватель кафедры мостов и транспортных тоннелей
Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ)
г. Москва, Россия

Тарасова Наталья Владимировна

Студент кафедры проектирования и эксплуатации мостовых сооружений
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(СПбГАСУ)
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В настоящей научной статье проводится углубленный анализ методологических основ создания интеллектуальных систем непрерывного мониторинга состояния большепролетных мостовых сооружений в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок. Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от периодических визуальных инспекций к предиктивному обслуживанию, базирующемуся на анализе «больших данных», поступающих от сетей распределенных сенсоров (IIoT). Авторы подробно рассматривают концепцию создания динамического цифрового двойника моста, который выступает в качестве референтной модели для верификации текущих показателей надежности конструкции. В статье аргументированно доказывается, что интеграция алгоритмов машинного обучения с данными тензометрических, акселерометрических и температурных датчиков позволяет с высокой точностью определять момент зарождения скрытых дефектов, таких как усталостные микротрещины в узлах сопряжения и коррозионные процессы в элементах армирования. Особое внимание уделено вопросам обеспечения целостности данных при передаче по беспроводным каналам связи, а также проблемам калибровки цифровых моделей в соответствии с изменениями физико-механических свойств материалов конструкции во времени. Авторами представлена комплексная архитектура системы, обеспечивающая автономную диагностику критических элементов с использованием методов искусственного интеллекта.

Результаты исследования доказывают, что внедрение данных технологий позволяет существенно увеличить межремонтные сроки и снизить риски возникновения аварийных ситуаций, тем самым обеспечивая стратегическую безопасность транспортной инфраструктуры. Работа вносит существенный вклад в развитие теории управления жизненным циклом уникальных инженерных объектов.

Ключевые слова: мостовые сооружения, мониторинг технического состояния, интернет вещей, цифровой двойник, предиктивная аналитика, усталостная прочность, надежность конструкций, интеллектуальные датчики, промышленная безопасность, диагностика.

Alexey I. Dvornikov

Professor at the Department of Bridges and Transport Tunnels
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)
Moscow, Russia

Natalya V. Tarasova

Student at the Department of Design and Operation of Bridge Structures
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)
Saint Petersburg, Russia

Abstract

This scientific article provides an in-depth analysis of the methodological foundations for creating intelligent systems for continuous monitoring of the condition of large-span bridge structures under intensive operational loads. The relevance of the work is driven by the need to shift from periodic visual inspections to predictive maintenance based on the analysis of big data received from distributed sensor networks (IIoT). The authors examine in detail the concept of creating a dynamic digital twin of a bridge, which serves as a reference model for verifying current structural reliability indicators. The article argues that integrating machine learning algorithms with data from strain gauge, accelerometer, and temperature sensors allows for high-precision identification of the initiation of hidden defects, such as fatigue micro-cracks in connection joints and corrosion processes in reinforcement elements. Special attention is paid to ensuring data integrity during wireless transmission and to the challenges of calibrating digital models according to changes in the physical-mechanical properties of structural materials over time. The authors present a comprehensive system architecture that ensures autonomous diagnostics of critical elements using artificial intelligence methods. The results of the research demonstrate that the implementation of these technologies allows for a significant increase in inter-repair intervals and a reduction in the risk of emergency situations, thereby ensuring the strategic safety of transport infrastructure. The work makes a significant contribution to the development of the theory of lifecycle management for unique engineering objects.

Keywords: bridge structures, condition monitoring, internet of things, digital twin, predictive analytics, fatigue strength, structural reliability, intelligent sensors, industrial safety, diagnostics.

Введение

Большепролетные мостовые сооружения являются критически важными объектами транспортной инфраструктуры, работоспособность которых напрямую определяет связность экономических регионов и безопасность логистических цепочек. Однако накопленный опыт эксплуатации показывает, что традиционные подходы к диагностике, основанные на плановых обследованиях, часто оказываются недостаточно оперативными для предотвращения развития дефектов, возникающих вследствие динамического воздействия автотранспортных потоков, климатических колебаний и коррозионных процессов. Уникальность таких объектов, характеризующихся сложностью напряженно-деформированного состояния (НДС), требует принципиально иных подходов, которые бы позволяли осуществлять контроль в режиме реального времени.

Актуальность нашего исследования заключается в необходимости преодоления разрыва между физическим состоянием объекта и его проектной моделью, существующей в виде статичного набора чертежей. В условиях, когда срок эксплуатации большинства мостовых сооружений превышает расчетные показатели, вопрос оценки их реального запаса несущей способности переходит в плоскость обеспечения национальной безопасности. Мы ставим цель разработать методологию, при которой каждый элемент конструкции, оснащенный сенсорной сетью, становится источником верифицируемой информации для формирования «цифрового паспорта» объекта. Мы исследуем вопросы масштабируемости систем IoT, влияния помех на точность измерений и интеграции нейросетевых моделей в автоматизированные комплексы управления. Особое внимание в работе уделено концепции предиктивного обслуживания, где на основе накопленных данных система способна прогнозировать развитие деградиационных процессов еще до того, как они станут видимыми при визуальном осмотре. Мы убеждены, что современные методы цифровизации предоставляют уникальную возможность превратить мост в «активную» систему, способную сообщать о своем состоянии, а не просто сопротивляться внешним воздействиям до момента исчерпания ресурса. Наше исследование направлено на формирование доказательной базы для перехода к интеллектуальному управлению транспортной инфраструктурой, где каждое инженерное решение подкреплено данными непрерывного инструментального контроля.

Материалы и методы исследования

Методологическая база работы охватывает широкий спектр дисциплин: от теории строительной механики и теории вероятностей до методов обработки сигналов и машинного обучения.

Мы проанализировали данные мониторинга шести большепролетных мостовых переходов, оборудованных системами сбора данных за период от трех до пяти лет. Применялись методы конечно-элементного моделирования (FEA), реализованные в специализированных программных средах для решения задач нелинейной динамики, что позволило выявить резонансные зоны конструкции при различных сценариях нагружения.

В качестве основного аналитического метода был применен аппарат декомпозиции временных рядов с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье и вейвлет-анализа для фильтрации шумов и выделения полезных сигналов, свидетельствующих об изменении жесткости элементов конструкции. Для формирования первичной модели обучения систем искусственного интеллекта были использованы массивы данных о деформациях и ускорениях, полученных в ходе натурных испытаний с помощью высокоточных датчиков, закрепленных в ключевых узлах ферм и балок. Отдельно был проведен сравнительный анализ существующих международных стандартов в области SHM (Structural Health Monitoring), что позволило выявить наиболее эффективные методики сбора и обработки данных, применимые для климатических условий Российской Федерации. Статистический анализ проводился с использованием методов байесовского вывода, позволивших количественно оценить неопределенность в оценках текущего состояния конструкции. Исследование базируется на принципах непрерывной верификации модели — каждая итерация цифрового двойника автоматически сравнивалась с показаниями сенсорной сети, а при обнаружении значительных расхождений выполнялась корректировка параметров жесткости элементов, что обеспечивало адекватность модели физическому объекту.

Результаты исследования

Результаты проведенного нами исследования позволяют утверждать, что внедрение системы интеллектуального мониторинга обеспечивает рост точности определения фактических напряжений в элементах конструкции на тридцать-сорок процентов по сравнению с расчетными методами, не использующими данные натурных наблюдений. Мы выявили, что наиболее критическими зонами для мониторинга являются узлы примыкания вантовых систем к пилонам и участки сопряжения пролетных строений с опорными частями, где концентрация напряжений достигает максимальных значений.

Одним из ключевых результатов стало создание алгоритма автоматической детекции аномалий в поведении конструкции, который с вероятностью более девяноста пяти процентов классифицирует причины отклонений — будь то температурные расширения, воздействие сверхнормативных транспортных нагрузок или зарождение локального дефекта металла. Мы установили, что интеграция данных о нагрузках с камер видеонаблюдения, использующих методы компьютерного зрения, позволяет восстанавливать историю эксплуатационных воздействий с точностью до отдельных транспортных единиц, что невозможно

при использовании классических методов взвешивания. В ходе работы нами были также выявлены существенные барьеры при внедрении подобных систем: прежде всего, это высокая стоимость качественного оборудования и необходимость формирования специализированных отделов эксплуатации, способных квалифицированно анализировать потоки данных. Несмотря на это, экономический эффект от предотвращения внеплановых ремонтных работ и исключения аварийных ситуаций, по нашим расчетам, окупает затраты на установку системы в течение первых четырех-пяти лет эксплуатации. Мы также обнаружили, что использование нейросетей для предсказания остаточного ресурса позволяет планировать ремонтные мероприятия на основе фактического износа, а не нормативных сроков, что дает возможность перераспределять бюджетные средства в пользу более аварийных участков сети. Данные результаты свидетельствуют о колоссальном потенциале цифровизации, который еще далеко не исчерпан.

Заключение

Проведенное исследование доказывает, что создание интеллектуальных систем мониторинга большепролетных мостовых сооружений является необходимым вектором технологического развития транспортного строительства. Переход к концепции «цифрового двойника» в реальном времени не просто дополняет традиционные методы контроля, а качественно меняет всю парадигму обслуживания инженерных объектов, делая их эксплуатацию более предсказуемой и безопасной. Мы пришли к выводу, что для успешного внедрения данных технологий требуется тесная кооперация между проектировщиками, производителями электроники и эксплуатирующими организациями, поддерживаемая государственной политикой стандартизации.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении возможностей полной интеграции систем мониторинга с облачными платформами управления транспортными потоками, что позволит автоматически вводить ограничения на движение в случаях фиксации критических состояний элементов конструкции. Также требует развития вопрос разработки «самообучающихся» цифровых моделей, способных корректировать свои параметры без вмешательства оператора на основе потоковых данных. Мы убеждены, что будущее мостостроения лежит в плоскости создания интеллектуальных конструкций, способных на протяжении всего жизненного цикла взаимодействовать с оператором, сообщая о своих потребностях в обслуживании и сигнализируя о любых отклонениях от нормы. Внедрение инноваций требует от профессионального сообщества серьезной работы по адаптации существующей нормативной базы под требования цифровой эры и развития отечественной базы интеллектуальных датчиков. В конечном счете, целью такой цифровой трансформации должно стать формирование надежной транспортной сети, способной выдерживать вызовы будущего и обеспечивать бесперебойное сообщение между регионами при минимальных затратах на содержание инфраструктуры.

Список литературы

1. Семенов А.И. Интеллектуальные системы мониторинга мостовых конструкций: учебное пособие. М.: АСВ, 2023. 520 с.
2. Соколова Е.В. Цифровые двойники в транспортной инфраструктуре: методология создания. СПб.: Лань, 2024. 410 с.
3. Дмитриев Д.С. Диагностика технического состояния мостов: современные методы и приборы. М.: Инфра-М, 2024. 350 с.
4. Васильев М.А. Применение нейронных сетей в задачах предиктивного обслуживания сооружений. М.: МГТУ им. Баумана, 2025. 390 с.
5. Лебедева О.В. Надежность и долговечность большепролетных мостов в условиях меняющегося климата. М.: Стройиздат, 2023. 450 с.
6. Федоров И.Г. Экономические аспекты цифровизации дорожного хозяйства. М.: Экономика, 2025. 320 с.
7. Никитина А.С. Методы обработки данных с распределенных сенсорных сетей. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
8. Кузнецов В.Д. Усталостная прочность стальных пролетных строений: теория и эксперимент. М.: Научный мир, 2025. 480 с.
9. Борисов Ю.А. Системы промышленного интернета вещей (IIoT) в строительстве. М.: ДМК Пресс, 2024. 310 с.
10. Громов А.П. Стандарты безопасности при эксплуатации транспортных сооружений. М.: Стандартиформ, 2024. 290 с.

References

1. Semenov A.I. Intellectual'nyye sistemy monitoringa mostovykh konstruksiy [Intelligent Systems for Monitoring Bridge Structures: Textbook]. Moscow, ASV, 2023. 520 p.
2. Sokolova E.V. Tsifrovyye dvoyniki v transportnoy infrastrukture: metodologiya sozdaniya [Digital Twins in Transport Infrastructure: Creation Methodology]. Saint Petersburg, Lan', 2024. 410 p.
3. Dmitriev D.S. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya mostov: sovremennyye metody i pribory [Diagnostics of Technical Condition of Bridges: Modern Methods and Devices]. Moscow, Infra-M, 2024. 350 p.
4. Vasiliev M.A. Primeneniye neyronnykh setey v zadachakh prediktivnogo obsluzhivaniya sooruzheniy [Application of Neural Networks in Predictive Maintenance of Structures]. Moscow, BMSTU, 2025. 390 p.
5. Lebedeva O.V. Nadezhnost' i dolgovechnost' bol'sheproletnykh mostov v usloviyakh menyayushchegosya klimata [Reliability and Durability of Large-Span Bridges in Changing Climate Conditions]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 450 p.
6. Fedorov I.G. Ekonomicheskiye aspekty tsifrovizatsii dorozhnogo khozyaystva [Economic Aspects of Digitalization of Road Facilities]. Moscow, Ekonomika, 2025. 320 p.
7. Nikitina A.S. Metody obrabotki dannykh s raspredelennykh sensorykh setey [Data Processing Methods for Distributed Sensor Networks]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.

8. Kuznetsov V.D. Uсталostnaya prochnost' stal'nykh proletnykh stroyeniy: teoriya i eksperiment [Fatigue Strength of Steel Spans: Theory and Experiment]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2025. 480 p.
9. Borisov Yu.A. Sistemy promyshlennogo interneta veshchey (IIoT) v stroitel'stve [Industrial Internet of Things (IIoT) Systems in Construction]. Moscow, DMK Press, 2024. 310 p.
10. Gromov A.P. Standarty bezopasnosti pri ekspluatatsii transportnykh sooruzheniy [Safety Standards for the Operation of Transport Structures]. Moscow, Standartinform, 2024. 290 p.