

Д. А. Пятков

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПОДСИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КАК ШАГ К ЦИФРОВОМУ ДВОЙНИКУ (СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЕ) ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Аннотация. Проанализирован железнодорожный путь как сложная техническая система, управление которой базируется на регламентных подходах, ограничивающих предиктивный контроль критических участков. Применен комплекс методов системного анализа: структурная декомпозиция, функционально-структурный анализ, классификация и многокритериальный анализ. Выявлены иерархические взаимосвязи элементов верхнего и нижнего строения, установлен каскадный характер деградации, где неисправность нижележащего элемента выступает первичным фактором разрушения вышележащих. Обосновано разделение компонентов на критические (обеспечивающие мгновенную безопасность) и фундаментальные (определяющие долгосрочную устойчивость). Предложена многоуровневая модель жизненного цикла, устанавливающая дискретную шкалу состояний, коррелирующую с вероятностью отказа. Разработана концепция гибридного цифрового двойника, интегрирующего стационарные сенсорные сети и данные подвижных диагностических комплексов.

Ключевые слова: цифровой двойник, железнодорожный путь, системный анализ, оптимизация процессов диагностики, железнодорожный транспорт, методы системного анализа.

Для цитирования: Пятков, Д. А. Системный анализ подсистемы железнодорожной инфраструктуры как шаг к цифровому двойнику (стационарной системе) железнодорожного пути / Д. А. Пятков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 61–72. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_61.

Введение

Железнодорожный транспорт обеспечивает стратегическую мобильность и национальную безопасность РФ. В условиях роста грузонапряженности и скоростей на Восточном полигоне вопросы бесперебойности перевозок выходят на первый план [1]. Ключевой элемент – состояние путевого хозяйства, обслуживание которого базируется на регламентах и визуальном контроле, что не позволяет прогнозировать критические дефекты. На участках с многолетнемёрзлыми грунтами циклы оттаивания-промерзания инициируют неравномерные осадки и сплывы земляного полотна, формируя зоны перманентного риска [2].

Индустрия 4.0 предлагает управление активами на основе данных. Перспективный инструмент «цифровой двойник» (ЦД) – виртуальная динамическая модель, синхронизированная с объектом [3–8]. Однако ЦД на основе только подвижных средств имеет ограничения: дискретность измерений и невозможность контроля стационарных объектов (деформаций земляного полотна, смещений опор). Актуальна разработка стационарной системы ЦД для локальных критических участков.

Цель – системный анализ железнодорожного пути для построения стационарного ЦД, обеспечивающего непрерывный мониторинг и предиктивное управление.

Научная новизна – системно-ориентированная методология перехода к стационарному ЦД с многоуровневой моделью жизненного цикла, увязанной с нормативами.

Практическая значимость – структурированные требования к распределённым системам мониторинга для пилотных зон на БАМе и Транссибе.

Системный анализ конструкции железнодорожного пути

Железнодорожный путь – интегрированная система взаимосвязанных подсистем верхнего и нижнего строения. Схема связей представлена на рис. 1.

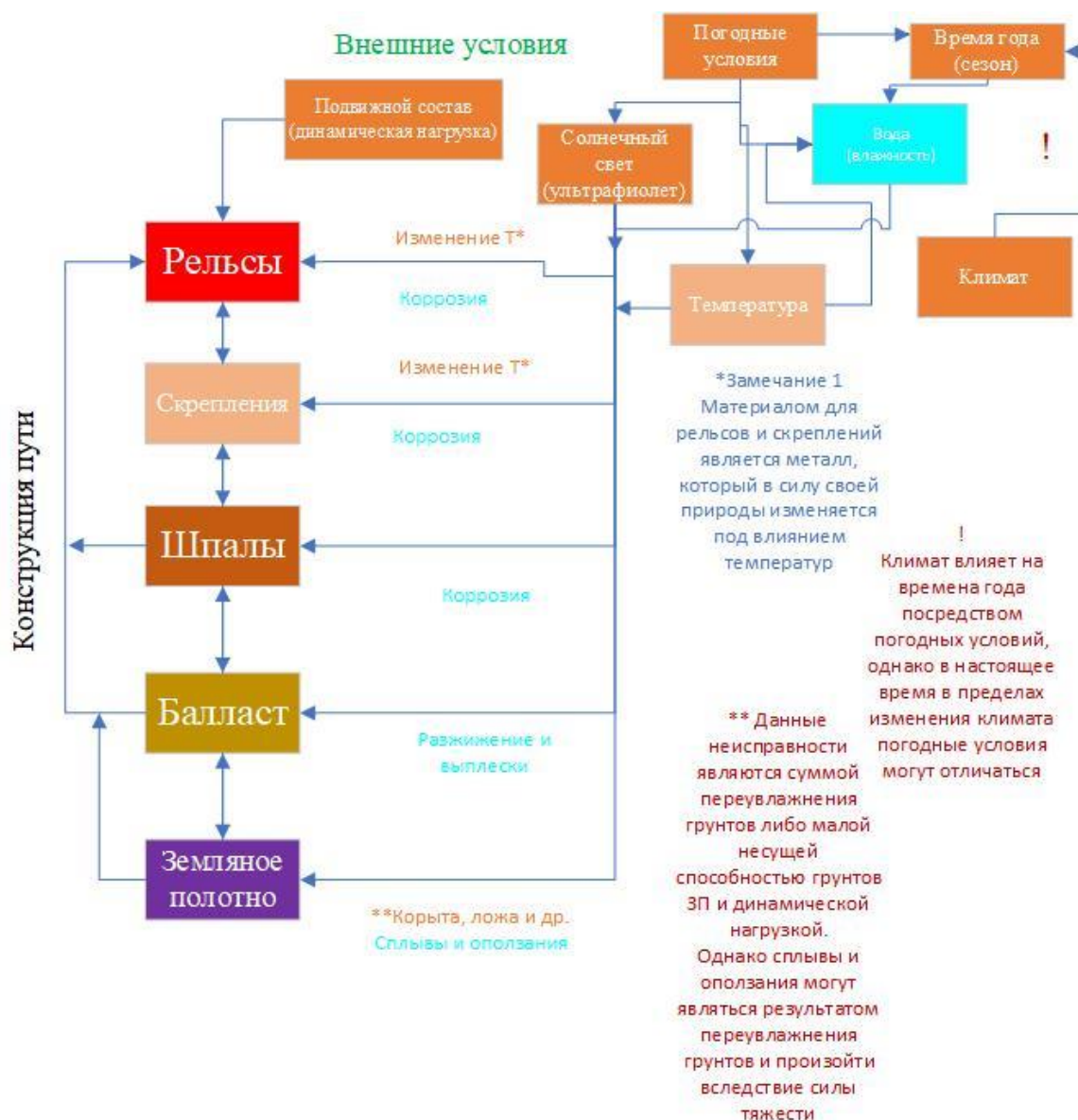


Рис. 1. Взаимосвязи элементов конструкции железнодорожного пути

Рельсы воспринимают нагрузку от колёс, направляют движение. Дефекты вызывают ударные нагрузки, разрушающие нижележащие элементы. Скрепления обеспечивают соединение рельсов со шпалами и ширину колеи. Шпалы передают нагрузку на балласт [9]. Балластная призма распределяет нагрузку, отводит воду. Земляное полотно – фундамент пути; его деформации вызывают системные нарушения всей конструкции.

Основополагающая закономерность: неисправность нижележащего элемента – первичный фактор, ускоряющий неисправности вышележащих. Деградация земляного полотна носит каскадный характер. Системный анализ элементов представлен в табл. 1.

Выявленные системные зависимости включают каскадный эффект – проблема в одной подсистеме вызывает ускоренную деградацию других. Пример: загрязнение балласта → ухудшение дренажа → накопление воды → просадка или пучина → нарушение геометрии → повышенная динамическая нагрузка → ускоренный износ рельсов, креплений и шпал. Также выделяется проблема «невидимых» дефектов (скрытые дефекты в рельсах, коррозия опор), не проявляющихся визуально до перехода в критическую стадию, и временное воздействие – между причиной и следствием может проходить значительное время. Эффективный ЦД должен объединять геометрические, дефектоскопические, динамические данные, данные о состоянии грунта и гидрометеорологию.

Таблица 1

**Системный анализ конструкции железнодорожного пути:
проблемы, риски, данные, мероприятия и факторы**

Подсистема / элемент	Ключевые проблемы	Последствия/ риски	Необходимые данные для мониторинга и ЦД	Мероприятия ликвидации	Факторы влияния на элемент (подсистему)
1	2	3	4	5	6
<i>Верхнее строение пути</i>					
Рельсы	1 Усталостные дефекты: головки, болтовые отверстия, подшвы. 2 Износ: вертикальный, боковой. 3 Дефекты поверхности: износ, выкрашивание, коррозия. 4 Нарушения целостности: поперечные и продольные трещины	Снижение прочности, риск излома рельса, ухудшение плавности хода, повышенные динамические нагрузки, шум	Геометрия пути: профиль головки, ширина колеи, уровень, возвышение и понижение рельсов и пути. Дефектоскопия: данные ультразвукового контроля (УЗК). Динамика: ускорения, силы взаимодействия с колесом	Дефект – замена, шлифовка рельса; при нарушении геометрии: устранение путем замеров, геометрии рельсового пути	Динамическая нагрузка, состояние земляного полотна (ЗП) и балласта (пучины, просадки; загрязненность (разжижение и выплески))
Рельсовые скрепления	1 Ослабление затяжки: болтов, клемм. 2 Поломка элементов: пружинных зажимов и других элементов скрепления. 3 Коррозия. 4 Потеря упругих свойств	Нарушение электрической изоляции, повышенная вибрация, нарушение геометрии пути	Визуальные данные: фото/видеофиксация. Момент затяжки: данные с динамометрических ключей. Электрические параметры: сопротивление изоляции	При слабом креплении – затяжка до нормативных значений; при неисправности компонентов – замена	Динамическая нагрузка Состояние геометрии пути Состояния ЗП и балласта (пучины, просадки; загрязненность (разжижение и выплески))
Шпалы (деревянные, железобетонные)	1 Механический износ: подрельсовые площадки, трещины. 2 Гниение (дерево), коррозия арматуры (ж/б). 3 Потеря поперечной устойчивости. 4 Неравномерное опирание на балласт	Нарушение положения рельсовой нити, неравномерное распределение нагрузок на балласт, ускоренное расстройство пути	Визуальные данные: фото/видеофиксация. Геометрия: положение в плане и по высоте	Замена	Динамическая нагрузка Состояние геометрии пути Состояния ЗП и балласта (пучины, просадки; загрязненность (разжижение и выплески))
Балластная призма	1 Загрязнение: пыление, заиливание. 2 Потеря дренирующих свойств (как следствие 1-й проблемы, см. выше). 3 Выпучивание и просадки. 4 Образование пустот под шпалами	Снижение устойчивости пути, застой воды, ускоренное накопление остаточных деформаций, неравномерная жесткость пути	Геометрия: ровность пути, продольный профиль. Жесткость: динамические отклики на нагрузку. Визуальный анализ: загрязненность	При загрязнении: «грохотка», либо досыпка нового балласта, как правило, данные мероприятия носят сопряженный характер	Динамическая нагрузка Состояния верхних элементов пути и ЗП Содержание воды (природные осадки, состояния водопропускных и водоотводящих сооружений)
<i>Нижнее строение пути</i>					
Земляное полотно	1 Просадки и неравномерные осадки. 2 Разжижение грунтов. 3 Сплывы и оползни откосов. 4 Морозное пучение	Потеря несущей способности, деформации верхнего строения пути, катастрофические нарушения геометрии пути	Данные вертикальных и горизонтальных смещений. Гидрология: уровень грунтовых вод	Укрепление откосов путем возведения дополнительных насыпей, георешетка, бетонные конструкции	Геология грунтов и вода Динамическая нагрузка

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
Мосты	1 Деформации пролетных строений: прогиб. 2 Износ опорных частей. 3 Трещины в элементах. 4 Коррозия арматуры и металлоконструкций. 5 Скалывание опор (размыв)	Снижение несущей способности, риск обрушения	Геометрия (прогибы). Динамика: частоты и амплитуды колебаний. Трещины: датчики раскрытия трещин. Коррозия элементов. Смещение опор	Замена элементов, ремонт	Вода и геология грунтов, климатические условия. Динамическая нагрузка
Тоннели	1 Деформации обделки: сжимимость, выпучивание. 2 Нарушение гидроизоляции, протечки. 3 Трещины в бетоне. 4 Осадки поверхности над тоннелем	Ухудшение состояния конструкции, обрушение обделки, затопление, нарушение габарита	Геометрия (контур обделки). Смещения элементов. Гидрология: датчики протечек, влажности. Вибрация от движения поездов. Осадки: нивелирование поверхности	Замена элементов, ремонт	Вода и геология грунтов, климатические условия. Динамическая нагрузка
Водопроточные трубы	1 Засорение и заиливание. 2 Деформации и разрушения звеньев. 3 Размыв входного/выходного оголовков. 4 Просадки грунта над трубой (ложный путь)	Подтопление земляного полотна, размыв насыпи, провал пути	Визуальный мониторинг. Геометрия: просадки пути над трубой. Гидрология: уровень воды на входе/выходе. Целостность: данные внутреннего осмотра	Замена элементов, ремонт	Вода и геология грунтов, климатические условия. Динамическая нагрузка
Водоотводные сооружения (дренажи, канавы)	1 Засорение и разрушение. 2 Недостаточная пропускная способность	Подтопление земляного полотна и балласта, снижение устойчивости, ускорение процессов морозного пучения и сплывов	Визуальный мониторинг. Данные об осадках. Уровень воды в канавах	Замена элементов, ремонт	Геология грунтов и вода. Климатические условия
<i>Сопутствующее динамическое воздействие</i>					
Взаимодействие «путь – экипаж»	1 Повышенные динамические нагрузки. 2 Резонансные явления. 3 Неравномерная жесткость пути	Ускоренное накопление повреждений всех элементов пути, дискомфорт пассажиров, риск схода с рельсов	Динамические параметры: вертикальные и горизонтальные ускорения, силы. Данные с подвижного состава: датчики путеизмерительных вагонов	Уменьшение скорости при плохих условиях видимости и состоянии пути	Техническое состояние железнодорожного пути (ВСП и НСП)

Системный анализ железнодорожного пути как сложной технической системы

Развивая методологию системного анализа, представляется обоснованным декомпозировать путь как сложную техническую систему на совокупность критических и фундаментальных компонентов. Соответствующая схема представлена на рис. 2.

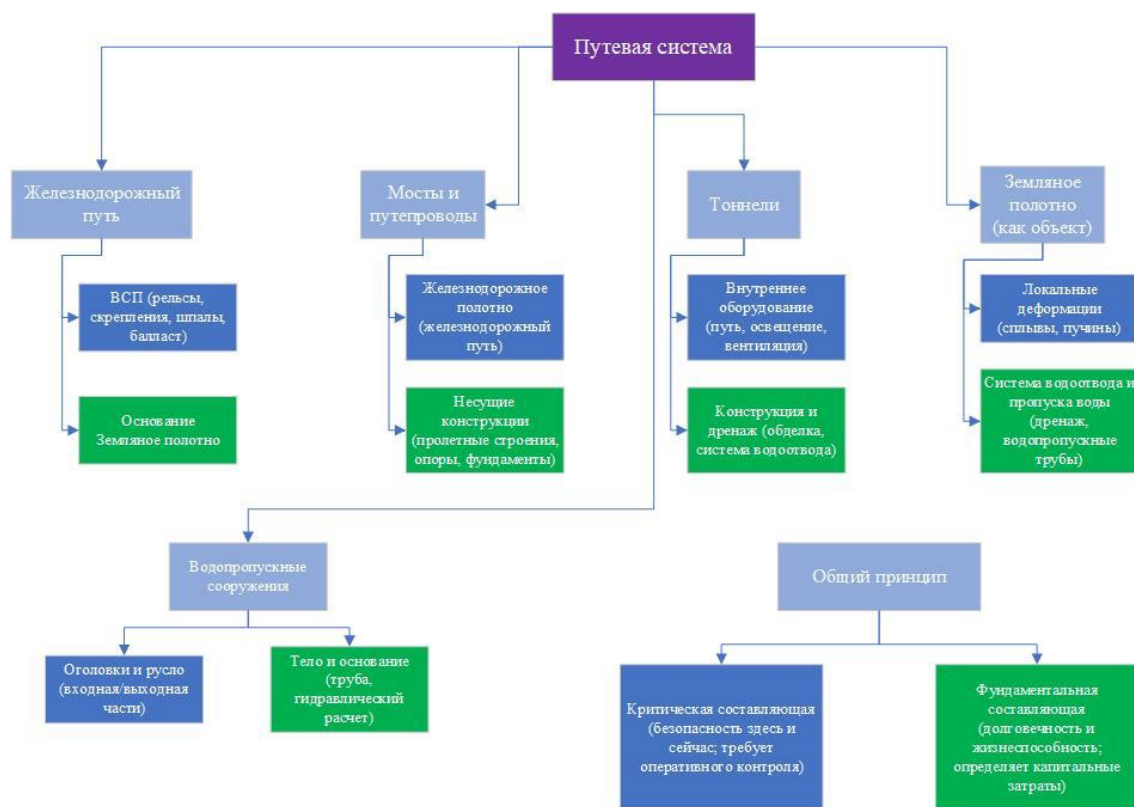


Рис. 2. Системный анализ железнодорожного пути как системы

Интерпретация и описание представленной схемы приведены ниже.

1 Железнодорожный путь (ВСП + земляное полотно)

- Критическая составляющая: верхнее строение пути (ВСП) – рельсы, скрепления, шпалы, балласт. Их целостность гарантирует безопасность здесь и сейчас;
- Фундаментальная составляющая: земляное полотно – основа всей трассы. Его стабильность – условие существования пути на десятилетия.

2 Мосты и путепроводы (искусственные сооружения)

- Критическая составляющая: рельсошпальная решётка на мосту, барьерные ограждения;
- Фундаментальная составляющая: пролётные строения, опоры и фундаменты.

3 Тоннели

- Критическая составляющая: путь, водоотвод, контактная сеть, состояние обделки;
- Фундаментальная составляющая: обделка тоннеля, дренажная система за обделкой.

4 Земляное полотно (как отдельный объект системы)

- Критическая составляющая: локальные деформации (сплывы, пучины);
- Фундаментальная составляющая: конструкция в целом (откосы, дренаж, укрепления).

5 Водопропускные сооружения (трубы, малые мосты)

- Критическая составляющая: входной и выходной оголовки, русло на входе/выходе;
- Фундаментальная составляющая: тело трубы (звенья) или опоры малого моста, а также основание (фундамент) под ними.

Принцип: неисправность диагностируется от критической ветви (симптом) к фундаментальной (первопричина). Критические компоненты – объекты непрерывного мониторинга; фундаментальные – прогнозного моделирования долгосрочной деградации.

Системный анализ уровней жизненного цикла железнодорожного пути

Эксплуатация пути – процесс управляемой деградации и восстановления. Модель жизненного цикла представлена на рис. 3.

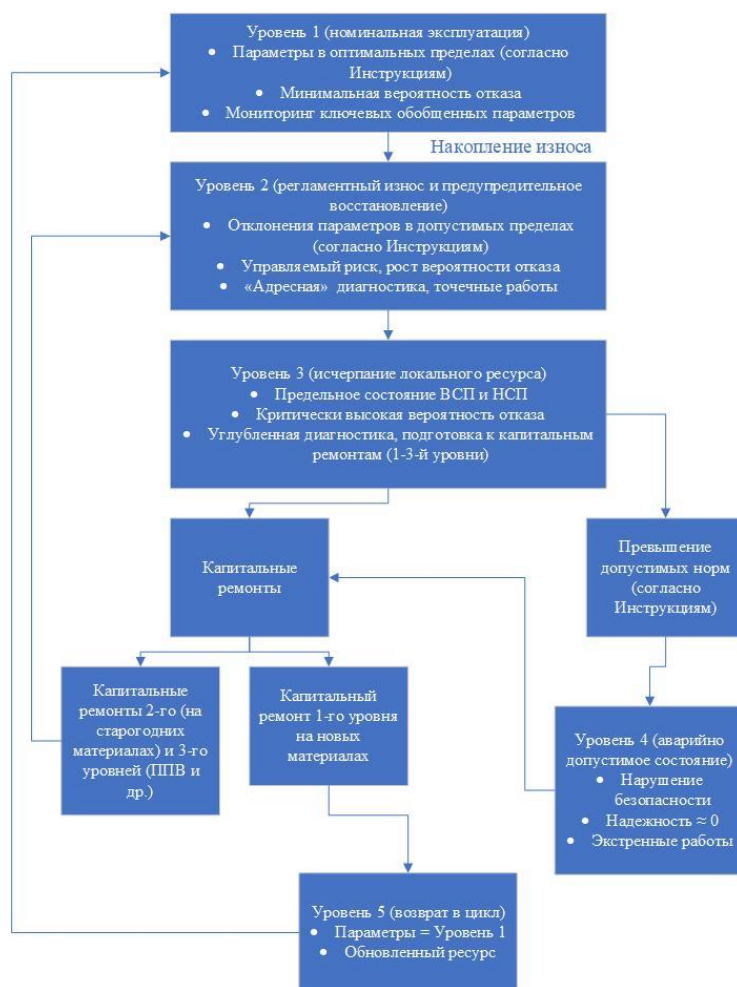


Рис. 3. Жизненный цикл железнодорожного пути

Уровень 1. Номинальная эксплуатация. Параметры оптимальны. Вероятность отказа минимальна.

Уровень 2. Регламентное обслуживание. Параметры в пределах предупредительных норм. Вероятность отказа повышена, но управляема.

Уровень 3. Исчерпание ресурса. Элементы у предельного износа. Вероятность отказа критически высока. Требуется капремонт.

Уровень 4. Аварийный. Движение запрещено. Отказ произошёл или неизбежен.

Уровень 5. После капвосстановления. Ресурс обновлён.

Уровни образуют цикл 1→2→3→5→1 с порогом уровня 4. Задача ЦД – прогноз переходов между уровнями, что позволяет перейти к предиктивному управлению [10]. Нормативные пороги – встроенные правила модели.

Концепция цифрового двойника железнодорожного пути

Архитектура ЦД предполагает двухуровневую структуру (техническую и программную подсистемы). Основные компоненты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Подсистемы предлагаемого цифрового двойника

Компонент/устройство	Основная задача
<i>1 Слой сбора данных (техническая система)</i>	
Тензодатчики	Напряжения и нагрузки
Акселерометры («умные шпалы»)	Вибрации, состояние балласта
Датчики температуры	Контроль температурного режима
Датчики смещения	Стабильность земполотна и ИССО

Окончание табл. 2

2 Слой передачи данных (стационарная сеть)	
Промышленные коммутаторы и маршрутизаторы	Образование локальной вычислительной сети (ЛВС) вдоль пути для агрегации данных с датчиков
Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)	Обеспечение высокоскоростной и защищенной передачи больших объемов данных от сенсорной сети к центру обработки.
Полевые шлюзы и концентраторы данных	Сбор, предварительная обработка и передача данных от групп датчиков в основную сеть.
3 Слой платформы и моделей (вычислительное ядро)	
Серверы	Хранение и обработка
Физ.-мат. модель	Прогнозирование износа
3D/BIM, ГИС	Визуализация, привязка
4 Слой аналитики и управления	
Аналитический модуль	Прогноз ресурса пути, классификация дефектов
Система поддержки принятия решений	Формирование оптимальных графиков обслуживания, ремонтных кампаний и автоматизация планирования ресурсов (техника, материалы)
Единая панель управления	Графики, тревоги
Модуль управления жизненным циклом	Учет всей истории эксплуатации

Требования к свойствам ЦД систематизированы в таблице 3.

Таблица 3

Свойства цифрового двойника как системы

Свойство/атрибут	Сущность свойства	Аргументация
Достоверность	Соответствие модели прототипу	Точное моделирование напряжений
Масштабируемость	От элемента до сети	Позапное расширение
Интегративность	Объединение разнородных данных	Единое «окно истины»
Актуальность	Минимальная задержка	Безопасность, мгновенное реагирование
Прогностичность	Прогноз ресурса и отказов	Переход к предиктивному обслуживанию
Имитационное моделирование	Сценарии «что, если»	Оценка рисков в цифровой среде
Наглядность	2D/3D, цветовые кодировки	Быстрая оценка обстановки
Надёжность	24/7/365, резервирование	Недопустимость отказа
Безопасность данных	Защита от кибератак	Целостность критической информации
Открытость	Стандартизированные API	Подключение новых технологий
Автономность	Автоматическое управление	Сокращение времени реакции

Возможности внедрения ЦД в конструкцию пути – в таблице 4.

Таблица 4

Возможности внедрения системы ЦД в конструкцию железнодорожного пути

Конструкция	Состав конструкции (строения)	Элементы конструкции (части)	Параметр части	Возможность применения датчиков ЦД
Железнодорожный путь	Верхнее строение пути	Рельсы	Геометрия пути и рельсов, износ	Датчики позиционирования
		Скрепления	Затяжка, состояние	Смарт-шайбы
		Шпалы	Состояние (трещины, износ)	«Умные» шпалы
		Балласт	Загрязненность, толщина	Датчики, влажности
		Песчаная подушка	Толщина	—*
	Нижнее строение пути	Земляное полотно	Состояние, параметры откосов	Датчики позиционирования
		ИССО	Состояние, параметры элементов (балки, свод и др.)	Датчики позиционирования

* – возможна установка при капремонте.

Внедрение технически реализуемо и не создаёт помех движению. Прогнозируемые результаты и перспективы – в таблице 5.

Таблица 5

Прогнозируемые результаты и перспективные направления внедрения системы

Аспект	Результаты работы (краткосрочный и среднесрочный эффект)	Перспективы (долгосрочное развитие и трансформация)
1	2	3
Безопасность и надежность	• Снижение количества отказов и аварийных ситуаций за счет раннего выявления критических дефектов. • Автоматическое ограничение скорости на деградирующих участках пути, исключая человеческий фактор. • Постоянный мониторинг состояний пути и искусственных сооружений (мостов, тоннелей) в реальном времени.	• Переход к проактивной безопасности: система предсказывает и предотвращает инциденты до самой возможности их возникновения. • Создание «иммунной системы» инфраструктуры, способной адаптироваться к чрезвычайным ситуациям (например, автоматически усиливать мониторинг при угрозе паводка)
Техническое обслуживание и ремонты	• Сокращение затрат на ТОиР (техобслуживание и ремонты) за счет оптимизации сроков и объемов работ. • Увеличение межремонтных циклов благодаря точному прогнозу остаточного ресурса. • Минимизация «окон» и простоев инфраструктуры за счет точечного текущего ремонта.	• Полный переход к предиктивно-адаптивной модели обслуживания: ремонты выполняются строго по фактическому состоянию, а не по графику. • Внедрение роботизированных комплексов для автономного ремонта, которые получают задания напрямую от ЦД
Экономическая эффективность	• Снижение прямых расходов на материалы и зарплаты ремонтных бригад. • Снижение логистических издержек за счет уменьшения скоростных ограничений и более равномерного износа пути. • Оптимизация запасов МТР (материально-технических ресурсов): точное прогнозирование потребности в рельсах, шпалах, скреплениях.	• Максимизация пропускной способности пути за счет динамического управления его состоянием и прогнозирования нагрузки. • Создание цифрового рынка услуг ТОиР, где ЦД автоматически проводит тендеры среди подрядчиков на основе анализа их предложений и репутации
Управление и планирование	• Единое информационное пространство для всех служб (путь, мосты, энергетика, движение). • Обоснованное планирование капитальных ремонтов и модернизаций на основе объективных данных. • Повышение прозрачности использования бюджетных средств.	• Создание «Операционного центра будущего» с полностью цифровым двойником всей сети для сквозного управления перевозками и инфраструктурой. • Внедрение AI-оптимизаторов, которые самостоятельно балансируют между износом пути, графиком движения и экономическими показателями. • Сквозное планирование «от грузоотправителя до получателя» с учетом состояния инфраструктуры
Данные и технологии	• Накопление структурированного цифрового досье на каждый метр пути за весь жизненный цикл. • Создание надежной платформы для интеграции данных с дронов, дефектоскопных вагонов, стационарных датчиков.	• Развитие в сторону когнитивной системы: ЦД не только предсказывает, но и самостоятельно формирует гипотезы о причинах деградации и предлагает инженерные решения. • Стандартизация и создание экосистемы вокруг ЦД, где сторонние разработчики могут создавать приложения и сервисы

Проведенный анализ позволяет констатировать, что внедрение предиктивной системы диагностики на основе цифрового двойника приведёт к качественной трансформации всей парадигмы управления железнодорожной инфраструктурой. Ключевым результатом станет переход от реактивной, основанной на регламентах и визуальном контроле, модели к предиктивно-адаптивной системе, функционирующей в режиме реального времени.

Интеграция цифровых железнодорожных систем

Подход на основе только подвижных средств имеет ограничения: отсутствие датчиков для стационарных объектов и дискретность данных. Необходима гибридная архитектура, объединяющая динамический и стационарный ЦД (рис. 4).



Рис. 4. Архитектура гибридного цифрового двойника

Пятиуровневая архитектура включает:

- 1 Сбор данных – мобильный (путеизмерители, дефектоскопы) и стационарный (сенсорные сети) сегменты.
- 2 Транспортный – передача (LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi), пограничные вычисления.
- 3 Платформенный – микросервисное ядро, временные ряды, пространственные данные.
- 4 Аналитический – ML, конечно-элементные модели, гибридные алгоритмы.
- 5 Презентационный – центр управления, визуализация, СППР.

Интеграция обеспечивает синергетическое взаимодействие моделей, взаимное дополнение и кросс-проверку показаний, повышая достоверность и отказоустойчивость системы. На основе верифицированных данных становится возможным оптимальное планирование превентивных и восстановительных мероприятий.

Выводы

Проведенный системный анализ путевой подсистемы железнодорожной инфраструктуры позволил сформировать комплексную методологическую основу для создания стационарной системы цифрового двойника. Основные результаты:

1 Фокус на критических участках с повышенной интенсивностью деградации (сложные геологические условия, критические зоны ИССО) при реализации стационарного ЦД принесёт максимальный экономический и эксплуатационный эффект, предотвращая переходы в аварийные состояния.

2 Декомпозиция пути на критические и фундаментальные компоненты выявила их различную роль в обеспечении безопасности и надёжности. Это разграничение формирует принципиальную основу для иерархической модели данных в ЦД, где каждый уровень требует специфических подходов к диагностике и прогнозированию.

3 Систематизация требований к данным выявила необходимость дополнения традиционных источников (подвижной диагностический состав) данными от стационарных сенсорных сетей. Только гибридная архитектура может обеспечить непрерывный мониторинг параметров, критичных для долговременной устойчивости пути.

4 Разработанная модель уровней жизненного цикла устанавливает прямую связь между диагностическими параметрами, нормативными порогами и управляющими воздействиями, трансформируя понятие «техническое состояние» в дискретную шкалу категорий риска – ключевое условие алгоритмизации принятия решений.

5 Предложенная гибридная архитектура ЦД формирует целостную информационную среду для поддержки обоснованных управленческих решений и перехода от регламентного обслуживания к стратегии управления по фактическому состоянию.

Список литературы

1 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [утверждена распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р (в ред. от 6 ноября 2024 г.)] // КонсультантПлюс : [справочно-правовая система]. – Москва, 2024. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/?ysclid=mr1rq5hy4248587079 (дата обращения: 24.02.2026).

2 **Ковенькин, Д. А.** Применение программного комплекса Frost 3D Universal для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна / Д. А. Ковенькин, Д. Н. Насников, И. С. Чернецкая // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

3 **Sresakoolchai, J.** Track Geometry Prediction Using Three-Dimensional Recurrent Neural Network-Based Models Cross-Functionally Co-Simulated with BIM / J. Sresakoolchai, S. Kaewunruen // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 391. – DOI 10.3390/s23010391.

4 Seeking a Definition of Digital Twins for Construction and Infrastructure Management / A. Aragón, M. Arquier, O. B. Tokdemir [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2025. – Vol. 15, No. 3. – P. 1557. – DOI 10.3390/app15031557.

5 **Пятков, Д. А.** Цифровой двойник железнодорожного пути : актуальность, проблемы внедрения и перспективы развития / Д. А. Пятков // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий (НТО-VI-2025) : сборник научных статей по материалам VI Всероссийской (национальной) научной конференции, Красноярск, 06–07 ноября 2025 года. – Красноярск : Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2025. – С. 118–127. – EDN EUJUXC.

6 **Суслов, О. А.** Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников / О. А. Суслов, В. И. Федорова // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 5. – С. 251–259. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259.

References

1 Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 [approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r (as amended dated November 6, 2024)] // ConsultantPlus : [legal reference system]. – Moscow, 2024. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/?ysclid=mr1rq5hy4248587079 (date of access: 02/24/2026).

2 **Kovenkin, D. A.** Application of the Frost 3D Universal software package for predictive thermal engineering calculations of the road-bed / D. A. Kovenkin, D. N. Nasnikov, I. S. Chernetskaya // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2022. – No. 3 (75). – P. 80–90. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).80-90.

3 **Sresakoolchai, J.** Track Geometry Prediction Using Three-Dimensional Recurrent Neural Network-Based Models Cross-Functionally Co-Simulated with BIM / J. Sresakoolchai, S. Kaewunruen // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 391. – DOI 10.3390/s23010391.

4 Seeking a Definition of Digital Twins for Construction and Infrastructure Management / A. Aragón, M. Arquier, O. B. Tokdemir [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2025. – Vol. 15, No. 3. – P. 1557. – DOI 10.3390/app15031557.

5 **Pyatkov, D. A.** The digital twin of the railway track : relevance, problems of implementation and development prospects / D. A. Pyatkov // Science, technology, society : environmental engineering in the interests of sustainable development of territories (NTO-VI-2025) : collection of scientific articles based on the materials of the VI All-Russian (national) scientific conference, Krasnoyarsk, November 06-07, 2025. – Krasnoyarsk : Public Institution «Krasnoyarsk Regional House of Science and Technology of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations», 2025. – P. 118–127. – EDN EUJUXC.

6 **Suslov O. A.** Promising approaches to predictive modeling of degradation processes of elements of track superstructure elements and their application in the creation of digital twins / O. A. Suslov, V. I. Fedorova // Russian Railway Science Journal. – 2021. – Vol. 80, No. 5. – P. 251–259. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259.

7 **Чаплин, И. В.** Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста / И. В. Чаплин, А. В. Паторняк, С. В. Ефимов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 3. – С. 831–838. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838.

8 **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.

9 **Пятков, Д. А.** Шпалы с увеличенной площадью опирания : особенности конструкции, преимущества и перспективы применения / Д. А. Пятков, В. В. Спириухов // Молодежная наука : Труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 25 апреля 2024 года. – Красноярск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 235–238. – EDN QJVEZF.

10 **Пюкке, Г. А.** К вопросу об использовании марковской модели деградации при диагностировании технических систем / Г. А. Пюкке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2017. – № 3 (19). – DOI 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-ispolzovanii-markovskoy-modeli-degradatsii-pri-diagnostirovanii-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 15.02.2026).

7 **Chaplin, I. V.** Improvement of the system of operation of artificial structures through the use of digital twins on the example of a railway bridge / I. V. Chaplin, A. V. Patornyak, S. V. Efimov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2025. – Vol. 22, No. 3. – P. 831–838. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838.

8 **Shevchenko, D. V.** Methodology of building digital doubles in railway transport / D. V. Shevchenko // Russian Railway Science Journal. – 2021. – Vol. 80, No. 2. – P. 91–99. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

9 **Pyatkov, D. A.** Sleepers with an increased support area : design features, advantages and application prospects / D. A. Pyatkov, V. V. Spiryukhov // Youth science : proceedings of the XXVIII All-Russian student scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 25, 2024. – Krasnoyarsk : Irkutsk State Transport University, 2024. – P. 235–238. – EDN QJVEZF.

10 **Pyukke G. A.** On the use of the Markov degradation model in the diagnosis of technical systems / G. A. Pyukke // Bulletin of the Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center (KRASEC). Physics and Mathematics Sciences. – 2017. – No. 3 (19). – DOI 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-ispolzovanii-markovskoy-modeli-degradatsii-pri-diagnostirovanii-tehnicheskikh-sistem> (date of access: 02/15/2026).

D. A. Pyatkov

SYSTEM ANALYSIS OF THE RAILWAY INFRASTRUCTURE SUBSYSTEM AS A STEP TOWARDS A DIGITAL TWIN (STATIONARY SYSTEM) OF A RAILWAY TRACK

Abstract. The railway track is analyzed as a complex technical system, the management of which is based on regulatory approaches that limit the predictive control of critical sections. A set of system analysis methods has been applied: structural decomposition, functional and structural analysis, classification and multi-criteria analysis. The hierarchical interrelationships of the elements of the upper and lower structures have been revealed, and the cascading nature of degradation has been established, where the malfunction of the underlying element acts as the primary factor in the destruction of the overlying ones. The division of components into critical (providing instant safety) and fundamental (determining long-term stability) is justified. A multilevel life cycle model is proposed, which establishes a discrete scale of states correlating with the probability of failure. The concept of a hybrid digital twin integrating stationary sensor networks and data from mobile diagnostic complexes has been developed.

Keywords: digital twin, railway track, system analysis, optimization of diagnostic processes, railway transport, methods of system analysis.

For citation: Pyatkov, D. A. System analysis of the railway infrastructure subsystem as a step towards a digital twin (stationary system) of a railway track / D. A. Pyatkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 61–72. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_61.

Сведения об авторах

Пятков Дмитрий Александрович
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской
академии наук»,
аспирант,
e-mail: d.pyatkov@list.ru

Information about the authors

Pyatkov Dmitry Alexandrovich
Federal Research Center
“Krasnoyarsk Scientific Center
Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences”,
Postgraduate Student,
e-mail: d.pyatkov@list.ru