

# Жизненный цикл интеллектуальных ВСМ на базе BIM, цифровых двойников и других технологий на примере строительства плитных железнодорожных путей

В.С. Кублицкая, О.Н. Покусаев, В.П. Куприяновский

**Аннотация**— Интегрированное управление данными на основе разнообразных формализованных моделей является ключевой технологией, которая обеспечивает управляемую моделями динамическую синхронизацию действий, необходимых для успешного управления железнодорожными активами. Отрасль управления активами значительно выиграла при переходе от традиционной к цифровой трансформации во всем мире. Во всем мире высокоскоростные железнодорожные системы обслуживают почти 2 миллиарда пассажиро-километров в день. По своей сути они представляют собой такую же критически важную инфраструктуру, как телекоммуникационные и энергетические сети. Плитные пути являются важной базовой конструкцией для облегчения и поддержки высокоскоростных поездов благодаря их преимуществам плавности, устойчивости и минимальных требований к техническому обслуживанию. С точки зрения экономического и устойчивого развития, полный жизненный цикл плитных путей относится к концепции проектирования, которая учитывает все этапы путевой структуры на ранней стадии проектирования, интегрируя планы и анализируя проблемы, которые могут возникнуть на последующих этапах строительства и эксплуатации путевой структуры. Безбалластный путь является одной из основных технологий высокоскоростных железных дорог. Путевая структура напрямую воздействует на основание, деформация опорного сооружения напрямую влияет на плавность хода и устойчивость пути, а качество и точность строительства напрямую влияют на безопасность и комфорт эксплуатации скоростного поезда.

**Ключевые слова**—высокоскоростные железные дороги, BIM, плитный путь.

## I. ВВЕДЕНИЕ. УПРАВЛЕНИЕ АКТИВАМИ.

Управление информацией о железнодорожных активах является ключевым видом деятельности, который интересует как технологии, так и методологии и влияет на все фазы жизненного цикла (т.е. планирование, проектирование, создание, поддержка, утилизация). В свою очередь именно работа с

железнодорожными активами в жизненном цикле дает возможности экономических и технологических решений для определения целесообразности развития по фазам жизненного цикла.

До недавнего времени большинство инженерных и производственных операций полагались на бумажные и/или цифровые документы для передачи инженерных данных и управления производственными процессами [1,2,3]. И, наоборот, благодаря созданию интегрированной среды для совместной работы, основанной на 3D-деталях определения актива, которые являются общими для всего железнодорожного предприятия, обеспечивается быстрое, бесшовное и доступное развертывание любого необходимых технологий и продуктов на их основе от концепции до утилизации.

Интегрированное управление данными на основе разнообразных формализованных моделей является ключевой технологией, обеспечивающей управляемую моделями динамическую синхронизацию действий, связанных с производством сложных и специализированных продуктов, на базе выбранных технологий, необходимых для успешного управления железнодорожными активами. Эти технологии обеспечивают эффективное взаимодействие между различными видами деятельности, поскольку набор данных на основе разнообразных формализованных моделей может полностью описывать как геометрическую, так и негеометрическую информацию, относящуюся к различным частям инфраструктурных активов железных дорог, сохраняя согласованность данных и связность на протяжении всего жизненного цикла.

Так, управление жизненным циклом инфраструктурных активов железных дорог может быть улучшено с точки зрения согласованности данных и связности за счет внедрения 3D-проектирования на основе конкретной формализованной и стандартизированной группы моделей BIM. Технология 3D-проектирования на основе BIM использует BIM в качестве единого источника данных, определяя 3D-проектную информацию, 3D-производственную информацию и информацию об управлении инфраструктуры в 3D-цифровой модели, например

Статья получена 20 марта 2024.

Кублицкая В.С. - РУТ (МИИТ) (email: v.lazutkina@rut.digital)

Покусаев О.Н. - РУТ (МИИТ) (email: o.pokusaev@rut.digital)

Куприяновский В.П. - РУТ (МИИТ) (email: v.kupriyanovsky@rut.digital)

путей железной дороги. Таким образом, BIM может быть применен во всей модели спроса на железнодорожные пути (модель проектирования, процесса, производства и обслуживания) для поддержки координации процесса оснастки инфраструктуры пути, производства, сборки и технического обслуживания путем установки параметра проектирования путей и устранения барьеров между проектированием, производством и информацией об эксплуатации и техническом обслуживании.

С другой стороны [4,5], утверждают, что определение на основе модели является стратегией перехода от двухмерных (2D) бумажных чертежей к трехмерным (3D) моделям автоматизированного проектирования (САПР), где модель содержит всю информацию, так что чертежи могут больше не понадобиться. Это приводит к сокращению времени вывода продукции на рынок, повышению эффективности процессов и повышению качества продукции. Модели железнодорожных путей также имеют решающее значение для достижения функциональной совместимости между приложениями, людьми и компаниями, а также для обмена данными. Однако те же авторы утверждают, что разработка моделей железнодорожных путей сегодня в основном касается структур данных, которые должны быть в многообразных формах и унифицированы в рамках нативных трехмерных CAD-моделей. По этой причине необходимо будет предложить глобальную стратегию и соответствующие методы поддержки развития моделей железнодорожных путей, а также определить новые стандарты и общие практики для создания общего языка для моделирования и управления данными.

Исследование, проведенное в работе [6] по сравнению модельно-ориентированных и проектно-ориентированных процессов, показало, что модельно-ориентированные процессы приводят к сокращению времени цикла на 74,8% по сравнению с процессами, основанными на проектировании; однако и в том, и в другом случае возникают проблемы, связанные с выполнением этапов проектирования и производства жизненного цикла продукта.

В целом, надежное применение, например, BIM модели, по своей сути, зависит от простоты преобразования данных, которая значительно повышается за счет возможностей совместной работы инструментов моделирования, используемых для создания данных, и стандартов, используемых для обмена этими данными. Фактически, применение соответствующих стандартов обеспечивает бесперебойный поток данных на протяжении всего жизненного цикла продукта и позволяет повторно использовать данные в наиболее подходящих форматах для совместной работы и визуализации [7,8,9,10].

Отрасль управления активами значительно выиграла при переходе от традиционной к цифровой трансформации во всем мире. В последнее время в жизненном цикле инфраструктур используется

множество технологий. Информационное моделирование зданий (BIM), виртуальная реальность, дополненная реальность, смешанная реальность, 3D-печать, облачные вычисления, искусственный интеллект (ИИ), большие данные и Интернет вещей (IoT) — все это примеры цифровых технологий, в дополнение к робототехнике, БПЛА (беспилотным летательным аппаратам), мобильным и носимым устройствам, а также интеллектуальным данным, 3D-печати, облачным вычислениям, искусственному интеллекту (ИИ), большим данным и Интернету вещей (IoT) — все это примеры используемых цифровых технологий.

Управление железнодорожными активами и, в частности, путями получает значительные выгоды от внедрения новых технологий, которые повысили производительность и эффективность различных аспектов этих активов. Эти технологии, такие как цифровая трансформация, оказывают влияние на весь жизненный цикл железнодорожного актива, от подготовки к строительству, строительства до этапа управления объектом. Цифровая трансформация улучшает идентификацию потенциальных проблем при проектировании и строительстве, облегчает сотрудничество между заинтересованными сторонами и улучшает интеграцию людей, процессов и контекста в антропогенную среду железных дорог.

Сошлемся на несколько опубликованных работ, описывающих характерных применений цифровых технологий для управления железнодорожными активами путей и их составляющих. Так, об управлении железнодорожными активами в режиме реального времени можно узнать в работе [11]. Оказывается, что управление железнодорожными активами может быть успешным при отсутствии некоторых данных [12]; об устойчивом управлении железнодорожными активами написано в работе [13]; особенности управления активами стрелочных переводов отражены в работе [14]; как влияет применение цифрового двойника железнодорожных активов написано в работе [15], о требованиях к большим данным с точки зрения управления железнодорожными активами можно прочитать в статье [17] и, наконец, о последней, но по значению, технологии для железнодорожных активов - искусственном интеллекте можно узнать из публикации [16].

В 2024 году был опубликован большой обзор о технологиях в интересующем нас секторе [18]. Мы приводим из него пузырьковую диаграмму для картографирования результатов, показывающая взаимосвязь цифровых технологий (рисунок 1). Из нее видно, что по последним публикациям BIM, несомненно, лидирует, как по количеству публикаций, так и по связанности с другими технологиями.

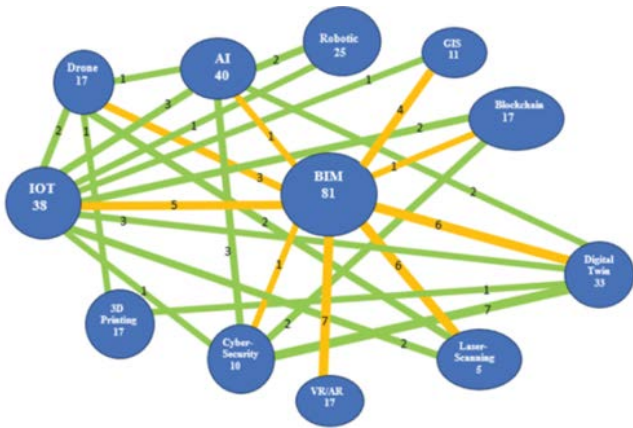


Рис. 1. Пузырьковая диаграмма для картографирования результатов, показывающая взаимосвязь цифровых технологий [18].

## II. ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУР ВСМ

В сфере инфраструктурных проектов широко распространенная интеграция информационного моделирования зданий (BIM) стала отличительной чертой. Однако эта интеграция не является единообразной во всех секторах, что требует более пристального изучения ее применения, особенно в области железнодорожной инфраструктуры. В этом контексте создание и распространение цифровых моделей, обогащенных федеративными данными, является критически важным требованием, способствующим беспрепятственному обмену информацией между всеми заинтересованными сторонами, участвующими в строительстве [19]. Проводя параллели с концепцией «цифрового двойника» в обрабатывающей промышленности, железнодорожные проекты требуют сопоставимого подхода. Учитывая разнообразие технологий и форматов данных, присущих железнодорожным проектам, которые часто исходят от нескольких поставщиков, необходима среда для совместной работы, основанная на данных. На фоне этих соображений становится очевидной необходимость открытых стандартов, особенно для государственного сектора. Создание открытого стандарта, примером которого являются Industrial Foundation Classes (IFC), становится императивным шагом на пути к устойчивому использованию информации. Такой стандартизированный подход не только повышает функциональную совместимость, но и лежит в основе более широкой цели получения устойчивой ценности от накопленных ресурсов данных. В этой главе мы приступаем к всестороннему исследованию многообразия применений BIM-технологий по всему спектру железнодорожных проектов, начиная с начальных этапов проектирования и заканчивая последующими операциями по техническому обслуживанию. Облегчая накопление информации на протяжении всего жизненного цикла, данные BIM превращаются в динамическое хранилище, обладающее потенциалом для улучшения ландшафта цифровой инфраструктуры [19].

В области гражданского строительства, в частности, в рамках железнодорожных проектов, внедрение информационного моделирования зданий (BIM) стало обязательным условием в ряде стран (Китай, ЕС и др.). Тем не менее, приверженность сектора традиционным методам проектирования и управления инфраструктурой задержала широкое внедрение BIM.

В статье [20] описывается BIM-ориентированная методология, примененная к реальному проекту высокоскоростной железнодорожной линии (HSRL). Благодаря всестороннему изучению проектных параметров HSRL и интеграции различных инструментов на основе BIM, создается 3D-параметрическая модель проектирования. Эта модель служит основой для оценки до пяти вариантов дизайна с учетом технических и экономических аспектов. Кроме того, предложена модель деградации для оценки альтернативных характеристик на протяжении всего жизненного цикла инфраструктуры при определенных допущениях о железнодорожном движении. Это позволяет быстро оценить влияние конструкции трассы на затраты на техническое обслуживание. В [20] сделаны два основных вывода, которые могут принести пользу, как частным компаниям, так и железнодорожным администрациям: во-первых, BIM оказывается осуществимым и выгодным, несмотря на некоторые проблемы с совместимостью, что подчеркивает необходимость постоянного совершенствования совместимости программного обеспечения BIM. Во-вторых, предлагаемый подход потенциально может привести к экономии до 40% затрат на техническое обслуживание железнодорожных администраций.

Информационное моделирование зданий (BIM) — это совместный процесс, который включает в себя создание и управление цифровыми представлениями физических и функциональных свойств актива [20], и он широко рассматривается как лучший метод для строительных и инфраструктурных проектов [20]. Однако проектирование инфраструктуры намного сложнее, чем проектирование зданий. Одним из основных различий между ними является масштаб инфраструктуры, которая часто простирается на километры и создает многочисленные помехи окружающей среде.

Обмен информацией между заинтересованными сторонами, участвующими на всех этапах проекта, значительно расширяется за счет использования цифровых моделей. Они позволяют воспроизвести весь процесс строительства и могут использоваться на протяжении всего жизненного цикла (планирование, проектирование, строительство и обслуживание) готовой инфраструктуры. Теоретически методология BIM повышает эффективность [20], так как трудоемкий и подверженный ошибкам процесс ручного повторного ввода информации, типичный для традиционной бумажной работы, сводится к минимуму. Исследования, изложенные в [20], показали, что использование BIM

при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных объектов позволяет сэкономить от 10 до 20% от общей стоимости активов.

В Китае уже давно BIM является обязательным при строительстве всех железных дорог и, конечно, ВСМ [9]. Как построили самую большую станцию в Азии всего за 2 года с помощью BIM изложено в статье [21]. Эта станция (вокзал) используется для сети ВСМ Китая как центральная.

В Европе сегодня строятся две самые большие ВСМ этого континента. Первая из них Rail Baltica и вторая High Speed 2.

RB Rail AS – это многонациональное совместное предприятие Эстонской, Латвийской и Литовской Республик, созданное для реализации крупнейшего за последние 100 лет инфраструктурного проекта в Балтийском регионе Rail Baltica, целью которого является интеграция стран Балтии в европейскую железнодорожную сеть. Документация Rail Baltica BIM включает в себя обзорные презентации (видео и PDF), а также полный пакет рекомендаций и шаблонов BIM для конкретных программ, соответствующих международным стандартам [22].

Презентации этого проекта охватывают видение и стратегию внедрения BIM Rail Baltica, а также презентации с недавних мероприятий. Полный пакет рекомендаций BIM может быть загружен в виде одного пакета \*.zip [23] и содержит Руководство BIM, Информационные требования работодателя BIM (EIR), Шаблон плана выполнения BIM (BEP), Таблицы и инструкции по кодификации, Матрицу атрибутов объектов BIM, Матрицу уровня геометрической детализации (LoG) объектов BIM и инструкции, Шаблон плана доставки информации о задаче (TIDP), Шаблон плана предоставления основной информации (MIDP), Шаблон отчета о поставке BIM, шаблон извлечения количества (QEX), шаблон объема работ (QTO), шаблон DataDrop, шаблон САПР и инструкции, а также шаблон отчета о проверке коллизий.

High Speed 2 — высокоскоростная железная дорога, строящаяся в Англии. Он будет курсировать между Хандсейкром на юге Стаффордшира и Лондоном с ответвлением до Бирмингема. HS2 должна стать второй специально построенной высокоскоростной железной дорогой в Великобритании после High Speed 1, которая соединяет Лондон с туннелем под Ла-Маншем. Большую часть проекта планируется завершить в период с 2029 по 2033 год.

HS2 использует цифровой инжиниринг, в основе которого лежит информационное моделирование зданий (BIM), не только для выполнения наших обязательств в качестве государственного проекта, но и для того, чтобы выйти за рамки правительственного мандата по преобразованию того, как отрасль традиционно проектировала, строила и управляла инфраструктурными проектами [24].

Цифровое проектирование и BIM — это то, как мы создаем, храним, делимся и используем информацию об активах и инженерной информации, а также извлекаем выгоду из технологий для повышения эффективности и выполнения наших обязательств по HS2 сказано в [24].

Цифровая инженерия необходима для того, чтобы помочь нам обеспечить ценность всей жизни для наших заинтересованных сторон, повысить безопасность и внести свой вклад в экологическую устойчивость. Мы сделаем это за счет того, что сделаем информацию более наглядной, объединим ее в единое и безопасное пространство и максимально расширим сотрудничество между заинтересованными сторонами отмечено в [24].

При проектировании и строительстве железной дороги [24] используются данные и передовые технологии для разработки «Виртуальной железной дороги». Таким образом, формируется интегрированная «виртуальная» или «цифровая модель» проектной информации и всех железнодорожных активов, которые могут быть визуализированы в виде трехмерных (3D) конструкций в среде, в которой они будут построены. Это помогает нам сказано в [24] анализировать информацию, проверять предположения и согласовывать решения с заинтересованными сторонами при планировании, проектировании и поставке железной дороги (ВСМ).

На протяжении всего этапа строительства установка сенсорных устройств обеспечит передачу данных в режиме реального времени обратно в цифровую модель. Эта связь между физическими активами и виртуальной железной дорогой в режиме реального времени ляжет в основу нашего операционного «цифрового двойника». Цифровой двойник будет поддерживать оптимизированное управление железной дорогой и поможет повысить качество обслуживания наших будущих клиентов, как отмечено в [24].

Жизненный цикл внешнего строительства (например, здания, ВСМ или города), независимо от его формы в энергостроительной сфере, включает в себя две основные фазы: (1) проектирование и строительство и (2) техническое обслуживание и техническое сопровождение. На первом этапе архитекторы, инженеры и менеджеры несут ответственность за выявление взаимосвязей между проектированием и строительством и обращение с частями проекта как с интегрированной системой. Это требует одновременного управления большим количеством задач и действий с учетом их приоритетов, логики и ресурсов [28]. На втором этапе часть конструкции должна контролироваться в режиме реального времени для оптимизации работы, выполнения планового технического обслуживания, проведения отсроченного технического обслуживания, определения возможных улучшений, определения риска проблем и обеспечения здоровья и безопасности людей.

В настоящее время информационное моделирование

зданий (BIM) и Интернет-вещей (IoT), как компьютерные технологии, широко используются в строительной сфере, чтобы помочь архитекторам, инженерам и менеджерам достичь наилучших практических вышеупомянутых этапов. BIM обычно используется на этапе проектирования и строительства, в то время как IoT, в основном, управляет процессом эксплуатации и технического обслуживания.

Были созданы и получили распространение темы виртуального проектирования и строительства (VDC) и цифрового двойника в качестве прорывных технологических разработок для использования предоставленных пространственно-временных данных для пространственного проектирования и визуализации в режиме реального времени всех характеристик, информации, аспектов и дисциплинарных задач и видов деятельности без необходимости сложного и затратного по времени официального процесса идентификации на месте, даже в сложных проектах на уровне города [28,29]. Использование этих технологических разработок вместе с передовыми интеллектуальными алгоритмами позволяет изучить управление проектами на основе данных, а также оборудованием и техническом обслуживанием, что может диверсифицировать железнодорожную отрасль и повысить эффективность работы архитекторов, инженеров, менеджеров и рабочих в этой области.

На рисунке 2 показано, как внедрение новых технологий продвинуло строительную отрасль VCM от обычного любительского уровня к связанному

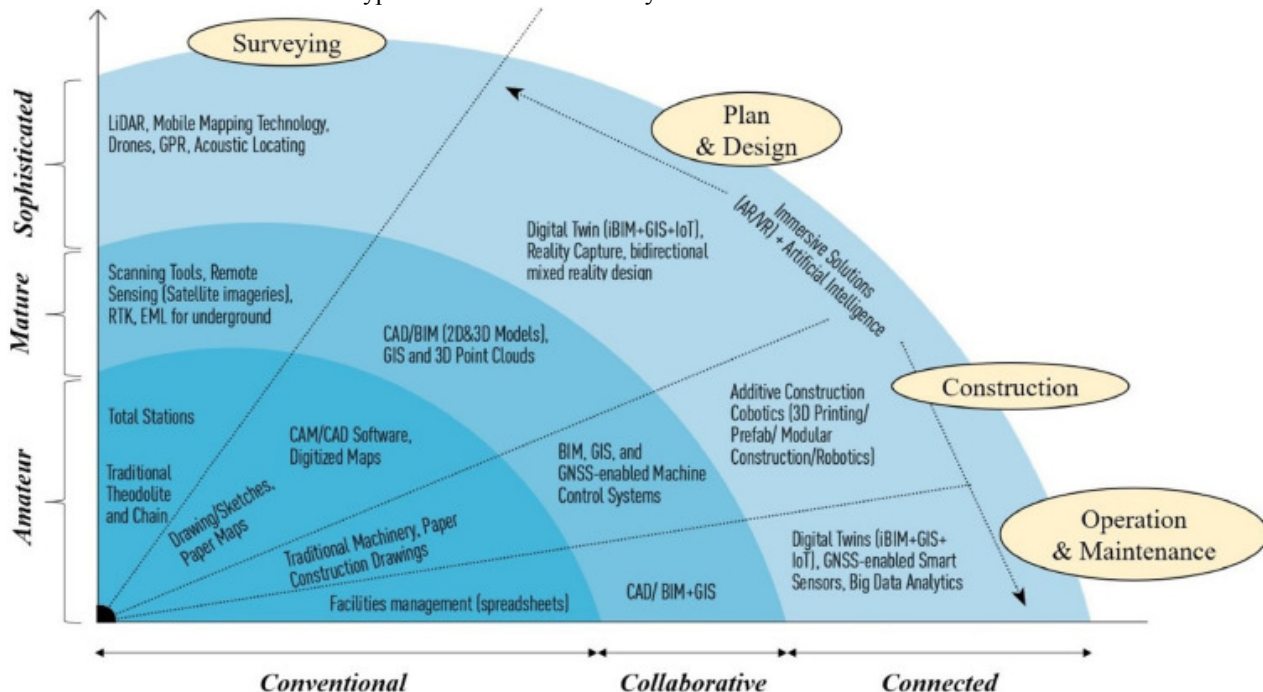


Рис. 2. Внедрение технологий в архитектурно-строительной отрасли [28].

Использование моделей информационного моделирования зданий (BIM) при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и инфраструктуры приводит к усилению внимания к качеству моделей.

сложному подходу. На этом рисунке показано, что такая технология, как CAD, может использоваться при проектировании, строительстве, эксплуатации и техническом обслуживании. На рисунке также показано, что технологии цифровых двойников могут быть реализованы на этапе проектирования, а технологии BIM, AR и VR (которые являются VDC) способны улучшить работу по проектированию, производству, эксплуатации и техническому обслуживанию. Кроме того, на рисунке 2 показано, что искусственный интеллект интегрировался с другими новыми технологиями и разработками для построения будущей аппаратно-строительной отрасли. В частности, в последнее время популяризируется человекоцентричный искусственный интеллект, чтобы обогнать не-ориентированный искусственный интеллект. Это позволяет архитекторам, инженерам и менеджерам определять свои предпочтения в качестве входных данных для технологий, чтобы лучше выбрать желаемые идеи, прототипы и решения. На рисунке 2 также показано применение новых инструментов спутникового и картографирования в передовых методах геодезии. По сути, такая интеграция и использование технологий значительно расширяют развитие железнодорожной отрасли для более быстрого создания устойчивой, безопасной, продуктивной и стабильной среды на любом уровне в этой отрасли.

Модели могут нуждаться в исправлении, обогащении или улучшении, чтобы соответствовать ожиданиям в отношении качества и полноты, особенно если модели должны приниматься в качестве юридических документов, например, для утверждения регулирующими органами [30].

Информационное моделирование зданий (BIM)



получило распространение во всем мире не только как инструмент цифрового строительства, но и как метод управления, и ожидается, что оно сыграет важную роль в управлении проектами.

Проект — это временное предприятие с определенным началом и концом, направленное на создание уникального продукта, услуги или результата [31]. «Жизненный цикл проекта — это последовательность фаз, через которые проходит проект от начала до завершения» [22]. И Институт управления

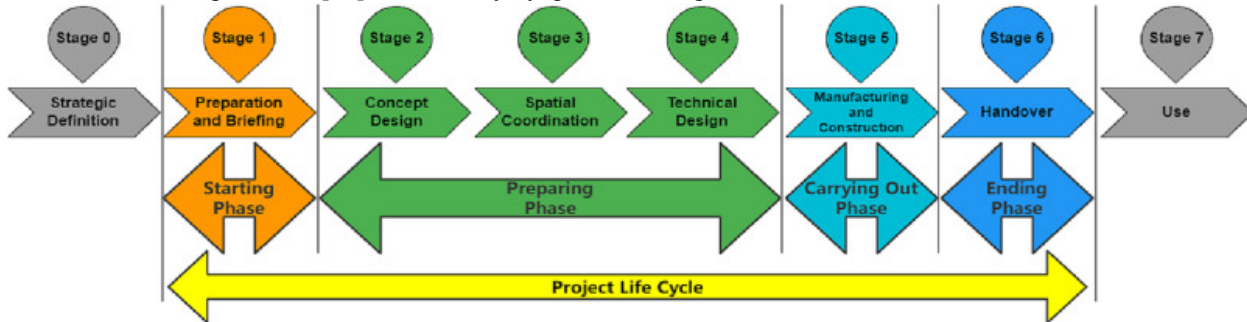


Рис. 3. Жизненный цикл строительного проекта (по материалам [31]).

Управление проектом относится к применению знаний, навыков, инструментов и методов для управления работой проекта для достижения намеченных результатов [25]. Изучение и понимание управления проектами на протяжении жизненного цикла проекта поможет отслеживать информацию о проекте и постоянно совершенствовать управление проектами. В общем случае, управление строительным проектом заканчивается с передачей объекта, а последующее текущее управление производством товаров или услуг выходит за его рамки, которые относятся к оперативному управлению [22]. Таким образом, для большинства групп строительных проектов и заинтересованных сторон, таких как проектировщик, подрядчик, субподрядчик и группа управления строительством в владельце проекта, их управление проектом заканчивается сдачей проекта, а другие группы будут заниматься последующей фазой эксплуатации и обслуживания.

Информационное моделирование зданий (BIM) — это «концепция связывания данных с геометрическими объектами, которые формируют цифровое представление сборок компонентов здания» [11]. За последние десять лет многие страны признали возможности и преимущества BIM и начали внедрять BIM в строительной отрасли. Согласно отчету NBS [20], внедрение BIM в Великобритании достигло 73% в 2020 году, что является значительным улучшением по сравнению с 13% в 2011 году. Благодаря широкому использованию и постоянному развитию BIM стал представлять собой метод управления, а не технологию.

BIM как метод управления должен постоянно применяться в проекте, чтобы реализовать его огромный потенциал из-за его сути в достижении управления информацией на протяжении всего жизненного цикла

проектами в США, и Ассоциация управления проектами в Соединенном Королевстве предлагают общий жизненный цикл проекта, разделенный на четыре этапа. Хотя конкретные названия могут различаться, обычно они вращаются вокруг «Начало», «Подготовка», «Выполнение» и «Окончание» [2, 22]. Сравнивая план работ Королевского института британских архитекторов [27], можно определить жизненный цикл строительного проекта и распределение четырех фаз, как показано на рис. 3, от стадии 1 до стадии 6.

здания. Он может интегрировать данные и информацию о здании и обмениваться ими на протяжении всего жизненного цикла, чтобы участники проекта могли правильно и быстро понимать и обрабатывать различные части информации о здании [14]. Однако жизненный цикл проекта отличается от жизненного цикла здания, который включает шесть этапов: добыча сырья, производство, строительство, эксплуатация и техническое обслуживание, снос и утилизация, повторное использование или переработка [21].

Интеграция BIM в железнодорожные проекты дает множество преимуществ, включая совместную работу, экономию времени, оптимизацию затрат, предотвращение конфликтов в сетях, оптимизацию управления объектами и повышение качества проектирования [25]. Использование BIM в проектах строительства железных дорог позволяет заинтересованным сторонам улучшить процессы принятия решений, оптимизировать реализацию проектов, сократить расходы и повысить общую эффективность отрасли [25,26,27]. Результаты показали, что на этапе строительства железнодорожных проектов строительные компании получили экономическую выгоду в размере 197,6% при привлечении профессиональных консультационных услуг BIM.

## II ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ ВСМ

Во всем мире высокоскоростные железнодорожные системы обслуживают почти 2 миллиарда пассажиро-километров в день. По своей сути они представляют собой такую же критически важную инфраструктуру, как телекоммуникационные и энергетические сети. Соответственно, они становятся катализатором социального и экономического роста, проистекающего из мобильного бизнеса. Высокоскоростные железнодорожные перевозки очень сложны и взаимозависимы из-за возросшего спроса на

междугородные взаимосвязанные перевозки.

Движимый быстрым развитием высокоскоростных железных дорог и интеллектуальных технологий, Китай приступил к всестороннему развитию интеллектуальной высокоскоростной железной дороги (или сокращенно IHSR). IHSR представляет собой сложную киберфизическую систему, которая требует проектирования верхнего уровня для определения пути реализации для планирования и строительства [32].

Внедрение интеллектуального развития железных дорог является необходимостью национального развития и запроса общества. Для этой структуры требуется технологическая поддержка, необходимая в архитектуре, основанная на информационном моделировании зданий (BIM), включая глобальную систему позиционирования (GPS) и географическую информационную систему (ГИС), алгоритмическое прогнозирование и машинное обучение, технологии Интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта, технологии больших данных и облачных вычислений [32].

В строительстве железных дорог необходимо срочно открыть интерфейс между информационными технологиями и продолжением интеллектуального строительства железных дорог, как полагают в [32], чтобы обеспечить лучшие условия бережливому,

интеллектуальному, эффективному, инновационному, устойчивому и скоординированному процессу развития ВСМ.

По сравнению с консервативными методами строительства, самые большие изменения в интеллектуальном мышлении заключаются в том, что между человеком и физической системой добавляется другая информационная система. Как показано на рисунке 4, люди могут управлять физической системой, контролируя информационную систему. То есть, информационная система может заменить людей для выполнения тех или иных работ, снизить нагрузку на людей и повысить эффективность работы. Кроме того, фундаментальная причина, по которой интеллектуальная строительная система превосходит традиционную строительную систему, заключается в том, что информационная система может иметь самостоятельное обучение и обладает саморастущими основами знаний. При достаточном накоплении данных информационная система представляет собой «человека» с богатым опытом, который может изучать интеллектуальное управление, интеллектуальный анализ и принятие решений, интеллектуальное информационное взаимодействие [32].

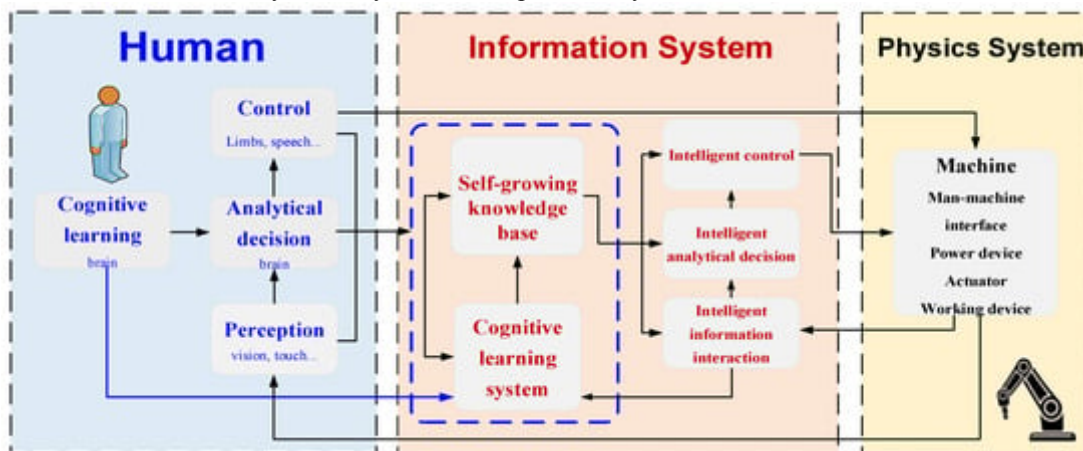


Рис. 4. Режим построения интеллектуальной строительной системы [32].

Суть интеллектуального железнодорожного строительства заключается в построении формирования информационного пространства, которое может реализовывать поток данных между информационными пространствами и физическими пространствами. Эта система с замкнутым циклом, которая реализует функции отслеживания сигналов, анализа на начальном этапе, принятия научных решений и точного отображения. Решение сложных и неопределенных

задач в процессе строительства железных дорог повышает эффективность распределения ресурсов и реализует оптимизацию ресурсов. Интеллектуальное строительство железных дорог само по себе представляет собой сложную систему с богатым и красочным наполнением и масштабами планшета. О причинах трехмерной теории Холлы, в данной работе построена архитектура интеллектуальной строительной системы, дороги в трех измерениях: жизненный цикл, уровень управления и техническая поддержка, как показано на рисунке 5.

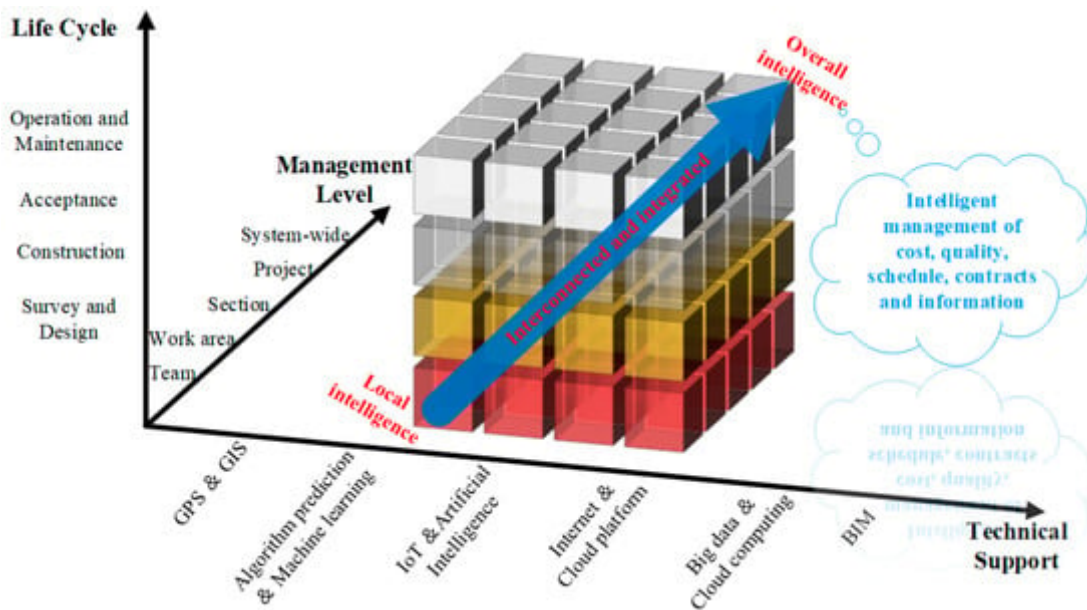


Рис. 5. Системная архитектура интеллектуального железнодорожного строительства [32].

В этой архитектуре «жизненный цикл» соответствует временному значению в трехмерной теории Холла. В этом отношении весь жизненный процесс строительства состоит из четырех этапов в хронологическом порядке: изыскания и проектирование, строительство на месте, приемка, эксплуатация и техническое обслуживание. Эффективный и интенсивный процесс управления формируется на основе различных компонентов в сочетании с функциональными измерениями. Размерность «управленческой иерархии» соответствует логической составляющей в трехмерной теории Холла. На протяжении всего цикла строительства железных дорог необходимо принять очередное решение на основе информации, полученной в ходе выполнения; например, географическая информация необходима на этапе исследования и проектирования, а последующее принятие решений по соответствующим параметрам проектирования на основе картографических данных и т.д. На этапе строительства необходимо отслеживать значения ключевых точечных характеристик для обеспечения качества проекта, а на этапе производства также необходимо внедрить мониторинг, и полученные данные также будут определять мероприятия по планированию работы управленческого персонала. Из-за сложного характера построения железных дорог данные и другая информация разрозненны и не централизованы. Каждая профессиональная система действует независимо, что приводит к снижению единства и безопасности управления данными. Собственник не может реализовать картину своевременно и эффективно. Таким образом, в этом контексте строится иерархическая интеллектуальная система управления строительством, в которой доминирует строительная единица [32].

В конкретном проекте, все участники должны участвовать в строительстве, получать соответствующие разрешения от системы в соответствии с различными потребностями, каждый участник предполагает, что ему

и каждый выполняет свои обязанности, чтобы эффективно реализовать проект координации. Измерение «технологической поддержки» соответствует профессиональному уровню в теории Холла. Конкретные машинные технологии могут включать в себя технологии BIM, GPS и ГИС, технологии прогнозирования алгоритмов и обучения, технологии интернета вещей и искусственного интеллекта, интернет-технологии и облачную платформу, технологии больших данных и облачных вычислений, которые используются на протяжении всего жизненного цикла и на всех уровнях управления. Это основанная на системной структуре технология для достижения управления затратами, управления графиком, контроля качества, управления контрактами, управления информацией и т.д. Различные функции интеллектуального управления проектами могут начинаться с единой локальной аналитики и, в конечном итоге, придумывать простые и понятные органические идеи, а затем реализовывать общие принципы интеллектуального управления бизнесом [32].

В последние годы Китай резко увеличил развитие внутренних железнодорожных линий, в том числе высокоскоростных и тяжеловесных железных дорог, до такой степени, что к концу 2021 года занял первое место в мире с общим пробегом высокоскоростных железных дорог, превышающим 40 000 км [33]. В Национальном комплексном трехмерном плане планирования транспортной сети, опубликованном Центральным комитетом Коммунистической партии и Государственным советом, Китай увеличит развитие всеобъемлющей трехмерной транспортной сети по всей стране, которая будет включать 56 000 км высокоскоростных железных дорог. Плитные пути являются важной базовой конструкцией для облегчения и поддержки высокоскоростных поездов благодаря их преимуществам плавности, устойчивости и минимальных требований к техническому обслуживанию. Китайские системы плитных путей прошли этапы внедрения, поглощения и повторных



инноваций, прежде чем перейти к независимым инновациям. Все высокоскоростные железнодорожные линии с проектной скоростью 350 км/ч и выше должны проходить по плитчатым путям. На рисунке 6 показаны четыре основных типа плитных дорожек. Это сборные плитные пути CRTS (China Railway Track System) I; CRTS II сборный плитный путь; Сборный плитный путь CRTS III; и двухблочная плитная колея [33]. С развитием информационных технологий и методов сбора данных ежедневно генерируются огромные

объемы сложных, массовых данных. В настоящее время в большинстве систем используется деинтегрированное управление данными между этапами проектирования, строительства и эксплуатации и технического обслуживания, что создает огромные проблемы для каждого функционального отдела. Не менее важно учитывать неправильное управление и применение данных, что приводит к неадекватному или чрезмерному ремонту путевых структур, что приводит к увеличению затрат и потребления ресурсов на каждом этапе [33].

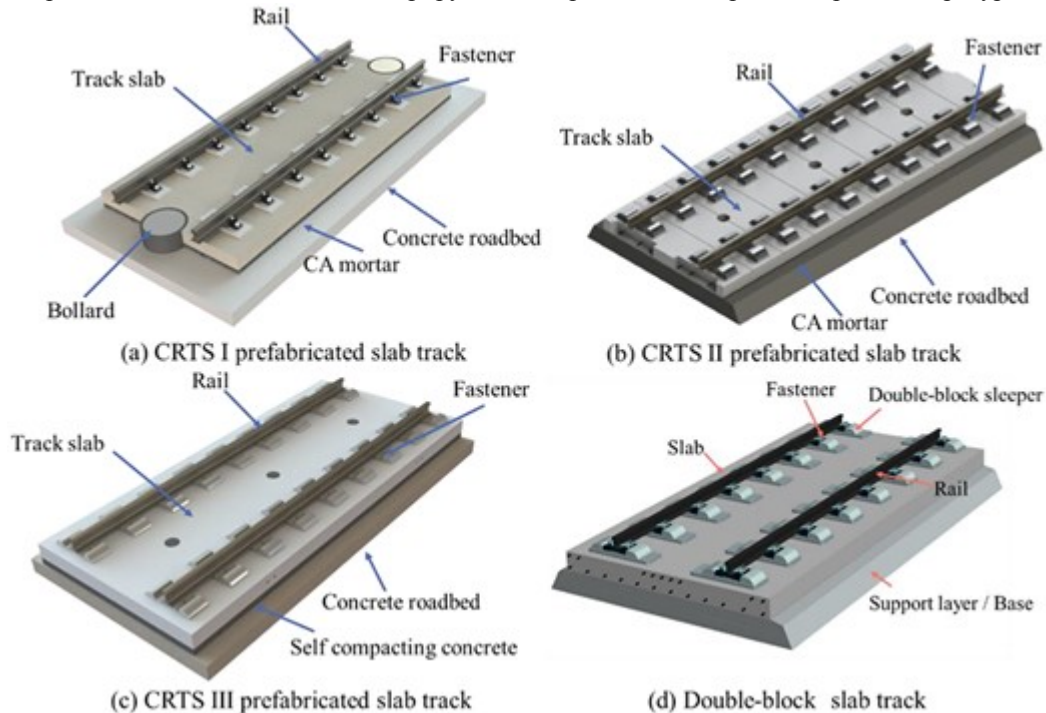


Рис. 6. Типы строения плитных путей широко используются в Китае [33].

С точки зрения экономического и устойчивого развития, полный жизненный цикл плитных путей относится к концепции проектирования, которая учитывает все этапы путевой структуры на ранней стадии проектирования, интегрируя планы и анализируя проблемы, которые могут возникнуть на последующих этапах строительства и эксплуатации путевой структуры [33]. В отличие от традиционных методов, которые не позволяют единообразно управлять данными на разных этапах, подход к управлению данными на протяжении всего жизненного цикла позволяет накапливать и управлять данными, генерируемыми на разных этапах, минимизируя затраты на проектирование и обслуживание путевой структуры.

Для интеграции управления огромным количеством сложных типов данных на протяжении всего жизненного цикла плитных путей необходимо учитывать следующие аспекты: научный и эффективный сбор данных о плитных путях; устранение барьеров, связанных с данными, для обеспечения возможности обмена данными и информацией между различными этапами и различными отделами; а также анализ массовых данных высокоскоростных железнодорожных плитных путей для более точной оценки и

прогнозирования состояния путевой структуры. Решение этих проблем является ключом к оптимизации конструкции путевой структуры, минимизации затрат на строительство и содержание плитного пути, снижению ресурсоемкости и дальнейшему увеличению срока службы путевой структуры [33].

Интеллектуальные строительные технологии являются единственным способом реализации строительства и модернизации высокоскоростных железных дорог и всячески поддерживают строительство «умных» железных дорог, считают в работе [34]. С точки зрения технологии интеллектуального проектирования пути, реализуется цифровое, динамическое и визуальное проектирование пути, что меняет способ, которым традиционное проектное подразделение предоставляет только строительные чертежи. Затем проектное подразделение предоставляет цифровые результаты проектирования путей в дополнение к строительным чертежам, способствуя интеллектуальному производству, строительству, эксплуатации, техническому обслуживанию и т. д. С точки зрения интеллектуальной конструкции путевых плит, традиционная технология строительства пути модернизируется за счет использования результатов интеллектуального проектирования пути, а данные с тахеометра, вагонетки

для осмотра рельсов, тетрадей и соответствующего инструмента автоматически собираются, контролируются и корректируются. Механизм сбора, анализа, статистики и прогнозирования безбалластного пути создан для формирования технологии интеллектуального строительства пути «сбор данных, проникновение данных, обмен данными и открытость, отслеживание и отслеживание данных». В части комплектов программного обеспечения для путевого интеллектуального строительства предлагается серия программного обеспечения для интеллектуального проектирования, производства, строительства и комплекты интеллектуального строительного оборудования, что значительно повышает уровень интеллектуального строительства [34].

Безбалластный путь является одной из основных технологий высокоскоростных железных дорог, и именно на его примере мы покажем основные моменты интеллектуального строительства. Путьевая структура напрямую воздействует на основание, деформация опорного сооружения напрямую влияет на плавность хода и устойчивость пути, а качество и точность строительства напрямую влияют на безопасность и комфорт эксплуатации скоростного поезда. Путеводство

имеет следующие характеристики (Рисунок 7) [34].

1. Требования к высокой точности: требуемая точность укладки рельсов составляет  $\pm 1$  мм, точность изготовления путевого плиты составляет от  $\pm 0,5$  до  $-1$  мм; точность пресс-форм от 0,3 до 0,5 мм; Точность толщины монолитного бетона составляет от 0 до 10 мм.

2. Короткий срок строительства, а сроки завершения достаточно близки к открытию эксплуатации: после завершения инженерного строительства пути он войдет в совместный опытно-испытательный период. Качество пути нужно строго контролировать, а времени на починку и ремонт нет [34].

Указанное выше формирует технологию динамического проектирования процесса строительства безбалластного пути, технологию измерения и управления строительством высокоскоростных железнодорожных безбалластных путей на основе данных и интеллектуальную технологию управления, которая реализует высокоточное управление и автоматическое измерение и управление процессами строительства безбалластных путей, закладывает основу для интеллектуальных железных дорог и способствует развитию железнодорожного строительства на основе интеллектуального подхода (Рисунок 7).

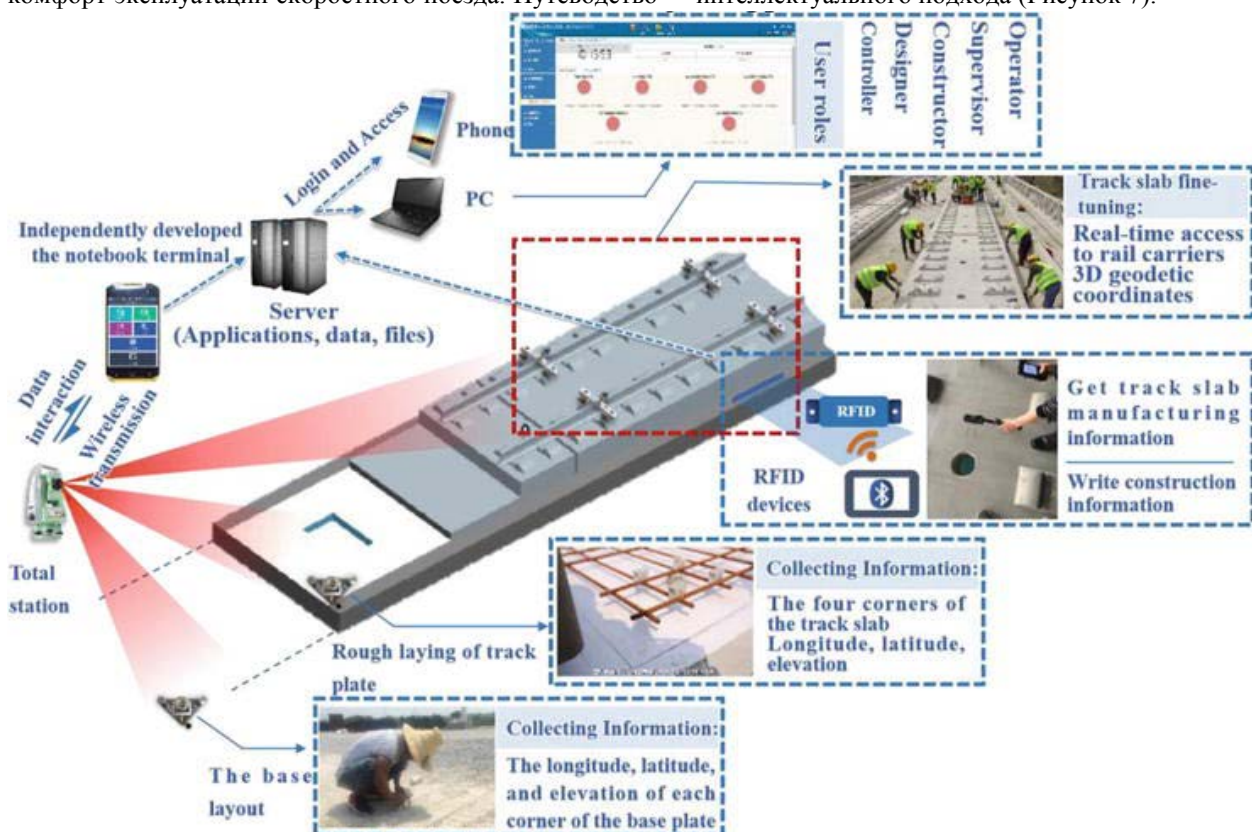


Рис. 7. Общая техническая схема безбалластного пути интеллектуального строительства [34].

Безбалластный путь в значительной степени подвержен влиянию изменений в основании, таких как земляное полотно, мосты и туннели. Интеллектуальное обновление результатов проектирования и полная интеллектуальная эксплуатация с динамическим строительным оборудованием на основе данных

является ключом к повышению эффективности строительства безбалластных путей и контролю качества. На основе собранных данных всего строительного процесса, с учетом изменений основания, таких как земляное полотно, мост и туннель, в качестве входных условий, реализуется динамический расчет плоскости и высоты бетонного основания и путевого плиты. Решаются такие проблемы, как крепление на конце балки, превышающее стандартное требование,

контроль свисания бетонной опорной плиты и точный контроль геометрического размера безбалластного пути. Реализуется динамическое обновление проектных результатов в процессе строительства, а также преодолеваются динамические проблемы проектирования, такие как изменение стыковки на большепролетных мостах, деформационные швы и изменение положения переходных участков [34].

В период строительства, из-за большой разницы между фактическими условиями работы основания, такого как земляное полотно, мост и туннель, и предполагаемыми проектными условиями работы, безбалластный путь необходимо динамически регулировать в соответствии с фактическими условиями работы. Схема трассы выглядит следующим образом [34]:

1. Путем настройки различной длины путевой плиты и

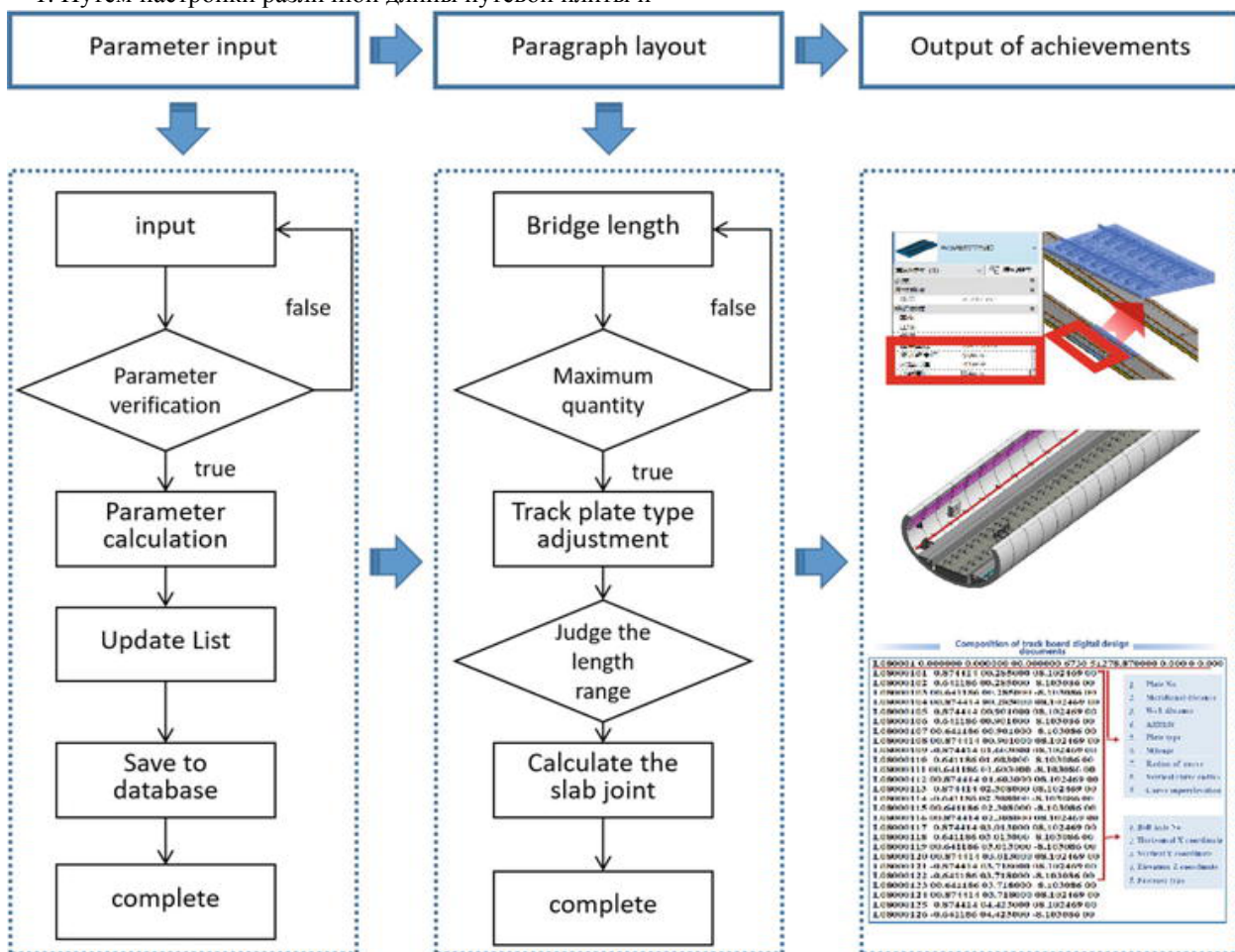


Рис. 8. Принципиальная схема алгоритма компоновки пути [34].

Путевая структура состоит из стальных рельсов, креплений, путевой плиты и т.д. Существует множество типов компонентов путей. Чтобы избежать повторного создания моделей, в конкретной реализации [34] разработана библиотека компонентов. Для создания моделей компонентов использовались единые стандарты и форматы, такие как классификация компонентов, наименование, стандарты материалов, точность моделирования и т.д.; Разработка параметрических

регулировки зазора путевой плиты в соответствии с требованиями к компоновке компоновка путевой плиты разведируется на стыке моста, осадочном шве, деформационном шве земляного полотна и моста, земляном полотне и тоннеле, границе моста и тоннеля и т. д.

2. Путевая плита ложится на такую балку, как балка длиной 24, 32 м, и обычно используемая неразрезная балка и другие области стандартизированной компоновки, при планировке пути следует учитывать равномерность расстояния между шпалами и максимальное расстояние между крепежами на конце балки и другие ограничения.

На рисунке 8 показана принципиальная схема алгоритма компоновки пути.

модулей для построения моделей одного типа, но с разными размерами, таких как плиты пути и основания; Реализация унифицированного управления моделями компонентов для облегчения повторного использования компонентов на всех этапах [34]. На основе единой системы кодирования построен рабочий макет путевого агрегата. Создавайте модели компонентов с фиксированными размерами, такие как рельсы, крепежные элементы и шпалы, путем ввода проектных параметров можно получить параметризованное проектирование различных типов путевых плит и различных оснований плоского сечения. Например,



безбалластные путевые структуры (путевые плиты и т.д.) могут быть быстро спроектированы в соответствии с информацией о нестандартных плитах и значениях выража кривых, сгенерированных при проектировании компоновки. Создание составной модели осуществляется путем ввода фасада, компоновочного проекта и т.д. В сочетании с моделью компонента и данными инженерного проектирования пути, модель

пути может быть быстро создана и обновлена в соответствии с изменениями соответствующей профессиональной информации. С помощью человеко-машинного взаимодействия создание компонентов пути, генерация модели данных, компоновка цифровой 3D-модели и т.д. осуществляется через интерфейс системы (Рисунок 9).

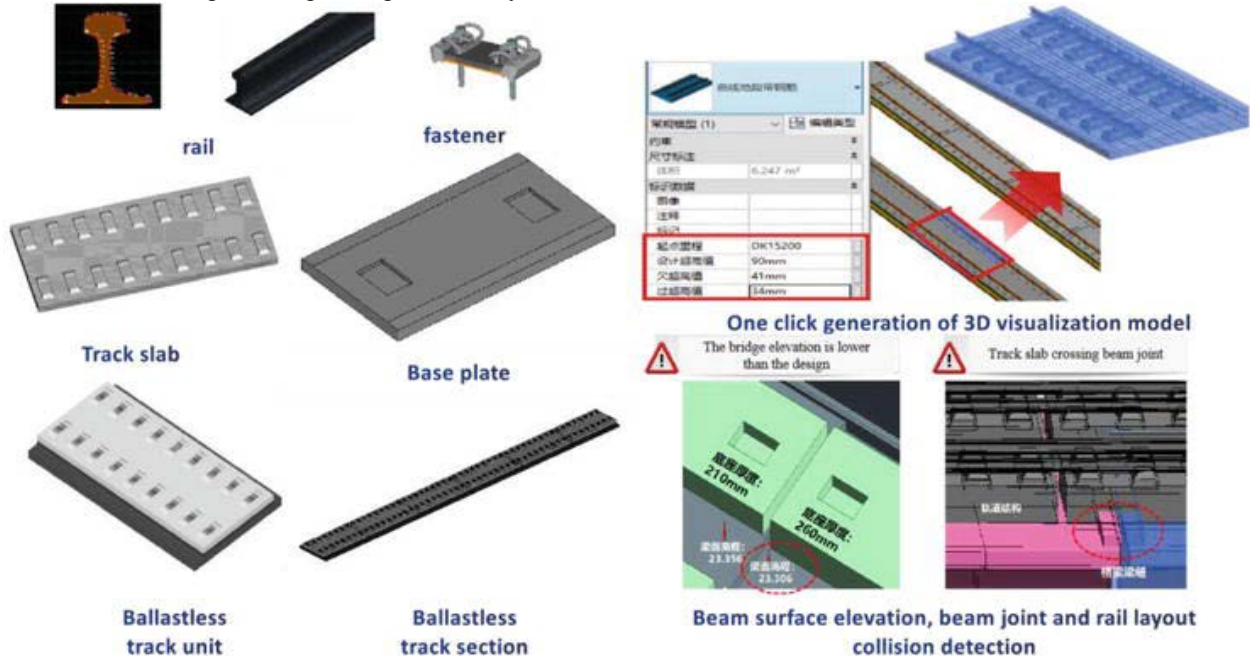


Рис. 9. Построение 3D модели и технология обновления безбалластного пути [34].

На основании геометрических размерных данных пути в результатах проектирования определяется автоматическое измерение осевой линии пути, трехмерных координат левого и правого рельсов, расчет поперечных и вертикальных отклонений пути. На основе разработанного информационного оборудования путевой инспекционной тележки определен автоматический сбор данных о геометрии и положении пути. Распределение толщины плиты полотна пути

анализируется в режиме реального времени путем измерения информации о высоте верха рельса и объединения данных высот базовой плиты/несущего слоя; Определить ежегодный анализ данных точной регулировки рельсовой панели, данных повторных испытаний после заливки и данных точной регулировки рельса, чтобы обеспечить поддержку для получения закона вариации конструктивного отклонения рельсовой панели, улучшения процесса строительного контроля, а также обеспечить предварительную основу для последующей точной регулировки рельса (Рисунок 10).

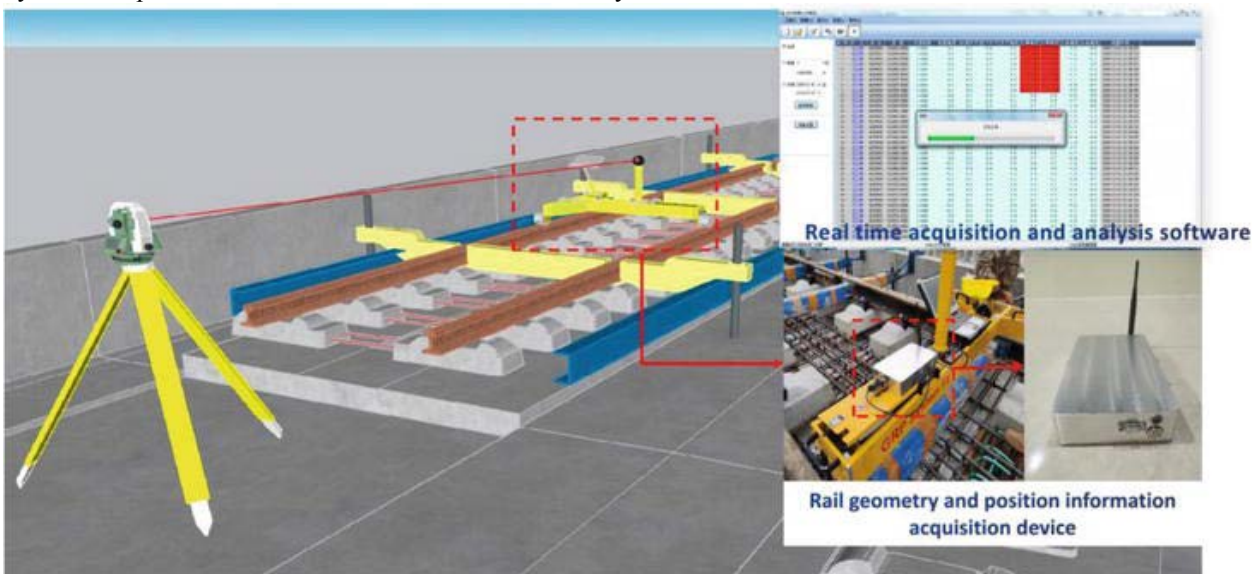


Рис. 10. Точная регулировка рельсовой панели и рельса на основе данных [34].



контроля в интеллектуальном строительстве ВСМ берет за основу интеллектуальную платформу управления и контроля, а в качестве основы данных берут «достижения проектных данных» и «динамические файлы данных всего строительного процесса». Ядром управления и контроля является прогресс и точность всего процесса строительства безбалластного пути. В ходе управления и контроля анализируется, оценивается и подсчитывается ход и качество строительства путей в соответствии с установленными требованиями к допускам, быстро анализируя данные строительных изысканий на месте [34]. Эта система может предоставить подробную и удобную статистическую информацию для руководителей строительства проектов, обеспечит динамическое управление процессом строительства путей на площадке, повысит эффективность управления и повысит качество строительства.

Основные функции этой системы заключаются в следующем (согласно [34]):

1. Контроль точности строительства: отклонение высоты автономной поверхности фундамента, тип плоской линии базовой плиты/несущего слоя, контроль высоты и толщины, контроль толщины бетона и высоты плиты полотна пути, точный контроль рельсовой панели и укладки длинных стальных рельсов и т. д.

2. Управление ходом отслеживания: В сочетании с проектной моделью 3D-визуализации пути достигается управление ходом выполнения визуализации.

3. Управление статистикой отчетов: автоматическое создание отчета о ходе работы и прецизионного отчета о качестве.

4. Раннее предупреждение и прогнозирование: управление предельными значениями, установка значений раннего предупреждения, автоматическое раннее предупреждение об отклонениях от конструкции и т. д.

5. Утверждение и управление инспекционными партиями бетона, арматуры и испытаний в режиме онлайн.

6. Управление цифровыми активами, такими как полнофункциональная 3D-модель и информационная модель строительства в режиме реального времени.

7. Управление организацией и структурой: Наделение полномочиями руководящего персонала строительных подразделений, подразделений надзора и строительных подразделений.

В [34] описывается технология интеллектуального строительства безбалластных путей высокоскоростных железных дорог с точки зрения трех аспектов: технология динамической регулировки конструкции, технология измерения и управления строительством, основанная на технологии интеллектуального управления строительством, основанной на данных и интеллектуальной технологии управления строительством. Благодаря применению вышеуказанных технических мер традиционный ручной расчет,

измерение, регулировка и управление заменяются новым интеллектуальным режимом. В настоящее время, после более чем 10 лет исследований, эта технология продвинулась вперед, чтобы сформировать полную техническую систему, которая была применена в более чем 11 проектах высокоскоростных железных дорог, таких как Чжэн-Сюй, Чан-Ган, Шан-Хэ-Хан и Фу-Ся. Реализовано субмиллиметровое прецизионное управление безбалластным пути, повышается эффективность и интеллектуальный уровень строительства, достигаются значительные социально-экономические выгоды [34].

Будучи многослойной бетонной конструкцией, плитный путь подвержен деформации и отклеиванию при длительных нагрузках поезда и экстремальных условиях, что влияет на гладкость железнодорожных линий и, следовательно, на безопасность поезда. Одним методом обнаружения невозможно получить точное деформационное состояние путевой структуры и сложные условия окружающей среды в течение длительного времени. В связи с этим необходимо внедрить некоторые методы мониторинга для получения данных в режиме реального времени и установления индексов раннего предупреждения посредством интегрированного управления данными полного жизненного цикла, следуя [33].

С точки зрения мониторинга деформации путевой структуры и фундамента, традиционные механические и электрические методы мониторинга состоят из измерений нормального уровня, наблюдательных кольцевых приборов статического уровня, магнитно-кольцевых расчетных приборов, приборов для осадки профиля и так далее. Эти методы имеют низкую эффективность измерений, большие погрешности измерений и высокую трудоемкость, а также уязвимы к воздействию на окружающую среду. Еще одним недостатком является то, что их нельзя отслеживать в режиме онлайн, чтобы получить деформационное состояние путевой структуры в режиме реального времени. Технология волоконно-оптического зондирования кажется лучшим решением для преодоления этих недостатков и привлекла широкое внимание, как отмечено в [33]. Волоконно-оптическая сенсорная технология обладает характеристиками защиты от электромагнитных помех, высокой чувствительностью к коррозионной стойкости. Он может выполнять как зондирование, так и передачу, включая технологию распределенного оптоволоконного зондирования и технологию оптической решетки [33] (см. рис. 11). Первый подходит для мониторинга на больших расстояниях в режиме реального времени благодаря большому диапазону измерения, а второй подходит для одноточечных точных измерений в режиме реального времени. Технология волоконно-оптического зондирования широко используется для мониторинга деформации рельсов и мониторинг деформации фундамента [33,35,36]

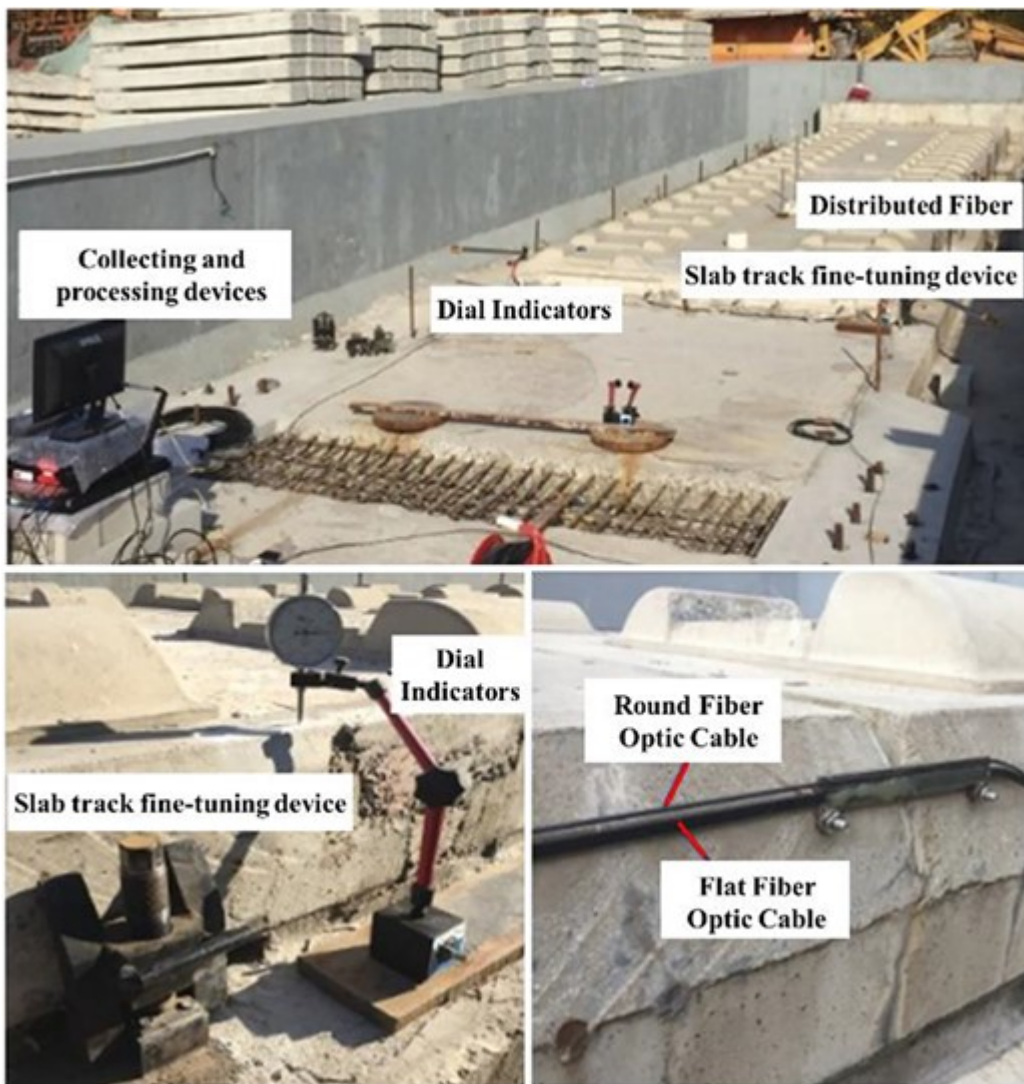


Рис. 11. Мониторинг верхней арки дорожки плиты с помощью распределенного оптического волокна [33].

С точки зрения мониторинга температурных данных, широкое распространение высокоскоростных железных дорог в Китае в сочетании с экстремальным климатом страны может привести к образованию верхних сводов на сплошных плитных путях при высоких температурах, в то время как низкие температуры могут привести к растрескиванию компонентов пути и замерзанию, приводящему к пучению, что подрывает долговечность плитных путей и влияет на безопасность [33]. В настоящее время основным способом реализации мониторинга температурных данных является установка датчиков температуры оптоволоконных решеток, которые отслеживают температуру воздуха и рельсов, а также температурный градиент колеи плиты и температуру грунта основания под рельсами [33]. Иногда также используются инфракрасные сканеры, но оба метода требуют проводов и кабелей или

портативных генераторов для подачи питания на оборудование мониторинга, что приводит к высоким трудозатратам и затратам ресурсов. Развивается технология интеграции микроминиатюрных термоэлектрических устройств преобразования энергии на основе термоэлектрического эффекта [33]. Микрокомпактные термоэлектрические элементы скрыты внутри многослойной трековой структуры для извлечения данных о разнице температур с помощью термоэлектрических сигналов [33], что эффективно снижает ограничения источника питания. Кроме того, принцип теплопередачи и конечно-элементное моделирование могут быть использованы для установления картографической взаимосвязи между температурным полем пути плиты и городскими метеорологическими данными, ориентацией пути плиты, топографией и т.д., чтобы обеспечить экономичный метод измерения полной информации о температуре пути [33] (рис. 12).

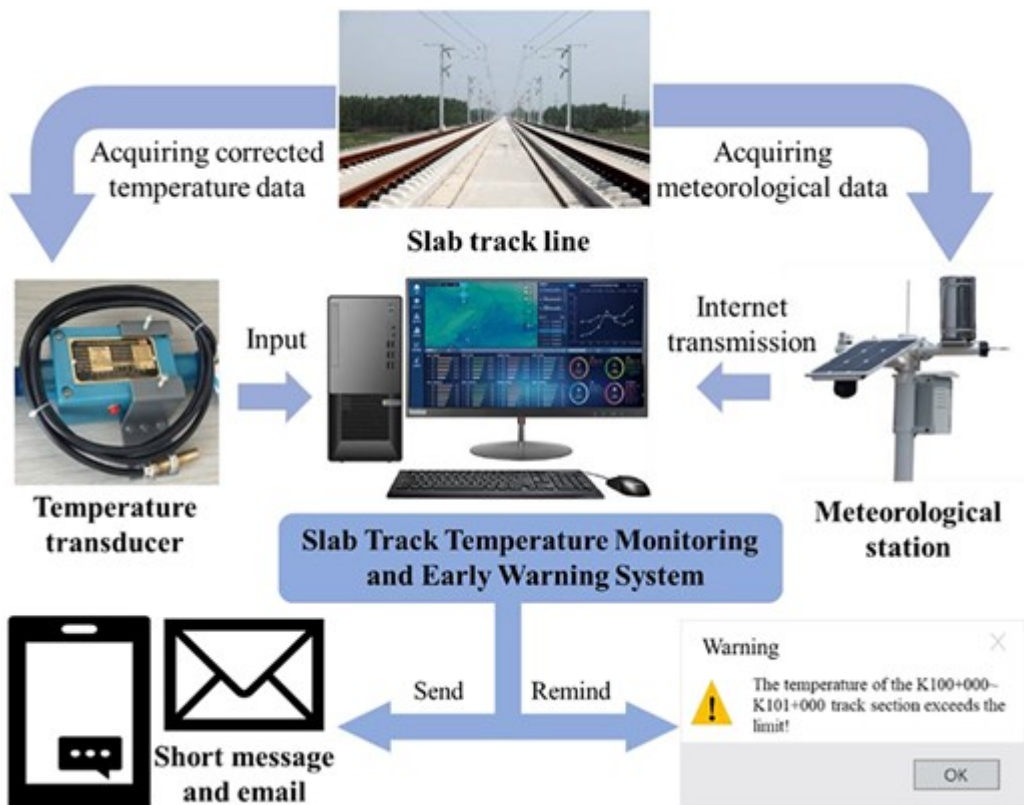


Рис. 12. Система мониторинга температуры и раннего предупреждения о движении плиты [33].

По мере увеличения научно-технических ресурсов в проектировании плитных путей используются инновационные методы обнаружения и мониторинга, позволяющие своевременно получать данные о заболеваниях и выполнять периодическое и профилактическое обслуживание рельсового пути. Однако остается еще много вопросов, достойных дальнейшего изучения и обсуждения. Например, для повышения точности и эффективности обнаружения необходимо улучшить механизацию и интеллектуальность обнаружения заболеваний на плитах, особенно за счет использования 3D-лазерного распознавания изображений, роботов и технологий интеллектуального распознавания БПЛА (беспилотных летательных аппаратов). Для непрерывного мониторинга состояния рельсового пути в будущем следует изучить более интеллектуальные и эффективные методы мониторинга, чтобы визуально в режиме реального времени контролировать качество компонентов рельсового пути, обеспечивая полезное количество эффективных данных для базы данных полного жизненного цикла рельсовых путей и поддерживая нормализованное техническое обслуживание и ремонт [33].

В идеологии интеллектуального строительства ВСМ создано множество исследований и реализаций. Перечислим лишь некоторые публикации на эту тему:

1. Автоматизированная генерация движения дорожных катков [37,38]
2. Интеллектуальное измерение величины уплотнения

при контроле вариативности качества уплотнения земляного полотна [39,40,41]

3. Анализ критических факторов для разработки интеллектуальной строительной площадки: подход, основанный на DEMATEL-ISM [42]

4. Интеллектуальное определение размера и положения арматурных стержней с помощью улучшенного DeerlabV3+ [43]

5. Интеллектуальное строительство и управление ландшафтами с помощью информационного моделирования зданий и смешанной реальности [44]

6. Гибридная сегментация трещин на уровне пикселей для безбалластной путевой плиты с использованием модели цифрового двойника и слабо контролируемого переноса стиля [45].

### III ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В области железнодорожной инфраструктуры ВСМ интеллектуальное строительство на базе BIM и других технологий имеет большой потенциал для развития, поскольку он революционизирует способ традиционного проектирования САПР, а также повышает функциональную совместимость. Благодаря более широкому совместному использованию, сотрудничеству и обмену информацией между многими проектными дисциплинами и программным обеспечением в рамках интеллектуального строительства ВСМ можно снизить риски и непредвиденные происшествия на объекте из-за интерференции между архитектурными, структурными и инженерными объектами. Любые изменения данных, необходимые на этапе проектирования, могут систематически обрабатываться и поддерживаться на протяжении всего жизненного цикла проекта, поскольку информация сохраняется в виде базы данных в BIM и в



других машиночитаемых цифровых ресурсах [47,48,49]. Предполагаемые выгоды от внедрения методологии BIM в железнодорожных проектах ВСМ значительны и включают в себя контроль затрат, поддержку принятия решений, снижение ошибок проектирования, обнаружение проблем с интерфейсом, улучшение визуального восприятия, поддержку сборных конструкций, поддержку планирования технического обслуживания и управления инфраструктурой (см., например, [47,48,49]). Благодаря специальным функциям, таким как дренажные сети для платформенных вод, вспомогательные работы и вспомогательные услуги, BIM-платформа позволяет создавать 3D-модель железнодорожной инфраструктуры на основе выравнивания и поперечного сечения. Этот метод отличается определением классов объектов, что позволяет разбить проект железнодорожной линии на определенное количество информационных компонентов. Используя эту методологию, план железной дороги, продольный профиль и поперечные сечения из модели могут быть извлечены и изменены в любое время, а конструкция может быть динамически и/или параметрически изменена. Однако, несмотря на то, что в последнее время был достигнут значительный прогресс в разработке *ifcObjects* для объектов железнодорожных линий, таких как рельсы, земляное полотно, туннели и мосты, для того, чтобы в полной мере воспользоваться возможностями этой методологии, необходимо решить множество проблем взаимодействия между различными программами.

Текущее управление данными по рельсовым системам на этапах проектирования, строительства, эксплуатации и технического обслуживания разделено из-за несогласованных форматов данных, в результате чего

многие вопросы не учитываются при интегрированном управлении полным жизненным циклом. Разрозненные данные на различных этапах препятствуют их полноценному использованию, что наносит ущерб работе по управлению и принятию решений [33]. Каждая фазовая система должна обрабатывать большой объем данных, большая часть которых также является связанными данными, иногда даже одними и теми же данными. Таким образом, в работе [33] предлагается интегрированная система управления, позволяющая свести данные воедино на каждом этапе и в полной мере использовать ценность данных на разных этапах (рис. 13). В статье [33] рассматриваются подсистемы управления данными на этапе проектирования, строительства и эксплуатации и технического обслуживания плитных путей. Эти три подсистемы служат различным целям, связанным с предоставлением платформы для управления данными и запросов для проектирования, строительства, эксплуатации и технического обслуживания и т. д. Задачи каждого этапа взаимосвязаны, а данные тесно связаны, а это значит, что завершение предыдущего этапа окажет влияние на следующий этап. База данных Oracle 19C в системе, описанной в работе [33], используется для унификации формата данных и установления связей с данными на каждом этапе. Данные, сгенерированные на каждом этапе, хранятся в каждой подсистеме с одинаковым типом данных, размером формата данных и т. д. для совместного использования данных. Система описывает различные формы атрибутивной информации данных с помощью метаданных и реализует синхронизацию данных в режиме реального времени за счет централизованного управления данными, что эффективно усиливает взаимодействие каждого этапа.

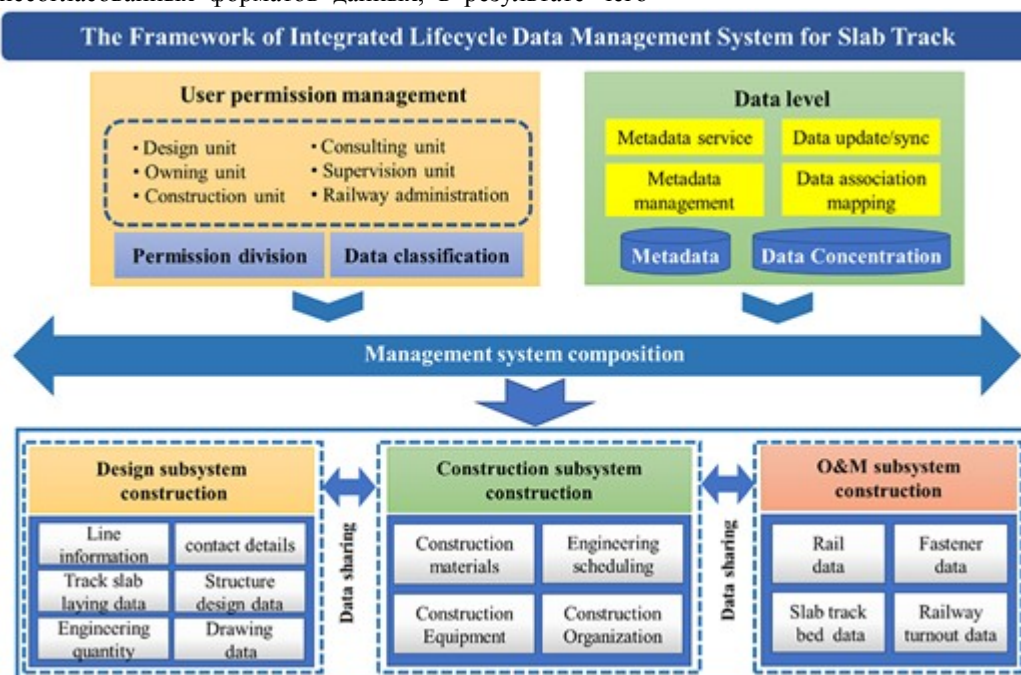


Рис. 13. Структура комплексной системы управления данными о полном жизненном цикле плитных путей [33].

В 2022 году зимние Олимпийские и Паралимпийские игры прошли в Пекине и Чжанцзякоу. Чтобы обеспечить



безопасность, удобство и пунктуальность перевозок между двумя городами и тремя зонами соревнований, Китай начал строительство железнодорожной магистрали интеллектуальной ВСМ (HSR) Пекин – Чжань. В качестве первой HSR при ее проектировании, строительстве и эксплуатации используются 5G, BIM, большие данные, искусственный интеллект, АТО и другие новейшие технологии. Высокоскоростная железная дорога Пекин-Чжанцзяоу была открыта в 2019 году и сыграла решающую роль в транспортном обеспечении Зимних Олимпийских игр [50].

Последние достижения HSR под руководством системной архитектуры систематически демонстрируются на высокоскоростной железной дороге Пекин-Чжанцзяоу. В области интеллектуального строительства были реализованы комплексные интеллектуальные исследования «космос-воздух-земля» и совместное проектирование на основе BIM, цифровые заводы, такие как интеллектуальная балочная станция, интеллектуальная станция путевых плит, интеллектуальная двухблочная шпальная станция и интеллектуальный машинный песок. Построена перерабатывающая площадка, внедрены комплексные интеллектуальные технологии строительства мостов, туннелей, земляного полотна, путей, пассажирских станций и коммуникаций, сигнализации, электроснабжения и электрификации, а также разработана и применена платформа инженерного управления на основе BIM + GIS. В области интеллектуального оборудования были разработаны интеллектуальные электропоезда с такими функциями, как интеллектуальное вождение, интеллектуальная безопасность и интеллектуальное обслуживание. Впервые реализовано автоматическое вождение высокоскоростных поездов со скоростью 350 км/ч на базе CTC3+АТО. Ограничения были сняты для новой технологии управления работой поездов с такими функциями, как подвижной блок и комплексное дистанционное управление станционной зоной, интеллектуальная система тягового электропитания с голографическим восприятием, многомерное слияние, реконструкция и самовосстановление, а также интеллектуальная эксплуатация и техническое обслуживание. Была предложена интеллектуальная система связи, состоящая из 5G-R, несущей сети и мультимедийной диспетчерской связи, а также создана интеллектуальная система проверки и мониторинга, охватывающая инфраструктуру, мобильные устройства, вторжение по периметру, внешнюю среду и стихийные бедствия. В области интеллектуального управления были обновлены интеллектуальные пассажирские станции с такими функциями, как автоматическое информационное обслуживание и интеллектуальный управленческий контроль, была разработана интеллектуальная система продажи билетов с характеристиками перцептивной автоматизации, сервисной сети и автономного выполнения, были решены ключевые технические проблемы. решено для

интеллектуальной подготовки схемы поездов, интеллектуального централизованного управления движением и интеллектуальной комплексной диспетчеризации, а также интеллектуальной системы эксплуатации и технического обслуживания инфраструктуры, PHM и интеллектуальной системы эксплуатации и технического обслуживания электропоездов. Что касается базовой платформы, то построен первый основной центр обработки данных на базе облачных вычислений в железнодорожной отрасли, разработана и развернута платформа обслуживания железнодорожных данных, озеро данных интеграции «температура-детализация-чувствительность» и анализ данных. Был усовершенствован алгоритм совмещения «общего и частного» и создана железнодорожная сервисная платформа BIM [50].

Применение методов интеллектуального строительства ВСМ в Китае привело быстрому росту масштаба рынка интеллектуального строительства в Китае (рисунок 14). Поэтому, нам представляется правильным рассмотреть возможности внедрения не только в интеллектуальном строительстве ВСМ, но и в других отраслях России.

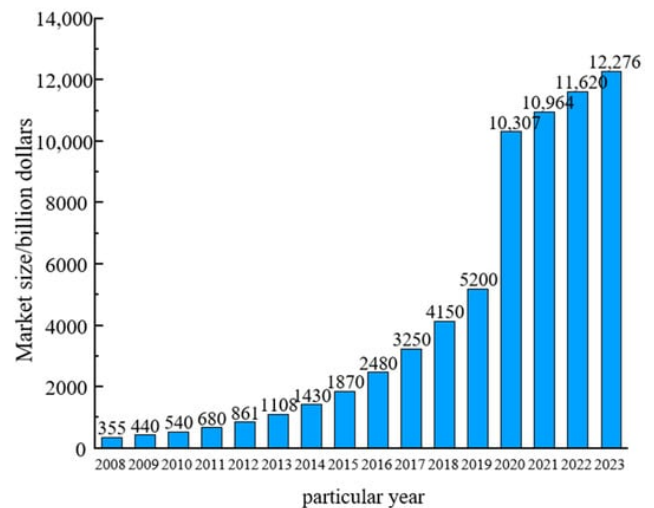


Рис. 14. Масштаб рынка интеллектуального строительства в Китае [46].

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Хотелось бы выразить благодарность сотрудникам НОЦ ЦВТС за обсуждения и ценные замечания.

Статья продолжает серию публикаций, начатых работой об основах цифровой экономики [52]. И традиционное замечание, что все публикации в журнале INJOIT, связанные с цифровой повесткой, начинались с работ В.П. Куприяновского и его соавторов [53-55].

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Corallo, A.; Del Vecchio, V.; Lezzi, M.; Luperto, A. Model-Based Enterprise Approach in the Product Lifecycle Management: State-of-the-Art and Future Research Directions. *Sustainability* 2022, 14, 1370. <https://doi.org/10.3390/su14031370>
- [2] Куприяновский, В. П., et al. "Новая парадигма цифровой железной дороги-стандартизация жизненного цикла активов." *International Journal of Open Information Technologies* 5.2 (2017): 64-84.

- [3] Organising qualitative data into asset databases to standardise reports and improve BIM practices <https://learninglegacy.hs2.org.uk/document/organising-qualitative-data-into-asset-databases-to-standardise-reports-and-improve-bim-practices/> Retrieved: Apr, 2024
- [4] Ruemler, S.P.; Zimmerman, K.E.; Hartman, N.W.; Hedberg, T., Jr.; Feeney, A.B. Promoting Model-Based Definition to establish a complete product definition. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2017, 139, 051008.
- [5] Alemanni, M.; Destefanies, F.; Vezzetti, E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011, 52, 1–14.
- [6] Hedberg, J.T.; Lubell, J.; Fischer, L.; Maggiano, L.; Feeney, A.B. Testing the Digital Thread in Support of Model-Based Manufacturing and Inspection. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 2016, 16, 021001.
- [7] Hartman, N.; Rosche, P.; Fischer, K. A framework for Evaluating Collaborative Product Representations in Product Lifecycle Workflows. In *Proceedings of the IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*, Montreal, QC, Canada, 8–12 July 2012.
- [8] Куприяновский, В. П., et al. "Экономические выгоды применения комбинированных моделей BIM-ГИС в строительной отрасли. Обзор состояния в мире." *International Journal of Open Information Technologies* 4.5 (2016): 14-25.
- [9] Куприяновский, В. П., et al. "Bim на железных дорогах мира-развитие, примеры, стандарты." *International Journal of Open Information Technologies* 8.5 (2020): 57-80.
- [10] Куприяновский, В. П., et al. "BIM на пути к IFC5-выравнивание и развитие семантики и онтологий IFC с UML и OWL для структур автомобильных и железных дорог, мостов, туннелей, портов и водных путей." *International Journal of Open Information Technologies* 8.8 (2020): 69-78.
- [11] M. Shimizu, S. Perinpanayagam, B. Namoano and A. Starr, "Real-Time Prognostics and Health Management Without Run-to-Failure Data on Railway Assets," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 28724-28734, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3259221
- [12] P. McMahon, T. Zhang and R. A. Dwight, "Approaches to Dealing With Missing Data in Railway Asset Management," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48177-48194, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978902.
- [13] Kour, R.; Castaño, M.; Karim, R.; Patwardhan, A.; Kumar, M.; Granström, R. A Human-Centric Model for Sustainable Asset Management in Railway: A Case Study. *Sustainability* 2022, 14, 936. <https://doi.org/10.3390/su14020936>
- [14] Litherland J, Andrews J. A Petri net asset management framework for railway switches and crossings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* 2023;237(3):322-334. doi:10.1177/09544097221110970
- [15] Vieira, J., Patrício, H., Poças Martins, J., Gomes Morgado, J., Almeida, N. (2023). The Potential Value of Digital Twin in Rail and Road Infrastructure Asset Management. In: Crespo Márquez, A., Gómez Fernández, J.F., González-Prida Díaz, V., Amadi-Echendu, J. (eds) 16th WCEAM Proceedings. WCEAM 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2_42)
- [16] Alice Consilvio ,José Solís-Hernández ,Noemi Jiménez-Redondo,Paolo Sanetti ,Federico Papa , Iñigo Mingolarra-Garaizar On Applying Machine Learning and Simulative Approaches to Railway Asset Management: The Earthworks and Track Circuits Case Studies, *Sustainability* 2020, 12(6), 2544; <https://doi.org/10.3390/su12062544>
- [17] P. McMahon, T. Zhang and R. Dwight, "Requirements for Big Data Adoption for Railway Asset Management," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 15543-15564, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967436.
- [18] K. K. Naji, M. Gunduz, F. H. Alhenzab, H. Al-Hababi and A. H. Al-Qahtani, "A Systematic Review of the Digital Transformation of the Building Construction Industry," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 31461-31487, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365934.
- [19] Shim, C., Moon, H. (2024). Recent BIM Developments and Applications on Railway Infrastructure. In: Ribeiro, D., Montenegro, P.A., Andersson, A., Martínez-Rodrigo, M.D. (eds) *Digital Railway Infrastructure. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-49589-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-49589-2_11)
- [20] Alqatawna A. et al. BIM-centered high-speed railway line design for full infrastructure lifecycle //Automation in Construction. – 2023. – Т. 156. – С. 105114.
- [21] Zhou M. et al. Xiong'an station, China—how the largest station in Asia was built in just 2 years //Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. – Thomas Telford Ltd, 2022. – Т. 175. – №. 3. – С. 113-118. <https://doi.org/10.1680/jcien.21.00172>
- [22] RB Rail's BIM documentation <https://www.railbaltica.org/rb-rail-as-bim-documentation/> Retrieved: Apr, 2024
- [23] Rail Baltica BIM Documentation RB Rail AS <https://www.globalbim.org/info-collection/rail-baltica-bim-documentation/> Retrieved: Apr, 2024
- [24] Digital Engineering and BIM 4.04.2024, <https://www.hs2.org.uk/building-hs2/innovation/digital-engineering-and-bim/> Retrieved: Apr, 2024
- [25] Shin, M.-H.; Kim, H.-Y.; Liao, J.-F. Performance Measurement and Analysis of Building Information Modeling (BIM) Applications in the Railway Infrastructure Construction Phase. *Appl. Sci.* 2024, 14, 502. <https://doi.org/10.3390/app14020502>
- [26] Шахрамьян, М. А., В. П. Куприяновский, and А. А. Климов. "Открытый BIM и автоматизированный учет объемов строительства: от машиночитаемых стандартов до реализации." *International Journal of Open Information Technologies* 10.10 (2022): 128-147.
- [27] Шахрамьян, М. А., and В. П. Куприяновский. "Некоторые вопросы повышения конкурентоспособности и зрелости инфраструктурных проектов с использованием технологий информационного моделирования." *International Journal of Open Information Technologies* 10.12 (2022): 123-173.
- [28] Rafsanjani H. N., Nabizadeh A. H. Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin //Energy and Built Environment. – 2023. – Т. 4. – №. 2. – С. 169-178. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004>
- [29] Понкин, И. В., et al. "Подрывные технологические инновации: понятие, значение и онтология." *International Journal of Open Information Technologies* 8.8 (2020): 60-68.
- [30] Nisbet N. et al. Semantic correction, enrichment and enhancement of social and transport infrastructure BIM models //Advanced Engineering Informatics. – 2024. – Т. 59. – С. 102290. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102290>
- [31] Wang T., Chen H. M. Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle //Automation in Construction. – 2023. – Т. 150. – С. 104832. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523000924>
- [32] You Wang , Ziwei Wang , Tingting Ma, Guowei Li and Huixia Tie, Research on the Realization Path of Railway Intelligent Construction Based on System Engineering, *Sustainability* 2022, 14(11), 6945; <https://doi.org/10.3390/su14116945>
- [33] Ye W. et al. Review of integrated full life cycle data management and application of the slab tracks //Intelligent Transportation Infrastructure. – 2022. – Т. 1. – С. liac018. <https://doi.org/10.1093/iti/liac018>
- [34] Li, Qiuyi, and Luyao Li. "Perspective Chapter: Intelligent Construction Technology of Ballastless Track for High-Speed Railway." (2023). <https://www.intechopen.com/chapters/85566>
- [35] Abedin, S.; Biondi, A.M.; Wu, R.; Cao, L.; Wang, X. Structural Health Monitoring Using a New Type of Distributed Fiber Optic Smart Textiles in Combination with Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR): Taking a Pedestrian Bridge as Case Study. *Sensors* 2023, 23, 1591. <https://doi.org/10.3390/s23031591>
- [36] Muñoz, F.; Urricelqui, J.; Soto, M.A.; Jimenez-Rodriguez, M. Finding Well-Coupled Optical Fiber Locations for Railway Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing. *Sensors* 2023, 23, 6599. <https://doi.org/10.3390/s23146599>
- [37] Kim, H.-J.; Kim, J.-Y.; Kim, J.-W.; Kim, S.-K.; Na, W.S. Unmanned Aerial Vehicle-Based Automated Path Generation of Rollers for Smart Construction. *Electronics* 2024, 13, 138. <https://doi.org/10.3390/electronics13010138>
- [38] Yao, Y., Song, E. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Constr. Sustain. Cities* 1, 2 (2023). <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
- [39] Wang, Z.; Qian, J.; Ling, J. Intelligent Compaction Measurement Value in Variability Control of Subgrade Compaction Quality. *Appl. Sci.* 2024, 14, 68. <https://doi.org/10.3390/app14010068>
- [40] Zhang, Y., Yuen, K.V. (2022). Applications of Deep Learning in Intelligent Construction. In: Cury, A., Ribeiro, D., Ubertaini, F., Todd, M.D. (eds) *Structural Health Monitoring Based on Data Science*

- Techniques. *Structural Integrity*, vol 21. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81716-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81716-9_11)
- [41] Chang, G.K., Xu, G., Correia, A.G., Nazarian, S. (2022). Intelligent Construction for Infrastructure—The Framework. In: Tutumluer, E., Nazarian, S., Al-Qadi, I., Qamhia, I.I. (eds) *Advances in Transportation Geotechnics IV. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 166. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77238-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77238-3_15)
- [42] Xiaer Xiahou ,Yifan Wu ,Tianle Duan ,Peng Lin 1,Funing Li ,Xiaojun Qu 2,Long Liu ,Qiming Li and Jiabin Liu , Analyzing Critical Factors for the Smart Construction Site Development: A DEMATEL-ISM Based Approach, *Buildings* 2022, 12(2), 116; <https://doi.org/10.3390/buildings12020116>
- [43] Chen, W.; Fu, X.; Chen, W.; Peng, Z. Intelligent Detection of Rebar Size and Position Using Improved DeeplabV3+. *Appl. Sci.* 2023, 13, 11094. <https://doi.org/10.3390/app131911094>
- [44] Xuefeng Zhao,Mengxuan Li,Zhe Sun ,Yue Zhao,Yihao Gai,Jingjing Wang,Chun Huang,Lei Yu,Sicong Wang,Meng Zhang and Lingli Huang , Intelligent Construction and Management of Landscapes through Building Information Modeling and Mixed Reality ,*Appl. Sci.* 2022, 12(14), 7118; <https://doi.org/10.3390/app12147118>
- [45] Wenbo Hu, Weidong Wang, Xianhua Liu, Jun Peng, Sicheng Wang, Chengbo Ai, Shi Qiu, Wenjuan Wang, Jin Wang, Qasim Zaheer, Lichang Wang, "Hybrid Pixel-Level Crack Segmentation for Ballastless Track Slab Using Digital Twin Model and Weakly Supervised Style Transfer", *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 2024, Article ID 8846470, 23 pages, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/8846470>
- [46] Yuan, D.; Li, S.; Ren, L. Evaluation Study on the Application Effect of Intelligent Construction Technology in the Construction Process. *Sustainability* 2024, 16, 1071. <https://doi.org/10.3390/su16031071>
- [47] Wang, Y.; Zhao, J.; Gao, N.; Shen, F. A Dynamic Evaluation Method for the Development of Intelligent Construction Technology in the Construction Field Based on Structural Equation Model–System Dynamics Model. *Buildings* 2024, 14, 417. <https://doi.org/10.3390/buildings14020417>
- [48] Venezia, E. Cost–Benefit Analysis in High-Speed Railway Projects: Appraisal of Methodological Approaches and an Initial Social Equity Evaluation, A Case Study. *Sustainability* 2023, 15, 11344. <https://doi.org/10.3390/su151411344>
- [49] Hausberger, L.; Cordes, T.; Gschösser, F. Life Cycle Assessment of High-Performance Railway Infrastructure, Analysis of Superstructures in Tunnels and on Open Tracks. *Sustainability* 2023, 15, 7064. <https://doi.org/10.3390/su15097064>
- [50] Praticò, F.G.; Fedele, R. Economic Sustainability of High-Speed and High-Capacity Railways. *Sustainability* 2023, 15, 725. <https://doi.org/10.3390/su15010725>
- [51] Li, P., Liu, Y. and Shao, S. (2023), "System architecture and basic platform for intelligent high-speed railway", *Railway Sciences*, Vol. 2 No. 2, pp. 257-272. <https://doi.org/10.1108/RS-04-2023-0017>
- [52] Куприяновский, В. П. Демистификация цифровой экономики / В. П. Куприяновский, Д. Е. Намиот, С. А. Синягов // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – Т. 4, № 11. – С. 59-63. – EDN WXQLJ.
- [53] Цифровая экономика = модели данных + большие данные + архитектура + приложения? / В. П. Куприяновский, Н. А. Уткин, Д. Е. Намиот, П. В. Куприяновский // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – Т. 4, № 5. – С. 1-13. – EDN VWANDZ.
- [54] Цифровая железная дорога - инновационные стандарты и их роль на примере Великобритании / Д. Е. Николаев, В. П. Куприяновский, Г. В. Суконников [и др.] // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – Т. 4, № 10. – С. 55-61. – EDN WXBAZN.
- [55] Розничная торговля в цифровой экономике / В. П. Куприяновский, С. А. Синягов, Д. Е. Намиот [и др.] // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – Т. 4, № 7. – С. 1-12. – EDN WCMIWN.

# The life cycle of intelligent high-speed rail based on BIM, digital twins, and other technologies using the example of the construction of slab railway tracks

Varvara Kublitskaya, Oleg Pokusaev, Vasily Kupriyanovsky

**Abstract** - Integrated data management based on a variety of formalized models is a key technology that provides model-driven dynamic synchronization of activities required for successful railway asset management. The asset management industry has benefited significantly from the shift from traditional to digital transformation around the world. Worldwide, high-speed rail systems serve nearly 2 billion passenger kilometers per day. At their core, they represent the same critical infrastructure as telecommunications and energy networks. Slab tracks are an important basic structure to facilitate and support high-speed trains due to their advantages of smoothness, stability, and minimal maintenance requirements. From an economic and sustainability perspective, the full life cycle of slab tracks refers to a design concept that considers all phases of a track structure at an early design stage, integrating plans and analyzing problems that may arise during subsequent stages of track structure construction and operation. Ballastless track is one of the core technologies of high-speed railways. The track structure directly affects the base, the deformation of the supporting structure directly affects the smoothness and stability of the track, and the quality and accuracy of construction directly affect the safety and operating comfort of a high-speed train.

**Keywords**— high-speed railways, BIM, slab track.

## REFERENCES

- [1] Corallo, A.; Del Vecchio, V.; Lezzi, M.; Luperto, A. Model-Based Enterprise Approach in the Product Lifecycle Management: State-of-the-Art and Future Research Directions. *Sustainability* 2022, 14, 1370. <https://doi.org/10.3390/su14031370>
- [2] Kupriyanovskij, V. P., et al. "Novaja paradigma cifrovoj zheleznoj dorogi-standartizacija zhiznennogo cikla aktivov." *International Journal of Open Information Technologies* 5.2 (2017): 64-84.
- [3] Organising qualitative data into asset databases to standardise reports and improve BIM practices <https://learninglegacy.hs2.org.uk/document/organising-qualitative-data-into-asset-databases-to-standardise-reports-and-improve-bim-practices/> Retrieved: Apr, 2024
- [4] Ruemler, S.P.; Zimmerman, K.E.; Hartman, N.W.; Hedberg, T., Jr.; Feeney, A.B. Promoting Model-Based Definition to establish a complete product definition. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2017, 139, 051008.
- [5] Alemanni, M.; Destefanies, F.; Vezzetti, E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011, 52, 1–14.
- [6] Hedberg, J.T.; Lubell, J.; Fischer, L.; Maggiano, L.; Feeney, A.B. Testing the Digital Thread in Support of Model-Based Manufacturing and Inspection. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 2016, 16, 021001.
- [7] Hartman, N.; Rosche, P.; Fischer, K. A framework for Evaluating Collaborative Product Representations in Product Lifecycle Workflows. In *Proceedings of the IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*, Montreal, QC, Canada, 8–12 July 2012.
- [8] Kupriyanovskij, V. P., et al. "Jekonomicheskie vygody primenenija kombinirovannyh modelej BIM-GIS v stroitel'noj otrasli. Obzor sostojanija v mire." *International Journal of Open Information Technologies* 4.5 (2016): 14-25.
- [9] Kupriyanovskij, V. P., et al. "Bim na zheleznyh dorogah mira-razvitie, primery, standarty." *International Journal of Open Information Technologies* 8.5 (2020): 57-80.
- [10] Kupriyanovskij, V. P., et al. "BIM na puti k IFC5-vyravnivanie i razvitie semantiki i ontologij IFC s UML i OWL dlja struktur avtomobil'nyh i zheleznyh dorog, mostov, tunnelej, portov i vodnyh putej." *International Journal of Open Information Technologies* 8.8 (2020): 69-78.
- [11] M. Shimizu, S. Perinpanayagam, B. Namoano and A. Starr, "Real-Time Prognostics and Health Management Without Run-to-Failure Data on Railway Assets," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 28724-28734, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3259221
- [12] P. McMahon, T. Zhang and R. A. Dwight, "Approaches to Dealing With Missing Data in Railway Asset Management," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48177-48194, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978902.
- [13] Kour, R.; Castaño, M.; Karim, R.; Patwardhan, A.; Kumar, M.; Granström, R. A Human-Centric Model for Sustainable Asset Management in Railway: A Case Study. *Sustainability* 2022, 14, 936. <https://doi.org/10.3390/su14020936>
- [14] Litherland J, Andrews J. A Petri net asset management framework for railway switches and crossings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* 2023;237(3):322-334. doi:10.1177/09544097221110970
- [15] Vieira, J., Patrício, H., Poças Martins, J., Gomes Morgado, J., Almeida, N. (2023). The Potential Value of Digital Twin in Rail and Road Infrastructure Asset Management. In: Crespo Márquez, A., Gómez Fernández, J.F., González-Prida Díaz, V., Amadi-Echendu, J. (eds) 16th WCEAM Proceedings. WCEAM 2022. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2_42)
- [16] Alice Consilvio ,José Solís-Hernández ,Noemi Jiménez-Redondo,Paolo Sanetti ,Federico Papa , Iñigo Mingolarra-Garaizar On Applying Machine Learning and Simulative Approaches to Railway Asset Management: The Earthworks and Track Circuits Case Studies, *Sustainability* 2020, 12(6), 2544; <https://doi.org/10.3390/su12062544>
- [17] P. McMahon, T. Zhang and R. Dwight, "Requirements for Big Data Adoption for Railway Asset Management," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 15543-15564, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967436.
- [18] K. K. Najj, M. Gunduz, F. H. Alhenzab, H. Al-Hababi and A. H. Al-Qahtani, "A Systematic Review of the Digital Transformation of the Building Construction Industry," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 31461-31487, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365934.
- [19] Shim, C., Moon, H. (2024). Recent BIM Developments and Applications on Railway Infrastructure. In: Ribeiro, D., Montenegro, P.A., Andersson, A., Martínez-Rodrigo, M.D. (eds) *Digital Railway Infrastructure. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-49589-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-49589-2_11)



- [20] Alqatawna A. et al. BIM-centered high-speed railway line design for full infrastructure lifecycle //Automation in Construction. – 2023. – T. 156. – S. 105114.
- [21] Zhou M. et al. Xiong'an station, China—how the largest station in Asia was built in just 2 years //Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. – Thomas Telford Ltd, 2022. – T. 175. – #. 3. – S. 113-118. <https://doi.org/10.1680/jcien.21.00172>
- [22] RB Rail's BIM documentation <https://www.railbaltica.org/rb-rail-as-bim-documentation/> Retrieved: Apr, 2024
- [23] Rail Baltica BIM Documentation RB Rail AS <https://www.globalbim.org/info-collection/rail-baltica-bim-documentation/> Retrieved: Apr, 2024
- [24] Digital Engineering and BIM 4.04.2024, <https://www.hs2.org.uk/building-hs2/innovation/digital-engineering-and-bim/> Retrieved: Apr, 2024
- [25] Shin, M.-H.; Kim, H.-Y.; Liao, J.-F. Performance Measurement and Analysis of Building Information Modeling (BIM) Applications in the Railway Infrastructure Construction Phase. Appl. Sci. 2024, 14, 502. <https://doi.org/10.3390/app14020502>
- [26] Shahramanjan, M. A., V. P. Kuprijanovskij, and A. A. Klimov. "Otkrytyj BIM i avtomatizirovannyj uchët ob'emov stroitel'stva: ot mashinochitaemyh standartov do realizacii." International Journal of Open Information Technologies 10.10 (2022): 128-147.
- [27] Shahramanjan, M. A., and V. P. Kuprijanovskij. "Nekotorye voprosy povyshenija konkurentosposobnosti i zrelosti infrastrukturyh projektov s ispol'zovaniem tehnologij informacionnogo modelirovanija." International Journal of Open Information Technologies 10.12 (2022): 123-173.
- [28] Rafsanjani H. N., Nabizadeh A. H. Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin //Energy and Built Environment. – 2023. – T. 4. – #. 2. – S. 169-178. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004>
- [29] Ponkin, I. V., et al. "Podryvnye tehnologicheskie innovacii: ponjatje, znachenie i ontologija." International Journal of Open Information Technologies 8.8 (2020): 60-68.
- [30] Nisbet N. et al. Semantic correction, enrichment and enhancement of social and transport infrastructure BIM models //Advanced Engineering Informatics. – 2024. – T. 59. – S. 102290. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102290>
- [31] Wang T., Chen H. M. Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle //Automation in Construction. – 2023. – T. 150. – S. 104832. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523000924>
- [32] You Wang , Ziwei Wang , Tingting Ma, Guowei Li end Huixia Tie, Research on the Realization Path of Railway Intelligent Construction Based on System Engineering, Sustainability 2022, 14(11), 6945; <https://doi.org/10.3390/su14116945>
- [33] Ye W. et al. Review of integrated full life cycle data management and application of the slab tracks //Intelligent Transportation Infrastructure. – 2022. – T. 1. – S. 1iac018. <https://doi.org/10.1093/iti/liac018>
- [34] Li, Qiuyi, and Luyao Li. "Perspective Chapter: Intelligent Construction Technology of Ballastless Track for High-Speed Railway." (2023). <https://www.intechopen.com/chapters/85566>
- [35] Abedin, S.; Biondi, A.M.; Wu, R.; Cao, L.; Wang, X. Structural Health Monitoring Using a New Type of Distributed Fiber Optic Smart Textiles in Combination with Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR): Taking a Pedestrian Bridge as Case Study. Sensors 2023, 23, 1591. <https://doi.org/10.3390/s23031591>
- [36] Muñoz, F.; Urricelqui, J.; Soto, M.A.; Jimenez-Rodriguez, M. Finding Well-Coupled Optical Fiber Locations for Railway Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing. Sensors 2023, 23, 6599. <https://doi.org/10.3390/s23146599>
- [37] Kim, H.-J.; Kim, J.-Y.; Kim, J.-W.; Kim, S.-K.; Na, W.S. Unmanned Aerial Vehicle-Based Automated Path Generation of Rollers for Smart Construction. Electronics 2024, 13, 138. <https://doi.org/10.3390/electronics13010138>
- [38] Yao, Y., Song, E. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Constr. Sustain. Cities 1, 2 (2023). <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
- [39] Wang, Z.; Qian, J.; Ling, J. Intelligent Compaction Measurement Value in Variability Control of Subgrade Compaction Quality. Appl. Sci. 2024, 14, 68. <https://doi.org/10.3390/app14010068>
- [40] Zhang, Y., Yuen, KV. (2022). Applications of Deep Learning in Intelligent Construction. In: Cury, A., Ribeiro, D., Ubertini, F., Todd, M.D. (eds) Structural Health Monitoring Based on Data Science Techniques. Structural Integrity, vol 21. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81716-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81716-9_11)
- [41] Chang, G.K., Xu, G., Correia, A.G., Nazarian, S. (2022). Intelligent Construction for Infrastructure—The Framework. In: Tutumluer, E., Nazarian, S., Al-Qadi, I., Qamhia, I.I. (eds) Advances in Transportation Geotechnics IV. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 166. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77238-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77238-3_15)
- [42] Xiaer Xiahou ,Yifan Wu ,Tianle Duan ,Peng Lin 1,Funing Li ,Xiaojun Qu 2,Long Liu ,Qiming Li and Jiaxin Liu , Analyzing Critical Factors for the Smart Construction Site Development: A DEMATEL-ISM Based Approach, Buildings 2022, 12(2), 116; <https://doi.org/10.3390/buildings12020116>
- [43] Chen, W.; Fu, X.; Chen, W.; Peng, Z. Intelligent Detection of Rebar Size and Position Using Improved DeeplabV3+. Appl. Sci. 2023, 13, 11094. <https://doi.org/10.3390/app131911094>
- [44] Xuefeng Zhao,Mengxuan Li,Zhe Sun ,Yue Zhao,Yihao Gai,Jingjing Wang,Chun Huang,Lei Yu,Sicong Wang,Meng Zhang and Lingli Huang , Intelligent Construction and Management of Landscapes through Building Information Modeling and Mixed Reality //Appl. Sci. 2022, 12(14), 7118; <https://doi.org/10.3390/app12147118>
- [45] Wenbo Hu, Weidong Wang, Xianhua Liu, Jun Peng, Sicheng Wang, Chengbo Ai, Shi Qiu, Wenjuan Wang, Jin Wang, Qasim Zaheer, Lichang Wang, "Hybrid Pixel-Level Crack Segmentation for Ballastless Track Slab Using Digital Twin Model and Weakly Supervised Style Transfer", Structural Control and Health Monitoring, vol. 2024, Article ID 8846470, 23 pages, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/8846470>
- [46] Yuan, D.; Li, S.; Ren, L. Evaluation Study on the Application Effect of Intelligent Construction Technology in the Construction Process. Sustainability 2024, 16, 1071. <https://doi.org/10.3390/su16031071>
- [47] Wang, Y.; Zhao, J.; Gao, N.; Shen, F. A Dynamic Evaluation Method for the Development of Intelligent Construction Technology in the Construction Field Based on Structural Equation Model-System Dynamics Model. Buildings 2024, 14, 417. <https://doi.org/10.3390/buildings14020417>
- [48] Venezia, E. Cost-Benefit Analysis in High-Speed Railway Projects: Appraisal of Methodological Approaches and an Initial Social Equity Evaluation, A Case Study. Sustainability 2023, 15, 11344. <https://doi.org/10.3390/su151411344>
- [49] Hausberger, L.; Cordes, T.; Gschösser, F. Life Cycle Assessment of High-Performance Railway Infrastructure, Analysis of Superstructures in Tunnels and on Open Tracks. Sustainability 2023, 15, 7064. <https://doi.org/10.3390/su15097064>
- [50] Praticò, F.G.; Fedele, R. Economic Sustainability of High-Speed and High-Capacity Railways. Sustainability 2023, 15, 725. <https://doi.org/10.3390/su15010725>
- [51] Li, P., Liu, Y. and Shao, S. (2023), "System architecture and basic platform for intelligent high-speed railway". Railway Sciences, Vol. 2 No. 2, pp. 257-272. <https://doi.org/10.1108/RS-04-2023-0017>
- [52] Kuprijanovskij, V. P. Demistifikacija cifrovoj jekonomiki / V. P. Kuprijanovskij, D. E. Namiot, S. A. Sinjagov // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4, # 11. – S. 59-63. – EDN WXQLIJ.
- [53] Cifrovaja jekonomika = modeli dannyh + bol'shie dannye + arhitektura + prilozhenija? / V. P. Kuprijanovskij, N. A. Utkin, D. E. Namiot, P. V. Kuprijanovskij // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4, # 5. – S. 1-13. – EDN VWANDZ.
- [54] Cifrovaja zheleznaja doroga - innovacionnye standarty i ih rol' na primere Velikobritanii / D. E. Nikolaev, V. P. Kuprijanovskij, G. V. Sukonnikov [i dr.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4, # 10. – S. 55-61. – EDN WXBASN.
- [55] Roznichnaja trgovlja v cifrovoj jekonomike / V. P. Kuprijanovskij, S. A. Sinjagov, D. E. Namiot [i dr.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4, # 7. – S. 1-12. – EDN WCMIWN.