



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ,
КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ/MATHEMATICAL SOFTWARE FOR COMPUTERS,
COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28>

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ»

Научная статья

Авсиевич Н.А.¹, Авсиевич А.В.^{2,*}, Авсиевич В.В.³, Иващенко А.В.⁴

¹ ORCID : 0000-0003-2128-0868;

² ORCID : 0000-0001-5778-3438;

³ ORCID : 0000-0002-4218-5176;

⁴ ORCID : 0000-0001-7766-3011;

^{1,2,3} Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация

^{2,4} Самарский государственный медицинский университет, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (avsievich[at]mail.ru)

Аннотация

Реализация стратегии научно-технологического развития ОАО «Российские железные дороги» является одним из приоритетных направлений научной деятельности, которое включает в себя развитие систем диагностики и мониторинга на базе современных информационно-измерительных и управляющих систем, задачу предоставления объективных данных о состоянии транспортной инфраструктуры. В данной работе рассматривается программный аппаратный комплекс, позволяющий в реальном времени получать объективные данные о состоянии участка железнодорожного пути в форме оценок его основных технических параметров путем прямого и косвенного измерения в реальном времени. Представленный программный комплекс предназначен для регистрации и обработки данных, полученных в результате измерений, проводимых в условиях непосредственного воздействия колесных пар подвижного состава на рельсовый путь в процессе движения. Данная система позволяет осуществлять объективный мониторинг влияния железнодорожного подвижного состава на состояние рельсового пути, что является критически важным для обеспечения безопасности и надежности железнодорожных перевозок. Таким образом, представленный программный комплекс является мощным инструментом для мониторинга и оценки состояния железнодорожного пути под воздействием подвижного состава, что способствует повышению эксплуатационной надежности и долговечности рельсовых конструкций.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, цифровой двойник, участок пути, объективные данные, цифровой след, путь.

"DIGITAL TWIN OF A RAILWAY SECTION" HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM

Research article

Avsievich N.A.¹, Avsievich A.V.^{2,*}, Avsievich V.V.³, Ivashchenko A.V.⁴

¹ ORCID : 0000-0003-2128-0868;

² ORCID : 0000-0001-5778-3438;

³ ORCID : 0000-0002-4218-5176;

⁴ ORCID : 0000-0001-7766-3011;

^{1,2,3} Volga State Transport University, Samara, Russian Federation

^{2,4} Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (avsievich[at]mail.ru)

Abstract

The implementation of the scientific and technological development strategy of "Russian Railways" JSC is one of the priority areas of scientific activity, which includes the development of diagnostic and monitoring systems based on modern information, measurement and control systems, and the task of providing objective data on the condition of the transport infrastructure. This work examines a software and hardware complex that enables the real-time acquisition of objective data on the condition of a section of railway track in the form of assessments of its key technical parameters through direct and indirect real-time measurement. The software complex presented is designed to record and process data obtained from measurements taken under conditions of direct impact by rolling stock wheel sets on the track during movement. This system enables objective monitoring of the impact of railway rolling stock on the condition of the track, which is critical for ensuring the safety and reliability of rail transport. Thus, the software package presented here is a powerful tool for monitoring and assessing the condition of the track under the influence of rolling stock, which contributes to improving the operational reliability and durability of rail structures.

Keywords: hardware and software system, digital twin, section of track, objective data, digital footprint, track.

Введение

В последние десятилетия в сфере информационно-вычислительных технологий наблюдается значительный интерес к разработке и применению цифровых двойников (Digital Twin) в различных отраслях науки и техники. Это выражается в существенном увеличении количества научных публикаций, докладов и дискуссий, посвященных данной тематике. В интернете по запросу "Digital Twin" можно найти миллионы статей, предлагающих различные определения и подходы к разработке цифровых двойников (ЦД).

Мировой опыт развития концепции «Цифровой двойник» и формирование самого термина до 2020 года подробно рассмотрены в работе [1], авторами которой являются А.Н. Прохоров и М.Н. Лысачев, опираясь на многолетний опыт в области информационных технологий.

В настоящее время, благодаря прогрессу в системах передачи и обработки данных, технологии цифровых двойников достигли четвертого этапа своего развития. Этот этап характеризуется интеграцией физического и цифрового двойников в единую систему, обеспечивающую непрерывный обмен информацией и обновление данных в реальном времени. Это стало возможным благодаря развитию информационно-коммуникационных технологий, интернета вещей, вычислительной техники и облачных сервисов [2].

В Российской Федерации на цифровые двойники был разработан и утвержден ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». Согласно данному стандарту, цифровым двойником изделия (ЦД) считается система, включающая цифровую модель изделия и двусторонние информационные связи с самим изделием или его составными частями (при наличии изделия).

Государственная политика в области развития информационных технологий в настоящее время является одной из наиболее благоприятных. В рамках этой политики реализуется множество государственных программ, направленных на развитие информационных систем, включая технологии цифровых двойников.

Согласно «Белой книге» (Стратегия научно-технологического развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года и далее до 2030 года), стоит задача развитие систем диагностики и мониторинга базе современных информационно-измерительных и управляющих систем, предоставляющих объективные данные о состоянии транспортной инфраструктуры. Они должны контролировать весь путь и предоставлять информацию для оценки текущего состояния конструкций.

В настоящее время активно изучаются технологии цифровых двойников и их применение для решения производственных задач на железнодорожном транспорте с целью выявления преимуществ от их внедрения и проблем, с которыми придется столкнуться в ходе этого процесса [3]. Основным из важных направлений развития цифровых двойников на железнодорожном транспорте является разработка методологии их применения и построения в железнодорожной отрасли как единой системы [4]. Также немаловажную роль в процессе создания цифровых двойников имеет разработка имитационных моделей технологических и технических процессов железнодорожной инфраструктуры [5]. Одним из важных вопросов для развития цифровых двойников на железнодорожной инфраструктуре является выбор или разработка платформы цифровых двойников [6]. Одной из таких платформ является Российская цифровая платформа CML-Bench [7], [8], [9], [10], разработанная СПбПУ Петра Великого и предназначенная для формирования единого информационного пространства работы инженеров-расчетчиков, проектных менеджеров, руководящего состава высокотехнологичных предприятий.

Также немаловажным фактором внедрения цифровых двойников на железнодорожной инфраструктуре является экономический фактор. Разработка и внедрение цифровых двойников является экономически целесообразным за счет повышения конкурентоспособности в железнодорожной области [11].

Движение поезда по железнодорожному пути вызывает его колебания с разной амплитудой и частотой в зависимости от веса вагонов, входящих в подвижной состав и скорости передвижения. Возникающие колебания при движении поезда влияют на состояние железнодорожного пути и сроки его эксплуатации, чем интенсивней колебания, тем быстрее сокращается срок его службы. Характеристики колебаний железнодорожного пути можно измерять с помощью датчиков ускорения (акселерометров) [12], [13]. Дальнейшая аналитическая обработка полученных данных дает возможность косвенными методами определять, прогиб рельса «скрытую просадки пути» [14], [15], динамически оценивать ширину железнодорожной колеи [16], оценивать подуклонку рельса и положение рельсовых нитей по уровню [17], при определенных условиях возможно оценка напряженно-деформированного состояния элементов железнодорожного пути [18], [19].

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного комплекса цифрового двойника участка железнодорожного пути.

Методы и принципы исследования

Используя полученный опыт оценки основных технических параметров железнодорожного пути в реальном времени возможно получить цифровой след воздействия подвижного состава на железнодорожный путь и на базе его создать, цифровой двойник участка железнодорожного пути в соответствии со структурной схемой (рис. 1).

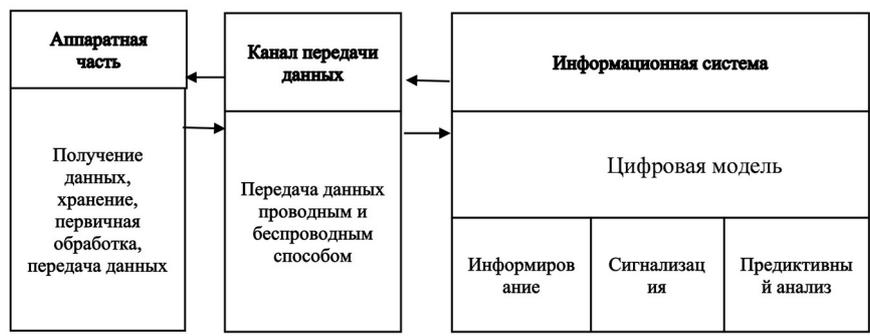


Рисунок 1 - Структурная схема информационного потока данных
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.1>

Принцип функционирования цифрового двойника участка железнодорожного пути основывается на сборе данных с различных систем и датчиков посредством проводных или беспроводных каналов передачи информации. Эти данные затем сохраняются и обрабатываются в специализированной информационной системе, предназначенной для мониторинга, сигнализации о возникающих инцидентах и проведения предиктивного анализа с целью выявления потенциальных поломок на ранних стадиях.

В контексте данной концепции, цифровой двойник участка железнодорожного пути представляет собой комплексную структуру, включающую следующие ключевые компоненты:

1. Физический актив — реальный участок железнодорожного пути, за которыми осуществляется мониторинг и управление.
2. Система сбора данных и интеграции — выполняет функцию агрегации информации, поступающей от датчиков, установленных на рельсах железнодорожного пути, и обеспечивает её передачу в информационную систему для хранения для последующей обработки и в цифровую модель.
3. Цифровая модель — представляет собой виртуальное отображение физического актива, включающее в себя поведенческие алгоритмы и логику функционирования системы.
4. Модуль обратной связи — осуществляет анализ полученных данных и формирует рекомендации для системы автоматизированного или автоматического управления объектом.

Таким образом, цифровой двойник участка железнодорожного пути является интегрированной системой, обеспечивающей высокую степень контроля и управления за состоянием инфраструктуры, что способствует повышению её надёжности и эффективности эксплуатации.

Исходя из представленной концепции информационная система цифрового двойника участка железнодорожного пути имеет следующую общую схему программно-аппаратного комплекса контроля участка железнодорожного пути (рис. 1), состоящую из аппаратного комплекса с датчиками и программного обеспечения, связанного между собой системой передачи данных. Пример работы аппаратного комплекса приведены в работах [13], [14], [18].

Программно-аппаратный комплекс контроля (ПАК), представляет собой интегрированную систему, состоящую из нескольких взаимосвязанных подсистем: датчиков (8 единиц), подсистемы сбора данных, подсистемы обработки информации и подсистемы визуализации результатов в ГИС-формате с возможностью создания цифрового двойника участка пути.

На рисунке 2 представлена укрупненная схема архитектуры ПАК который состоит из двух основных компонентов: датчиков с измерительными элементами и локальным хранилищем для сбора данных при проходе состава, а также программного комплекса, где передача информации осуществляется по беспроводной технологии Wi-Fi, обеспечивающей надёжную связь на увеличенных расстояниях как между датчиками, так и до сервера с программным обеспечением без потери данных.

Программное обеспечение построено по модульному принципу с разделением на функциональные подсистемы, что позволяет независимо масштабировать систему как по вертикали (добавляя новые уровни обработки данных), так и по горизонтали (подключая дополнительные модули анализа), обеспечивая тем самым возможность интеграции нового оборудования для снятия показателей и расширения аналитических возможностей комплекса за счет внедрения современных методик обработки информации.

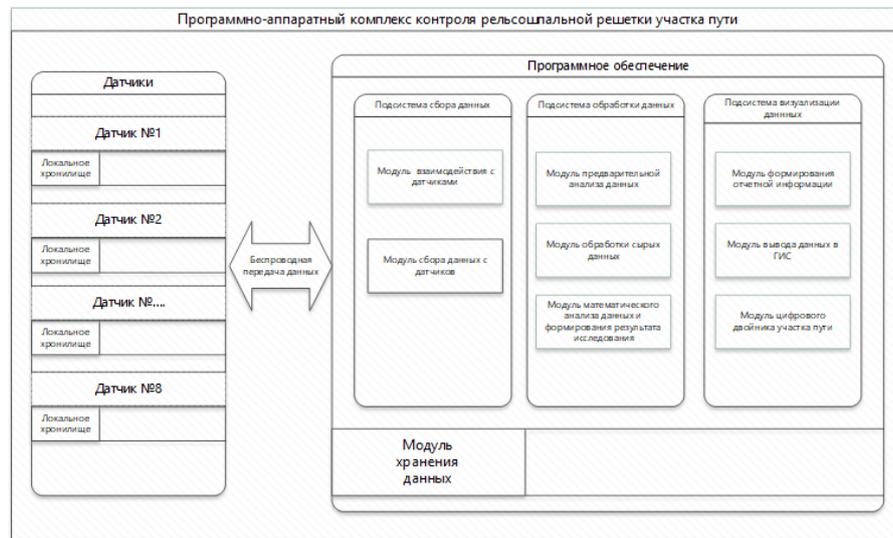


Рисунок 2 - Общая схема программно-аппаратного комплекса контроля участка железнодорожного пути
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.2>

На рисунке 3 представлена функциональная схема последовательности процесса получения и анализа измерительных данных по участку пути, где после предварительной настройки и всестороннего тестирования оборудования и программного обеспечения осуществляется управление датчиками и получение данных через общую шину данных, после чего запускается последовательный процесс обработки, включающий комплексный первичный анализ информации с проверкой на выбросы и частотные характеристики, детальный анализ данных по утверждённым методикам, построение информативных графиков и подробных таблиц, многомерную визуализацию в ГИС-системе, интеграцию данных в модуль цифрового двойника с последующей 3D-визуализацией в виртуальном пространстве, формирование структурированного отчёта в утверждённой форме и финальную передачу данных в сервисный отдел, причём каждый этап предусматривает многоуровневую проверку на наличие ошибок и предоставляет возможность оперативного возврата для корректировки параметров и результатов.



Рисунок 3 - Общая функциональная блок-схема программно-аппаратного комплекса контроля участка железнодорожного пути
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.3>

В процессе проектирования программно-аппаратного комплекса в него заложена масштабируемость путем установки и интегрирования на железнодорожный участок нескольких АПК, для увеличения длины контролируемого участка.

Основные результаты

Результатом работы является программно-аппаратный комплекс, состоящий из аппаратной части, непосредственно устанавливаемой на железнодорожный путь, и информационной системы, которая предназначена для управления аппаратным комплексом, хранения, обработки, графического представления, цифровой модели и формирования рекомендаций.

Аппаратный комплекс представляет собой систему с датчиками, устанавливаемыми на рельс (рис. 4), и системой передачи данных в информационную систему проводным и беспроводным способом и исполнен в нескольких вариантах [18], [21]. Аппаратный комплекс формирует для цифрового двойника в совместной работе с модулем сбора данных цифровой след и передает его в модуль хранения данных после каждого прохода поезда.

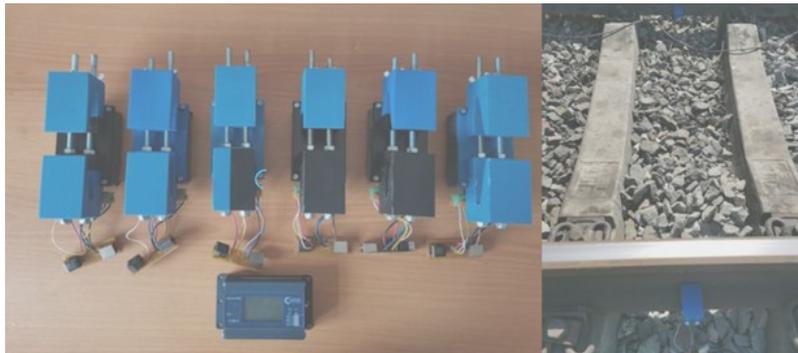


Рисунок 4 - Аппаратный комплекс на базе акселерометров АЦ-90
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.4>

Информационная система реализована в соответствии с программной частью, приведенной на рисунке 2 и состоит из разных модулей.

Модуль цифрового двойника участка железнодорожного пути в себя включает паспорт и 3D-модель участка железнодорожного пути.

Основное окно информационной системы участка пути с предустановленными датчиками ПАК включает в себя разделы тестирования датчиков, статистического учета количества поездов и времени сбора данных, обработки и визуализации данных и кнопок управления. В свою очередь вкладка «Паспорт участка» содержит информацию о месте установки модуля датчика в формате пикет-километр (также возможно указание точных географических координат), статические характеристики участка пути, такие как ширина колеи, четность и нечетность пути, уровень, угол в плане, дата проведения испытаний (рис. 5).

Комплекс контроля железнодорожного пути

Файл Настройки Помощь

Характеристики проекта
 Название проекта: Полигон от 111 км до 1114 км
 км КЖД
 Координаты полигона: 53.223820, 50.296062
 Дата создания проекта: 21.06.2025 год

Подключенные датчики

| Номер | Координаты | Статус | Тест |
|-------|------------------|-----------|------------|
| 1 | 55.7558, 37.6173 | Активен | Пройден |
| 2 | 55.7522, 37.6186 | Неактивен | Пройден |
| 3 | 55.7497, 37.6176 | Активен | Пройден |
| 4 | 55.7512, 37.6194 | Ошибки | Не пройден |
| 5 | 55.7512, 37.6194 | Ошибки | Не пройден |
| 6 | 55.7512, 37.6194 | Ошибки | Не пройден |
| 7 | 55.7512, 37.6194 | Ошибки | Не пройден |
| 8 | 55.7512, 37.6194 | Ошибки | Не пройден |

Информация о сборе данных
Общее время сбора данных
00:12:32
 Количество пройденных поездов: 9
 Наименование последнего поезда: Грузовой
 45 2 секционный
 Текущий статус сбора данных: Завершен

Управление сбором данных

Паспорт участка | **Нормализация данных** | Графическое отображение данных | GIS | Цифровой двойник в 3D

Данные об участке пути

Наименование проекта: Полигон от 111 км до 1114 км КЖД

Координаты полигона:
 Широта: 53.223820 Долгота: 50.296062

Дата проекта: 21.06.2025

Параметры участка пути
 Угол в плане (мм): 12
 Ширина колеи (мм): 1523
 Уровень (мм): 5
 Четность/нечетность: Четный

Сохранить | Получить данные | Отмена

Данные с датчиков

| № датчика | № рельса | Время | Температура | AccelerationX(m/s ²) | AccelerationY(m/s ²) | AccelerationZ(m/s ²) | Angle(X)° | A |
|-----------|----------|------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|---|
| 3 | 1 | 10/28/2025 10:14:38 PM | 0.770861050472996 | -0.270126964324213 | -0.0135117510862238 | 0.4123989717402025 | 6 | € |
| 2 | 1 | 10/28/2025 10:15:38 PM | 11.0475642471796 | 0.21294651286271 | -0.257713334987738 | -0.0861816239617202 | 6 | € |
| 5 | 1 | 10/28/2025 10:16:38 PM | 2.32789764289181 | -0.274285957577772 | 0.403057940724799 | -0.400591602968328 | 4 | € |
| 6 | 1 | 10/28/2025 10:17:38 PM | 10.6641446569302 | 0.040696192784559 | 0.437907110405111 | -0.468932845149624 | 1 | € |
| 2 | 1 | 10/28/2025 10:18:38 PM | 6.08666185573054 | 0.152860625995102 | -0.426652813296138 | 0.238093396061144 | 6 | € |
| 3 | 1 | 10/28/2025 10:19:38 PM | 19.510257160063 | -0.13973662105377 | 0.237611605197942 | 0.032976528110903 | 8 | € |
| 3 | 1 | 10/28/2025 10:20:38 PM | 12.8989906203463 | 0.439134655491977 | 0.384642887806819 | 0.203965681637016 | 1 | € |
| 5 | 1 | 10/28/2025 10:21:38 PM | 1.89948619431792 | 0.0213110575086023 | 0.114439526399283 | 0.43652802425075 | 6 | € |
| 2 | 1 | 10/28/2025 10:22:38 PM | 5.0919239153497 | -0.121698513916553 | 0.0757902523389972 | -0.0642856641506244 | 8 | € |
| 7 | 1 | 10/28/2025 10:23:38 PM | 12.6474263577943 | 0.499230704735606 | 0.248867701156469 | 0.252118981793578 | 9 | € |

Сбор данных | Пауза | Завершить

Рисунок 5 - Форма паспорта участка железнодорожного пути
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.5>

В информационной системе имеется возможность проведения нормализации данных, вывода графического отображения выбранных данных технических характеристик железнодорожного пути, расположения комплекса на географических картах во вкладке GIS, а также вкладка просмотра поведения участка железнодорожного пути в формате 3D (цифровой двойник).

Цифровой двойник участка пути реализован в виде 3D-модели участка железнодорожного пути и представляет проигрыватель файлов с данными с визуальной демонстрацией происходящих процессов в выбранном ракурсе динамического изменения технических параметров участка железнодорожного пути под воздействием колесных пар при прохождении подвижного состава по участку пути (рис. 6). Проигрыватель позволяет загружать выбранный файл из базы данных, запускать просмотр, останавливать, перематывать и менять ракурс просмотра. Параллельно просмотру справа от визуальной части расположено окно с демонстрацией количественных значений технических параметров участка пути.

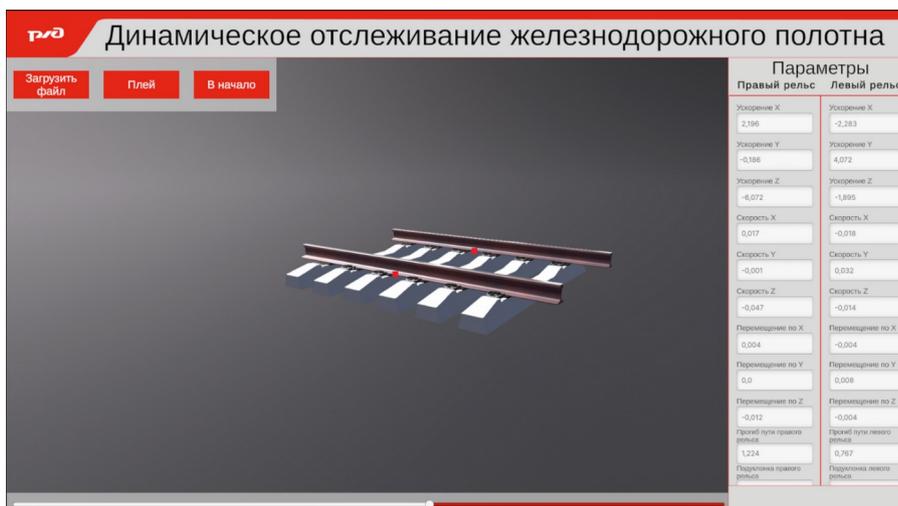


Рисунок 6 - 3D-модель участка железнодорожного пути
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.6>

Обсуждение

Разработанный программно-аппаратный комплекс представляет собой инновационное решение для проведения непрерывного мониторинга технических параметров на потенциально опасных участках железнодорожного пути в условиях эксплуатации подвижного состава. Это позволяет осуществлять детальный анализ воздействия железнодорожного транспорта на конкретные сегменты инфраструктуры и своевременно выявлять критические отклонения параметров от нормативных значений, обусловленные эксплуатационными факторами.



В отличие от существующих систем контроля, предложенный комплекс характеризуется высокой степенью автоматизации и оперативности сбора данных о воздействии каждого проходящего поезда на состояние рельсового полотна. Это обеспечивает более точную и актуальную оценку текущего состояния железнодорожного пути, что является критически важным для обеспечения безопасности движения и предотвращения аварийных ситуаций.

Таким образом, внедрение данного программно-аппаратного комплекса позволяет существенно повысить уровень мониторинга и диагностики технических параметров железнодорожного пути, что способствует оптимизации эксплуатационных процессов и обеспечению стабильного функционирования железнодорожной инфраструктуры.

Заключение

Предложенный в работе программно-аппаратный комплекс цифрового двойника участка железнодорожного пути представляет собой уникальное программное обеспечение, предназначенное для контроля состояния участка железнодорожного пути с демонстрацией оценок его основных технических параметров, таких как ширина колеи, подуклонка рельсовых нитей, температура, просадка пути, потайная просадка и т.д. 3D-модель участка железнодорожного пути дает возможность визуально наблюдать деформацию рельсового пути при воздействии на путь колесных пар подвижного состава при прохождении по участку пути с установленными датчиками. Внедрение цифрового двойника железнодорожного участка представляет собой инновационный подход к моделированию и оптимизации инфраструктуры, позволяющий проводить углубленный анализ и модификацию эксплуатационных характеристик конкретного участка. Этот метод открывает перспективы для масштабирования полученных данных и моделей на всю железнодорожную сеть, а также способствует переходу к прогностическому управлению содержанием пути. Новизна проведенного исследования заключается в разработке и обосновании принципиально нового подхода к мониторингу и управлению состоянием железнодорожной инфраструктуры посредством создания программно-аппаратного комплекса цифрового двойника участка железнодорожного пути и является пионерской разработкой в данном направлении.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственной научно-исследовательской работы Приволжского государственного университета путей сообщения «Разработка цифрового двойника участка рельсошпальной решетки железнодорожного пути» (PNML-2025-0002). Регистрационный номер: 125031703829-7 от 17 марта 2025 г.

Благодарности

Авторы благодарны Приволжскому государственному университету путей сообщения.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.7>

Funding

The work was carried out as part of a state-funded research project at the Volga State University of Transport "Development of a digital twin of a railway track sleeper grid section" (PNML-2025-0002). Registration number: 125031703829-7 dated 17 March 2025.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the Volga State Transport University.

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.28.7>

Список литературы / References

1. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. — Издание первое, исправленное и дополненное. — Москва : ООО «АльянсПринт», 2020. — 401 с.
2. Digital Twin meets IoT // VirtusLab.com. — URL: <https://virtuslab.com/blog/business-insights/digital-twin-meets-iot/> (accessed: 12.12.2025).
3. Никонова Я.И. Цифровые двойники на железнодорожном транспорте: преимущества и проблемы внедрения / Я.И. Никонова // Муниципальная академия. — 2024. — № 1. — С. 124–133. — DOI: 10.52176/2304831X_2024_01_124.
4. Шевченко Д.В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д.В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2021. — Т. 80. — № 2. — С. 91–99. — DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.
5. Рахмангулов А.Н. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А.Н. Рахмангулов, С.Н. Корнилов, П.Н. Мишкурин [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 3 (55). — С. 43–59. — DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.
6. Розенберг И.Н. Разработка платформы цифровых двойников инфраструктурных объектов / И.Н. Розенберг, А.Н. Шабельников, И.А. Ольгейзер // Железнодорожный транспорт. — 2019. — № 9. — С. 26–29.
7. Боровков А. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 1) / А. Боровков, В. Бураков, Е. Мартынец [и др.] // САПР и графика. — 2023. — № 8 (324). — С. 42–51. — EDN ATADHS.
8. Боровков А. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 2) / А. Боровков, В. Бураков // САПР и графика. — 2023. — № 9 (325). — С. 54–64.



9. Боровков А. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 3) / А. Боровков, И. Мартынов, И. Шандер [и др.] // САПР и графика. — 2023. — № 10 (326). — С. 50–62.
10. Боровков А. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench® (часть 4) / А. Боровков, Н. Ефимовсойни, Е. Мартынец [и др.] // САПР и графика. — 2024. — № 5 (333). — С. 4–13.
11. Ходоскина О.А. Применение элементов «цифрового двойника» как фактор повышения конкурентоспособности транспортной услуги / О.А. Ходоскина, А.В. Черневская // Рынок транспортных услуг (проблемы повышения эффективности). — 2022. — № 1 (15). — С. 227–233.
12. Фатеев В.А. Устройство измерения ускорения с удалённой системой передачи данных / В.А. Фатеев, А.В. Авсиевич, С.А. Фроленков // Вестник СамГУПС. — 2023. — № 3 (61). — С. 90–97.
13. Avsievich V.V. Data Measurement System for Track Panel Vibrations / V.V. Avsievich, N.V. Chertykovtseva, N.A. Avsievich // AIP Conference Proceedings : International Scientific Conference “International Transport Scientific Innovation” ITSI-2021. Vol. 2476. — Moscow : AIP Publishing, 2023. — P. 030034. — DOI: 10.1063/5.0104755.
14. Avsievich A. Comparative Analysis of Railway Track Depression Estimation Methods / A. Avsievich, V. Avsievich, A. Ivaschenko // Transportation Research Procedia : collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. — Krasnoyarsk : Elsevier B.V., 2023. — P. 447–452. — DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.060.
15. Авсиевич А.В. О возможности стационарных систем измерения просадки железнодорожного пути / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич, Н.А. Авсиевич // Вестник СамГУПС. — 2021. — № 4 (54). — С. 68–74.
16. Авсиевич А.В. Мониторинг ширины железнодорожной колеи с помощью стационарных сенсоров / А.В. Авсиевич, Д.В. Овчинников, Н.А. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья. — 2024. — № 3 (105). — С. 47–56.
17. Авсиевич А.В. Имитационная модель непрерывного контроля параметров рельсовой колеи / А.В. Авсиевич, Н.А. Авсиевич // Трансформация транспорта и образования : труды Всероссийской научно-практической конференции КРИЖТ ИрГУПС, посвященной 130-летию транспортного образования в Сибири. — Красноярск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2024. — С. 11–16.
18. Avsievich A. Railway track stress-strain analysis using high-precision accelerometers / A. Avsievich, V. Avsievich, N. Avsievich [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). — 2021. — Vol. 11. — № 24. — DOI: 10.3390/app112411908.
19. Авсиевич А.В. Определение напряженно-деформированного состояния элементов железнодорожного пути на основе измерения ускорений и математического моделирования / А.В. Авсиевич, Д.В. Овчинников // Вестник транспорта Поволжья. — 2022. — № 1 (91). — С. 34–42.
20. Куприяновский В.П. Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники / В.П. Куприяновский, В.В. Аленков, А.А. Климов [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2017. — Т. 13. — № 3. — С. 129–166. — DOI: 10.25559/SITITO.2017.3.546.
21. Авсиевич Н.А. Измерительный комплекс регистрации и первичной обработки ускорений / Н.А. Авсиевич // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте : материалы III Всероссийской научно-практической конференции. — Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2021. — С. 16–19.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Prokhorov A. Cifrovoy dvojniki. Analiz, trendy, mirovoj opyt [Digital Twin. Analysis, Trends, World Experience] / A. Prokhorov, M. Lysachev. — First edition, revised and supplemented. — Moscow : AlliancePrint LLC, 2020. — 401 p. [in Russian]
2. Digital Twin meets IoT // VirtusLab.com. — URL: <https://virtuslab.com/blog/business-insights/digital-twin-meets-iot/> (accessed: 12.12.2025).
3. Nikonova Ya.I. Cifrovye dvojniki na zheleznodorozhnom transporte: preimushchestva i problemy vnedreniya [Digital twins in railway transport: advantages and problems of implementation] / Ya.I. Nikonova // Municipal'naya akademiya [Municipal Academy]. — 2024. — № 1. — P. 124–133. — DOI: 10.52176/2304831X_2024_01_124. [in Russian]
4. Shevchenko D.V. Metodologiya postroeniya cifrovyykh dvojniki na zheleznodorozhnom transporte [Methodology for building digital twins in railway transport] / D.V. Shevchenko // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Railway Research Institute]. — 2021. — Vol. 80. — № 2. — P. 91–99. — DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99. [in Russian]
5. Rakhmanqulov A.N. Imitacionnye modeli v cifrovyykh dvojnikiakh zheleznodorozhnykh uzlov [Simulation models in digital twins of railway junctions] / A.N. Rakhmanqulov, S.N. Kornilov, P.N. Mishkurov [et al.] // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport]. — 2022. — № 3 (55). — P. 43–59. — DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59. [in Russian]
6. Rozenberg I.N. Razrabotka platformy cifrovyykh dvojniki infrastrukturykh ob"ektov [Development of a digital twin platform for infrastructure facilities] / I.N. Rozenberg, A.N. Shabelnikov, I.A. Olgeyzer // Zheleznodorozhnyj transport [Railway Transport]. — 2019. — № 9. — P. 26–29. [in Russian]
7. Borovkov A. Cifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu cifrovyykh dvojniki (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 1) [Digital platform for the development and application of digital twins CML-Bench® (part 1)] / A. Borovkov, V. Burakov, E. Martynets [et al.] // SAPR i grafika [CAD and Graphics]. — 2023. — № 8 (324). — P. 42–51. — EDN ATADHS. [in Russian]



8. Borovkov A. Cifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu cifrovyykh dvojniov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 2) [Digital platform for the development and application of digital twins CML-Bench® (part 2)] / A. Borovkov, V. Burakov // SAPR i grafika [CAD and Graphics]. — 2023. — № 9 (325). — P. 54–64. [in Russian]
9. Borovkov A. Cifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu cifrovyykh dvojniov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 3) [Digital platform for the development and application of digital twins CML-Bench® (part 3)] / A. Borovkov, I. Martynov, I. Shander [et al.] // SAPR i grafika [CAD and Graphics]. — 2023. — № 10 (326). — P. 50–62. [in Russian]
10. Borovkov A. Cifrovaya platforma po razrabotke i primeneniyu cifrovyykh dvojniov (Digital Twins) CML-Bench® (chast' 4) [Digital platform for the development and application of digital twins CML-Bench® (part 4)] / A. Borovkov, N. Efimovsoyni, E. Martynets [et al.] // SAPR i grafika [CAD and Graphics]. — 2024. — № 5 (333). — P. 4–13. [in Russian]
11. Khodoskina O.A. Primenenie ehlementov "cifrovogo dvojniov" kak faktor povysheniya konkurentosposobnosti transportnoj usluzi [Application of elements of the "digital twin" as a factor in increasing the competitiveness of transport services] / O.A. Khodoskina, A.V. Chernevskaya // Rynok transportnykh uslug (problemy povysheniya ehffektivnosti) [Market of transport services (problems of increasing efficiency)]. — 2022. — № 1 (15). — P. 227–233. [in Russian]
12. Fateev V.A. Ustrojstvo izmereniya uskoreniya s udalynnoj sistemoy peredachi dannykh [Acceleration measuring device with a remote data transmission system] / V.A. Fateev, A.V. Avsievich, S.A. Frolenkov // Vestnik SamGUPS [Bulletin of Samara State Transport University]. — 2023. — № 3 (61). — P. 90–97. [in Russian]
13. Avsievich V.V. Data Measurement System for Track Panel Vibrations / V.V. Avsievich, N.V. Chertykovtseva, N.A. Avsievich // AIP Conference Proceedings : International Scientific Conference "International Transport Scientific Innovation" ITSI-2021. Vol. 2476. — Moscow : AIP Publishing, 2023. — P. 030034. — DOI: 10.1063/5.0104755.
14. Avsievich A. Comparative Analysis of Railway Track Depression Estimation Methods / A. Avsievich, V. Avsievich, A. Ivaschenko // Transportation Research Procedia : collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. — Krasnoyarsk : Elsevier B.V., 2023. — P. 447–452. — DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.060.
15. Avsievich A.V. O vozmozhnosti stacionarnyykh sistem izmereniya prosadki zheleznodorozhnogo puti [On the possibility of stationary systems for measuring railway track subsidence] / A.V. Avsievich, V.V. Avsievich, N.A. Avsievich // Vestnik SamGUPS [Bulletin of Samara State Transport University]. — 2021. — № 4 (54). — P. 68–74. [in Russian]
16. Avsievich A.V. Monitoring shiriny zheleznodorozhnoj kolei s pomoshch'yu stacionarnyykh sensorov [Monitoring of railway track width using stationary sensors] / A.V. Avsievich, D.V. Ovchinnikov, N.A. Avsievich // Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of Transport of the Volga Region]. — 2024. — № 3 (105). — P. 47–56. [in Russian]
17. Avsievich A.V. Imitacionnaya model' nepreryvnogo kontrolya parametrov rel'sovoj kolei [Simulation model for continuous monitoring of track gauge parameters] / A.V. Avsievich, N.A. Avsievich // Transformatsiya transporta i obrazovaniya [Transformation of Transport and Education] : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of the Krasnoyarsk Railway Transport Institute — Irkutsk State Transport University, dedicated to the 130th anniversary of transport education in Siberia. — Krasnoyarsk : Irkutsk State Transport University, 2024. — P. 11–16. [in Russian]
18. Avsievich A. Railway track stress–strain analysis using high-precision accelerometers / A. Avsievich, V. Avsievich, N. Avsievich [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). — 2021. — Vol. 11. — № 24. — DOI: 10.3390/app112411908.
19. Avsievich A.V. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ehlementov zheleznodorozhnogo puti na osnove izmereniya uskorenij i matematicheskogo modelirovaniya [Determination of the stress-strain state of railway track elements based on acceleration measurements and mathematical modeling] / A.V. Avsievich, D.V. Ovchinnikov // Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of Transport of the Volga Region]. — 2022. — № 1 (91). — P. 34–42. [in Russian]
20. Kupriyanovsky V.P. Cifrovaya zheleznaya doroga – ERTMS, BIM, GIS, PLM i cifrovye dvojniov [Digital Railway – ERTMS, BIM, GIS, PLM and Digital Twins] / V.P. Kupriyanovsky, V.V. Alenkov, A.A. Klimov [et al.] // Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern Information Technologies and IT-Education]. — 2017. — Vol. 13. — № 3. — P. 129–166. — DOI: 10.25559/SITITO.2017.3.546. [in Russian]
21. Avsievich N.A. Izmeritel'nyj kompleks registratsii i pervichnoj obrabotki uskorenij [Measuring complex for recording and primary processing of accelerations] / N.A. Avsievich // Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie na transporte [Mechatronics, Automation and Control in Transport] : proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference. — Samara : Samara State Transport University, 2021. — P. 16–19. [in Russian]