

УДК: 001.895; 629.066; 656.029; 656.3

Векторы цифровой трансформации железных дорог

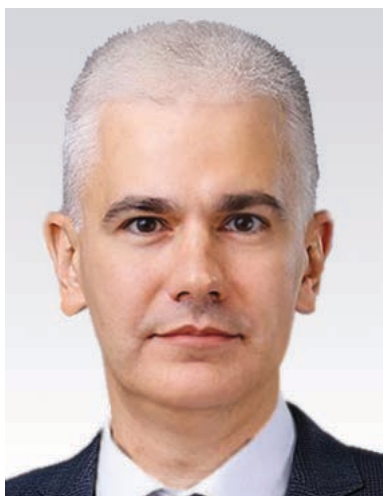
Vectors of digital transformation of railway transport

Кудюкин В.В., Заместитель Генерального директора, АО «НИИАС»,
E-mail: v.kudukin@vniias.ru, Москва, Россия

Kudyukin V.V., Deputy General Director, JSC NIIAS, E-mail: v.kudukin@vniias.ru, Moscow, Russia

Озеров А.В., Начальник Международного управления, АО «НИИАС»,
E-mail: A.Ozerov@vniias.ru, Москва, Россия

Ozerov A.V., Head of International Department, JSC NIIAS, E-mail: A.Ozerov@vniias.ru, Moscow, Russia



Аннотация

Цифровая трансформация железных дорог предусматривает переход к предиктивному техническому обслуживанию и ремонту объектов железнодорожного транспорта, а также к адаптивному планированию и управлению всем железнодорожным транспортным комплексом с применением цифровых методов сбора, обработки и передачи данных. В статье сделан обзор и проведен анализ ряда ключевых направлений цифровизации железнодорожного транспорта с описанием основных задач, существующих ограничений и трендов развития, с учетом опыта Российский железных дорог.

Ключевые слова: транспорт, автоматизация, роботизация, техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), предиктивная аналитика, аналитика больших данных, Big Data, Data Science, BIM, IoT, FRMCS, 5G-R.



Abstract

The digital transformation of railways provides for a transition to predictive maintenance of railway assets, as well as adaptive planning and management of the entire railway system with the application of digital tools for collecting, processing and transmitting data. The article provides an overview and analysis of some key areas of railway digitalization while specifying some tasks, existing limitations and trends, with the experience of Russian railways as well taken into account.

Keywords: transport, automation, robotics, maintenance and repair, predictive analytics, Big Data analytics, Big Data, Data Science, BIM, IoT, FRMCS, 5G-R.

Введение

На концептуальном уровне цифровая трансформация железных дорог подразумевает смену эксплуатационно-управленческой парадигмы и переход к принципам индустрии 4.0, базирующимся на новых производственных моделях, напрямую связанных с интенсивным использованием информационно-коммуникационных технологий. Так, например, в работе [1] транспортная система 4.0 постулируется как модель интеллектуального взаимодействия транспортных киберфизических систем, обладающих свойствами «self-x» и способных к самоконфигурации, самоуправлению и самовосстановлению.

Цифровая трансформация железных дорог является следствием развития и широкого проникновения цифровых методов обработки и передачи информации, автоматизации и роботизации технологических процессов в транспортную отрасль, логистику, бизнес и промышленность [2].

Структурно цифровая железная дорога, как комплексная «сквозная» технология взаимодействия элементов между собой, представляет собой «систему систем», состоящую из связанных между собой киберфизических железнодорожных объектов (активов) стационарного и мобильного типа, информационно-управляющих потоков, центров хранения и обработки данных, набора стандартов, правил, регламентов и протоколов взаимодействия. При этом каждый актив имеет свой жизненный цикл, обуславливающий специфику планирования его технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [3].

В стратегиях цифровой трансформации железных дорог разных стран, включая Российские железные дороги, весьма значительное внимание уделяется пересмотру существующей практики ТОиР железнодорожных активов по принципу «ремонт после отказа», а также автоматизации системы управления ТОиР с возможностью реализации поддержки принятия решений на основе риск-ориентированного подхода. Внедрение современных информационных систем управления ТОиР является одним из базовых условий обеспечения бесперебой-

ного перевозочного процесса в условиях возрастания грузопассажиропотоков и ограниченности финансовых ресурсов, а также важнейшим инструментом оптимизации расходов на содержание железнодорожных активов, в первую очередь инфраструктурных. К примеру, доля основных фондов инфраструктуры ОАО «РЖД», владельца крупнейшей транспортной сети в Российской Федерации, составляет более 60% от общей стоимости основных средств, а доля эксплуатационных затрат на объекты инфраструктуры составляет порядка 35% от общего объема затрат [4].

Эффективное управление ТОиР зависит от наличия актуальной, достоверной и структурированной информации о текущем техническом состоянии железнодорожного актива. Источниками такой информации все чаще становятся беспроводные датчики (сенсоры) различного типа, в том числе датчики технического (машинного) зрения, однако большая часть входных данных по-прежнему формируется вручную и имеет низкое качество, т.е. невысокую достоверность. Это должно учитываться в современной информационной системе ТОиР, в которой должна быть предусмотрена возможность интеллектуального анализа больших данных на основе технологии Data Science с построением динамических моделей состояния железнодорожных активов и оценки категорирования объектов контроля на основе индикаторов раннего предупреждения факторов риска. В ОАО «РЖД» такой подход реализуется в рамках проекта УРРАН (рис. 1).

Для построения эффективных моделей предиктивной аналитики в задачах оценки надежности железнодорожных активов и принятия решений по их техническому обслуживанию исследуются как классические методы машинного обучения (метод главных компонент, метод опорных векторов, деревья решений, случайный лес, логистическая регрессия и метод ближайших соседей), так и методы глубокого обучения, основанные на искусственных нейронных сетях (ИНС) [5].

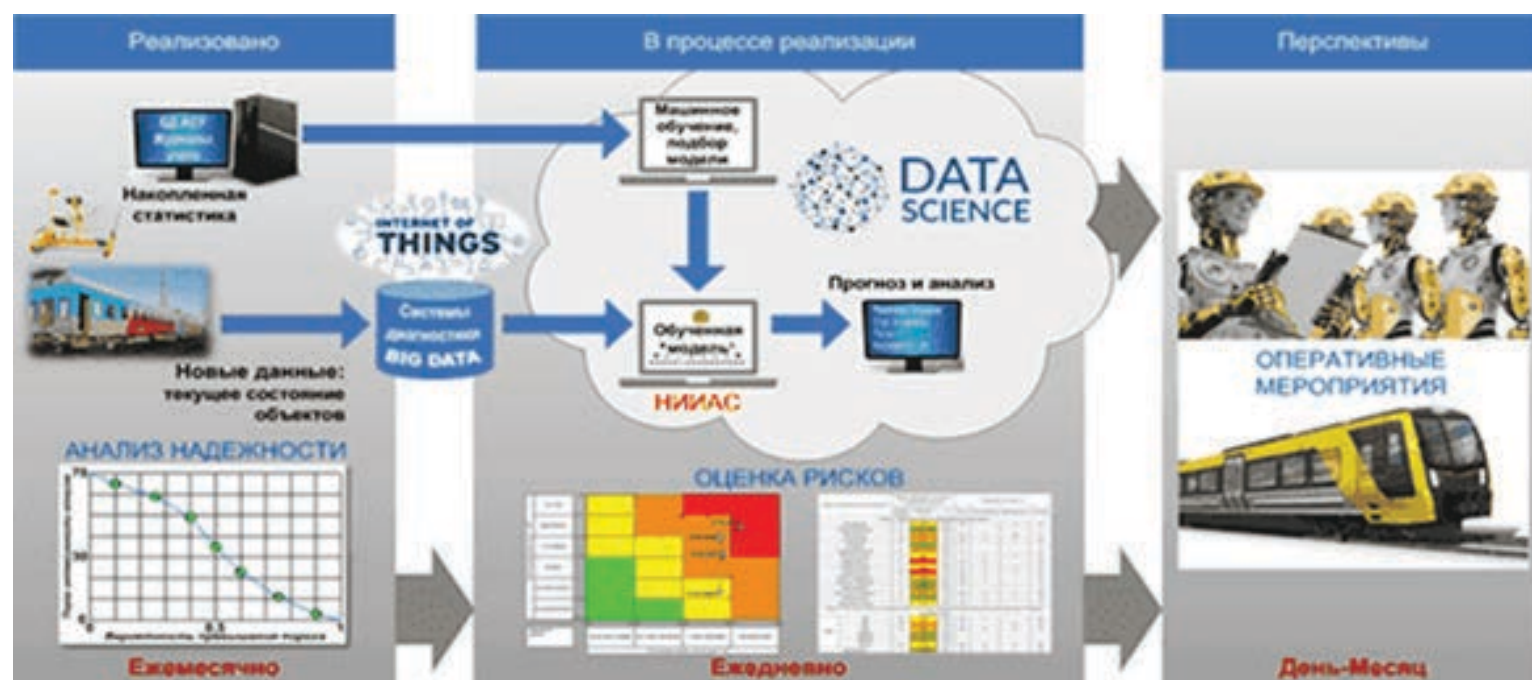


Рисунок 1. Совершенствование системы управления ТОиР инфраструктуры



Активное использование ИНС, в том числе сверточных нейронных сетей (СНС), в железнодорожном секторе вызвано в первую очередь широким применением датчиков технического зрения (видеокамер различного типа, лидаров и пр.) в составе интеллектуальных диагностических комплексов, робототехнических комплексов (РТК), бортовых модулей обнаружения препятствий, тестируемых в проектах создания беспилотных поездов, и т.д.

Внедрение автоматизированных комплексов, основанных на данных технологиях, позволяет в том числе минимизировать количество процессов, предполагающих участие человека в непосредственном контакте с подвижным составом, – а значит, выводит работников из зоны риска. Так, например, в ОАО «РЖД» идет массовое внедрение мультифункционального диагностического комплекса «Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС)», цель которого сформировать единую межхозяйственную аппаратно-программную платформу для обеспечения перехода к малолюдным технологиям в процессе технического и коммерческого осмотра подвижного состава (рис. 2).

В составе ППСС реализованы функциональные возможности как существующих систем (КТСМ, ПАК, КТИ), так и новые функциональные возможности на основе технологий машинного зрения (распознавание инвентарных номеров вагонов, знаков опасности, надписей «с горок не спускать», определение завышения/занижения фрикционных клиньев, наличие и толщины тормозных колодок и др.), лазерного сканирования (выявление отрицательной динамики, нарушений габарита, смещения грузов, повреждений кузова и др.), тензометрии (измерение массы, определение неравномерной загрузки или смещения грузов, обнаружение дефектов поверхностей катания колес).

Другим перспективным направлением исследований в области обеспечения безопасности перевозочного процесса и эксплуатации объектов железнодорожного транспорта является разработка распределенных высокотехнологичных систем мониторинга объектов путевой инфраструктуры на основе волоконно-оптической сенсорики (ВОС). Актуальность и преимущество ВОС в условиях протяженных линейных объектов, таких как железнодорожный путь, заключается в возможности предоставления полной непрерывной информации, в отличие от традиционных стационарных систем диагностики и мониторинга на основе точечных (локальных) датчиков, которые не дают непрерывной информации о техническом состоянии всего объекта, а только в контрольных точках [6].

Применение распределенных датчиков на основе ВОС позволяет проводить непрерывный мониторинг протяженных линейных объектов, решая задачи выявления деформационных процессов в подстилающих грунтах железнодорожного пути, определения напряжений и температуры в рельсовых плетях и элементах конструкций искусственных сооружений, а также обнаружения несанкционированного проникновения в охраняемые зоны объектов железнодорожной инфраструктуры (кабельные канализации, полоса отвода, искусственные сооружения и др.). Большой спектр решаемых задач дает

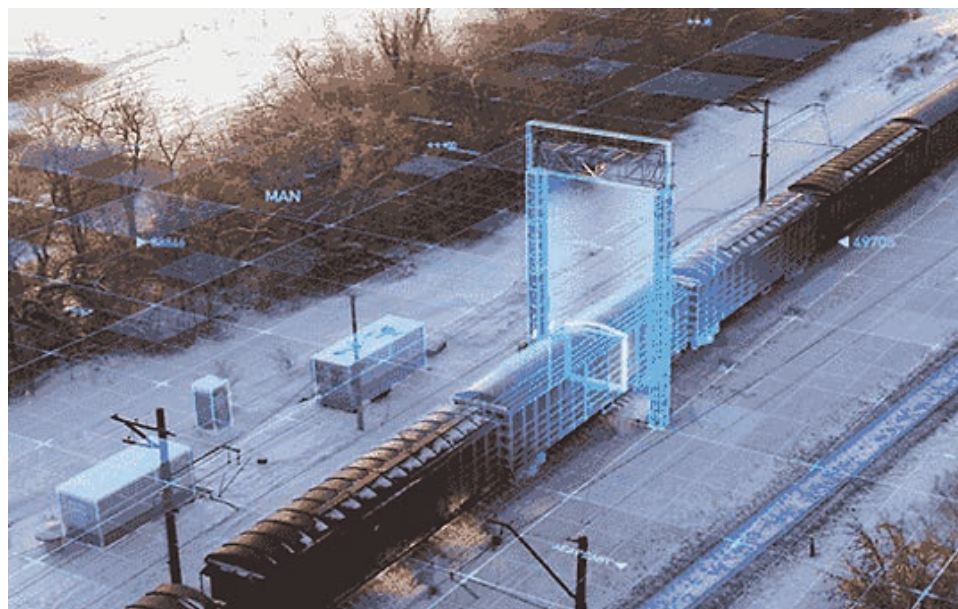


Рисунок 2. Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях

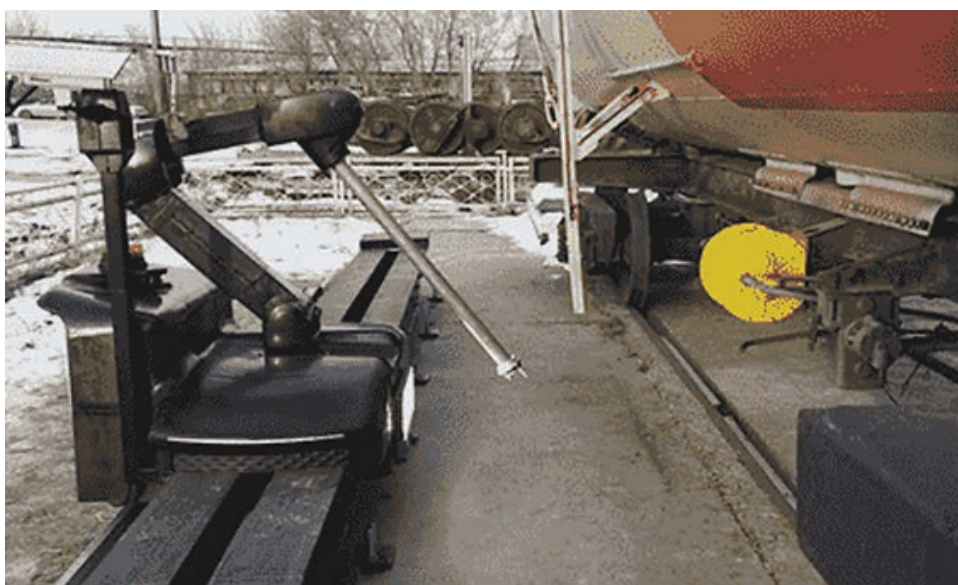


Рисунок 3. Манипулятор робототехнического комплекса

возможность использовать ВОС в качестве базового источника информации при создании комплексной системы обеспечения безопасности.

Большое будущее у специализированных робототехнических комплексов (РТК), которые начинают внедряться в ОАО «РЖД» для выполнения операций, связанных, например, с отпуском тормозов грузовых вагонов в парке приема, расцепкой вагонов перед сортировочной горкой и т.п. (рис. 3).

Еще одна область применения РТК – технический осмотр подвагонного пространства. В таких РТК для проведения осмотра используются камеры технического зрения и высокоточные лазерные лидары, а сам манипулятор РТК перемещается по осмотровой канаве на колесной платформе. Применение РТК для указанных операций позволяет вывести человека из опасной зоны, а также устранить негативное влияние человеческого фактора при выявлении неисправностей, исключив риски, связанные с безопасностью движения поездов [7,8,9,10].

Отдельное большое направление внедрения и тестирования технологий технического зрения и машинного обучения разного вида – создание автономных (беспилотных) поездов. Данная работа ведется в рамках более широкой концепции «умный поезд», предполагающей перенос части функционала железнодорожной ин-



фраструктуры на борт поезда как в задачах диагностики и мониторинга, так и в задачах управления движением.

Бортовой комплекс средств технического зрения состоит из набора датчиков различной физической природы и различного назначения, а также быстродействующих вычислительных средств с большим объемом памяти, обрабатывающих сигналы этих датчиков в режиме реального времени с использованием алгоритмов машинного обучения, и предназначен для автоматического обнаружения и классификации посторонних объектов на пути движения поезда для принятия решения о соответствующей реакции бортового устройства безопасности (подача звукового сигнала, снижение скорости, экстренное торможение и т.д.). Такие комплексы в последние годы активно тестируются на различных полигонах в разных странах мира, включая Россию (маневровые локомотивы на полигоне ст. Лужская и тестовые электропоезда «Ласточка» на Московском центральном кольце) [11].

В парадигме цифровой железной дороги будущего автономный поезд представляет собой мобильный «самосознающий» киберфизический объект (систему) с увеличенной, но управляемой автономией (то есть может управляться автономно, используя субсидиарную вычислительную модель, но требует общей координации из центра управления [12]. Соответственно, для модели сетевого управления будущего вопрос нахождения границ между автономным и централизованным управлением приобретает особое значение и потребует своего решения по мере успешной реализации проектов по созданию автономных транспортных средств.

В этой связи следует отметить, что не менее активно развивается направление, связанное с применением сетевых методов управления на основе облачных вычислений и мультиагентных технологий, при этом центры управления перевозками (ЦУП) получают совершенно новые возможности в части адаптивного планирования и оперативного реагирования на риски нарушения перевозочного процесса за счет платформенных решений предиктивной аналитики, интеграции с системами автоматической установки маршрутов и межмашинного взаимодействия с бортовыми локомотивными устройствами автоведения (рис. 4) [13, 14].

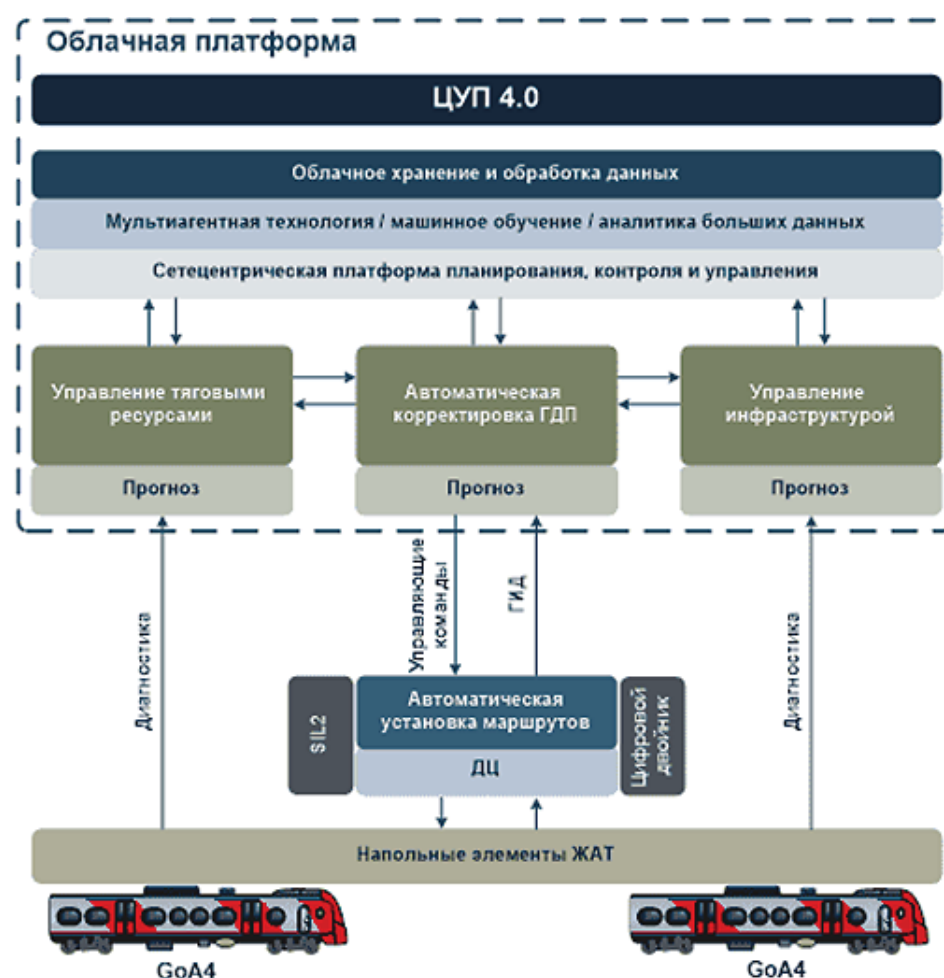


Рисунок 4. Целевая модель ЦУП 4.0

По мнению некоторых авторов, использование методов предиктивной аналитики на основе технологии Data Science, способных выявлять скрытые корреляции и тренды и прогнозировать развитие риска на основе различных индикаторов раннего предупреждения, в контуре интеллектуального управления перевозочным процессом позволит в будущем обеспечить повышение устойчивости железнодорожной транспортной системы к возмущающему воздействию негативных факторов разной этиологии [15]. По мере отработки технологии прогнозирования на основе аналитики больших данных станут, вероятно, полноценно учитываться и столь неопределенные факторы риска, как природные явления и изменения спроса, которые могут как вызывать нарушения перевозочного процесса, так и не вызывать их (рис. 5).

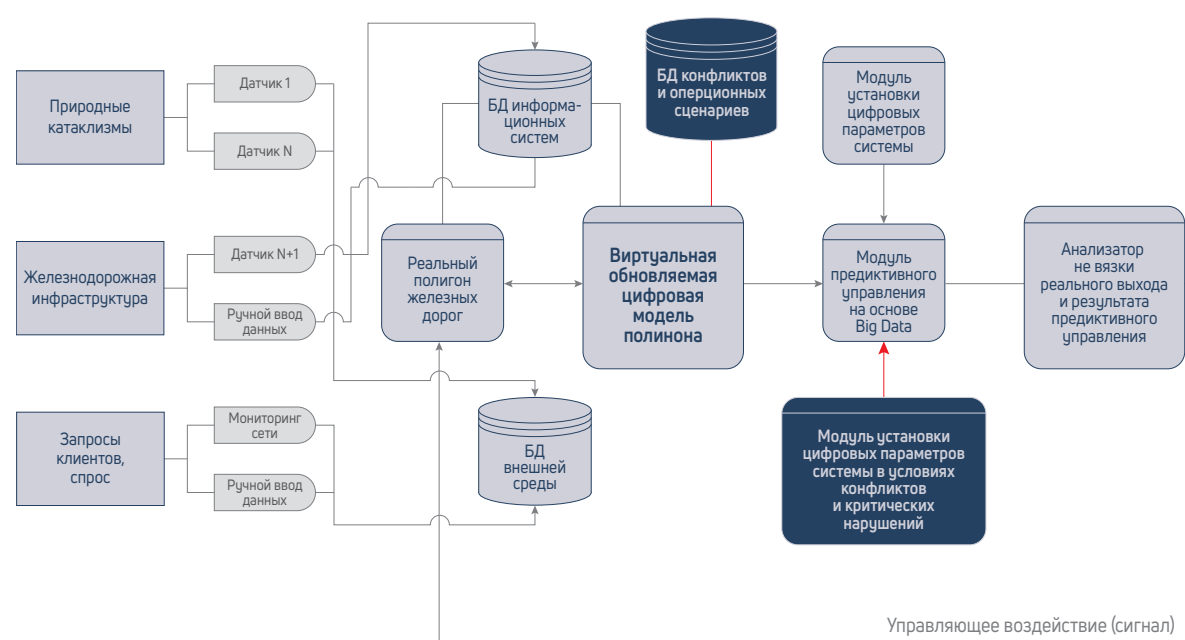


Рисунок 5. Схема предиктивного управления на основе аналитики больших данных



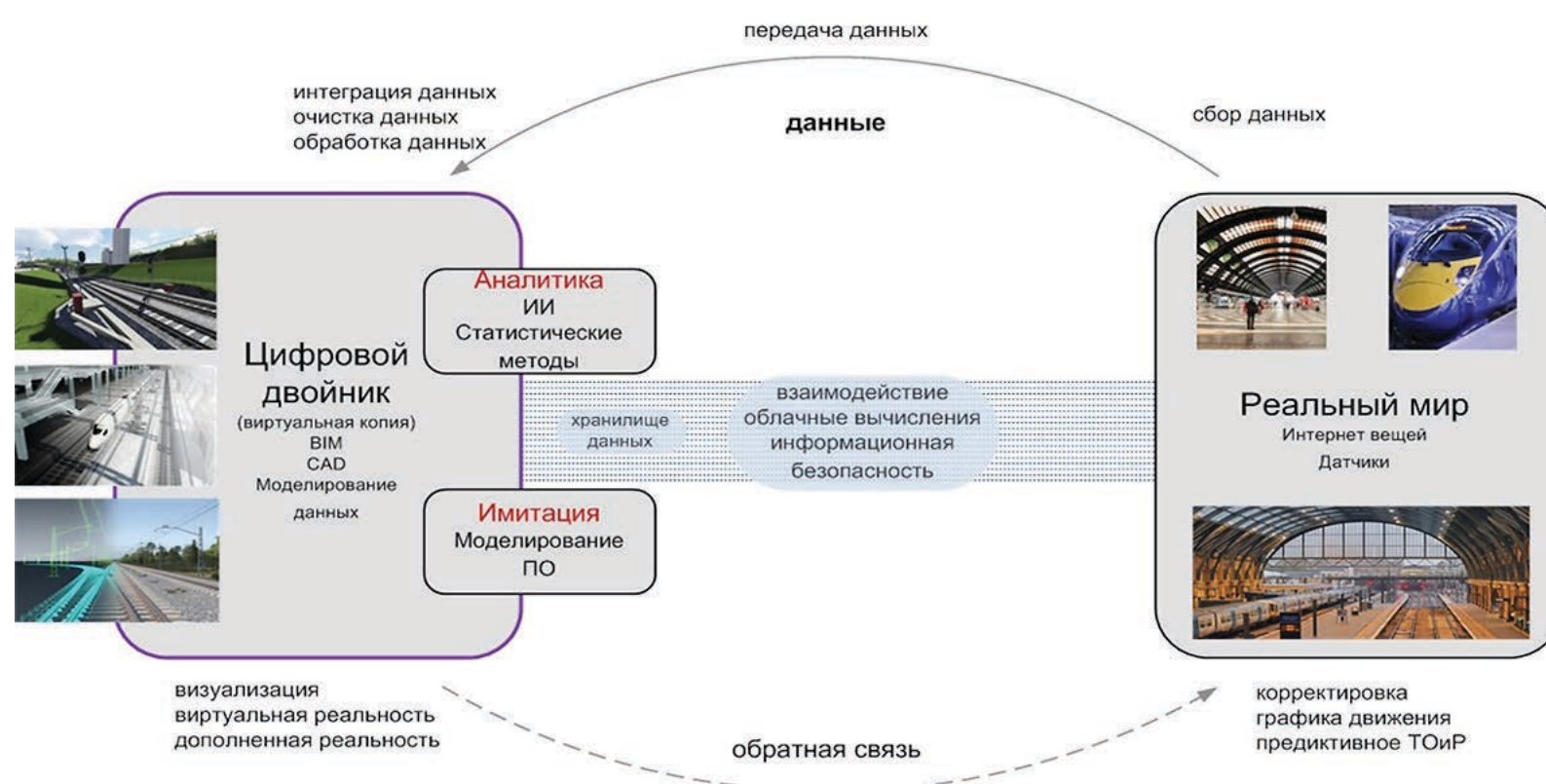


Рисунок 6. Схема взаимодействия цифрового двойника и активов

Для классификации входящей информации и эксплуатационных событий могут использоваться такие методы Data Science, как логистическая регрессия, метод опорных векторов, методы кластеризации (различными алгоритмами), байесовские регрессии и др. Для решения задач перестроения (корректировки) графика движения поездов (ГДП) могут быть применимы адаптивные методы случайного поиска, дерево решений, ИНС [16].

Одна из сложностей применения аналитики больших данных состоит в их разнообразии, гетерогенности, неструктурированности, зашумленности и избыточности. Помимо данных, поступающих от киберфизических систем (датчиков, видеокамер, навигационных спутниковых приемников и т.д.), генерируются большие объемы данных в продолжении всего жизненного цикла железнодорожных активов (от стадии проектирования до стадии технического обслуживания и взаимодействия с потребителями), а также значительный объем бизнес-данных [17].

Тем не менее, технология *Big Data* имеет большие перспективы в железнодорожной отрасли. Железнодорожные компании агрегируют большие объемы разнородных данных и могут получить значительные экономические эффекты от внедрения аналитики больших данных. Однако в железнодорожной отрасли присутствует целый ряд факторов, сдерживающих ее внедрение, среди которых – ограничения существующей инфраструктуры сбора, хранения и передачи данных, высокая стоимость инвестиций и отсутствие готовых специализированных платформ аналитики больших данных. Кроме того, на данный момент явно недостаточно специалистов в области машинного обучения и *Data Science* со знанием специфики железнодорожного транспорта, которые могли бы квалифицированно заниматься построением виртуальных моделей с применением программ машинного обучения и последующей верификацией полученных результатов.

При этом следует понимать, что с помощью методов *Big Data* невозможно конвертировать системы с ручным вводом данных в автоматические системы. Ясно

также, что с помощью технологии *Big Data* невозможно обрабатывать и создавать информацию, если нет необходимых данных, и именно с этой целью должно более активно развиваться еще одно ключевое направление цифровизации – Интернет вещей (IoT), которое предполагает разработку и массовое внедрение распределенных цифровых датчиков различного назначения, связанных в единую киберфизическую сеть и позволяющих осуществлять непрерывный мониторинг состояния стационарных и мобильных железнодорожных активов.

Внедрение цифровых технологий неизбежно приводит к необходимости описания железнодорожных активов в цифровом формате, то есть к созданию цифровых двойников железнодорожных активов. По своей сути, цифровые двойники – это виртуальное воспроизведение динамического рабочего состояния реального физического объекта, системы или процесса на основе регистрации широкого спектра параметров различными датчиками и их обработки с использованием методов искусственного интеллекта (ИИ) в режиме реального времени (общая схема представлена на рис. 6).

Концепция цифрового двойника взаимосвязана с технологией BIM – информационным моделированием, базирующемся на цифровом представлении физических и функциональных свойств объекта в виде BIM-модели. BIM-модель охватывает все этапы жизненного цикла объекта: планирование, составление технического задания, проектирование и анализ, выдача рабочей документации, производство, строительство, эксплуатация и ремонт, демонтаж. В настоящее время в большинстве стран внедрение технологии BIM все еще находится на начальном этапе. Среди основных причин – отсутствие отраслевых стандартов для создания моделей данных; высокая стоимость первоначальных вложений, связанных с закупкой оборудования и ПО; дефицит квалифицированных кадров, подготовленных для работы с BIM-технологиями в железнодорожном секторе; необходимость изменения бизнес-процессов организации при внедрении BIM-технологий [18].

»»»

Цифровое описание пространственно-распределенной транспортной системы имеет принципиальное значение для решения широкого спектра железнодорожных задач – от проектирования, строительства, содержания и ремонта пути и инженерных сооружений до координатного управления поездами и поездопотоками, включая организацию движения беспилотных поездов. Наиболее эффективно данные задачи решаются при наличии единой системы пространственных данных с унифицированными правилами и методами создания, хранения и актуализации цифровых моделей пути с высокоточной координатной привязкой.

Цифровые модели перегонов и путевого развития станций являются важнейшим элементом цифровой железной дороги и в том числе служат для создания имитационных моделей – основного на данный момент инструмента для исследования различных эксплуатационных аспектов работы железнодорожного транспорта, начиная от оценки перспектив пропускной способности участков и заканчивая определением набора технических и технологических решений по развитию его объектов. Имитационное моделирование станций и перегонов участка позволяет решать ряд фундаментальных задач: поиск и анализ ограничивающих элементов в работе железнодорожных станций и перегонов, формирование вариантов инфраструктурного и технологического развития этих объектов, оценка предложенных вариантов на основе качественных и количественных параметров, полученных в процессе моделирования, тестирование новой технологии работы в условиях безрисковой среды [19].

Комплексное имитационное моделирование является эффективным цифровым инструментом обоснованного выбора организационно-технических мероприятий для решения ключевой задачи современных железных дорог – повышение пропускной и провозной способности в условиях ограниченности финансовых ресурсов и наличия лимитирующих факторов инфраструктуры.

Важнейшим элементом решения указанных задач является переход к управлению потоками поездов за счет внедрения новых принципов интервального регулирования. Отказ от традиционной светофорной сигнализации и использование цифрового радиоканала как дополнительного контура управления позволяет обеспечить динамически регулируемый интервал попутного следования с его сокращением до 2-3 минут в случае необходимости. Это обеспечивается благодаря внедрению комплексной технологии интервального регулирования на перегонах и главных путях станций и реализации принципа подвижного блок-участка. Не менее перспективным техническим решением является организация пакетного движения поездов (в том числе беспилотных) на принципах виртуальной сцепки (следующие друг за другом поезда с уменьшенным интервалом в пакете) [20].

В этой связи важным направлением цифровизации является развитие высокоскоростных сетей связи на железнодорожном транспорте. Существующие стандарты беспроводной связи типа GSM-R не обеспечивают выполнения нового класса задач. Поэтому в последние годы ведется разработка нового стандарта FRMCS («Система железнодорожной радиосвязи нового поколения»),

который должен заменить к 2030 году стандарт GSM-R и другие узкополосные сети связи.

В качестве базовой технологии рассматривается широкополосная система радиосвязи 5G, которая должна быть адаптирована к нуждам и специфике железных дорог (5G-R). Планируется, что будущий железнодорожный стандарт 5G-R обеспечит возможность построения многофункциональной мультисервисной сети на железнодорожном транспорте, которая позволит решать различные задачи технологической радиосвязи, управления и обеспечения безопасности движения поездов, диспетчеризации, IoT, широкополосного доступа пассажиров к цифровым услугам, а также создания полноценных цифровых двойников железнодорожных активов и перехода к интеллектуальной адаптивной системе планирования и управления перевозочным процессом [21].

Активное внедрение цифровых технологий на железнодорожном транспорте неизбежно ведет к необходимости создания и совершенствования комплексных систем поддержки принятия управленческих решений нового поколения с использованием современных возможностей цифровых систем сбора, обработки и передачи данных. В итоге, при успешном решении указанных выше организационных, технологических и технических вопросов, можно ожидать, что цифровая трансформация приведет к целому ряду фундаментальных изменений на железнодорожном транспорте, включая следующее:

1. Сквозная роботизация процесса ТОиР с обеспечением межмашинного взаимодействия.
2. Переход от систем дескриптивной природы к системам поддержки принятия решений, основанным на методах предиктивной аналитики, с решением многокритериальных задач обработки неструктурированных или плохо структурированных данных.
3. Непрерывный мониторинг текущего состояния железнодорожных активов за счет широкомасштабного внедрения распределенных датчиков IoT, связанных в единую сеть.
4. Внедрение субсидиарных вычислительных моделей и алгоритмов в системах организации взаимодействия автономных транспортных киберфизических систем, обладающих свойством «self-x», совместно с технологией интервального регулирования на основе принципов подвижного блок-участка и виртуальной сцепки.
5. Создание единой системы пространственных данных с высокоточными цифровыми моделями пути всей сети железных дорог.
6. Интеграция методов создания цифровых двойников железнодорожных активов и различных инструментов моделирования и интеллектуального прогнозирования с использованием алгоритмов ИИ.
7. Построение новой парадигмы планирования и управления всеми аспектами транспортного комплекса с использованием адаптивных методов на основе цифровых двойников и кросс-отраслевых платформ аналитики больших данных.
8. Развертывание высокоскоростных сетей связи с возможностью передачи больших объемов данных, в том числе по беспроводным каналам. ■



Список литературы

1. Козлов, А.В. Субсидиарные модели для транспортных киберфизических систем // А.В. Козлов // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – № 1(22). – С. 17-24.
2. Лёвин, Б.А. Цифровая железная дорога: принципы и технологии / Б.А. Лёвин, В.Я. Цветков // Мир транспорта. – 2018. – № 16(3). – С. 50-61.
3. Озеров, А. В. О некоторых направлениях цифровой трансформации железных дорог / А. В. Озеров, А. М. Сабиров // Современные методы и принципы управления перевозочным процессом на транспорте: Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 17–18 мая 2023 года / Под общей редакцией Г.М. Биленко, И.А. Трушиной. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 247-253.
4. Замышляев, А.М. УРРАН – система управления техническими активами на железнодорожном транспорте // А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский, М.А. Бубликова // Труды АО "НИИАС": Сборник статей. Том 1. Выпуск 11. – Москва: Типография АО "Т 8 Издательские Технологии", 2021. – С. 67-82.
5. Шубинский, И.Б. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути // И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, О.Б. Проневич, А.Н. Игнатов, Е.Н. Платонов // Надежность. 2020;20(2):43-53.
6. Кудюкин, В.В. Особенности применения волоконно-оптической сенсорики для систем мониторинга на железнодорожном транспорте / Кудюкин В.В. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. – № 2 (58). – С. 77-83.
7. Кудюкин, В.В. Роботизация как элемент цифровой трансформации / В.В. Кудюкин, Е.А. Дудоров, А.В. Вуколов, К.А. Котова // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 5. – С. 19-23.
8. Kotova, K. Manipulator control system for railroad transport coupling and braking system maintenance /Kotova K., Dudorov E., Kudyukin V. // В сборнике: Proceedings – 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021. – 2021. – С. 601-605.
9. Кудюкин, В.В. Робототехнический комплекс – компонент цифровой железнодорожной станции / Кудюкин В.В., Тарасов К.А., Чупахин Д.П. // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 8. С. 10-14.
10. Андреев, В.Е. Цифровая железнодорожная станция – от концепции к реальному внедрению / Андреев В.Е., Долгий А.И., Кудюкин В.В., Хатламаджиян А.Е., Гришаев С.Ю., Ольгейзер И.А. // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 9. С. 2-6.
11. Озеров, А.В. Техническое зрение в составе систем автоматического управления движением поездов / А.В. Озеров, А.С. Маршова // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022): Труды Международной научно-технической конференции, Самара, 18–21 апреля 2022 года. – Самара: Самарский научный центр РАН. – 2022. – С. 201-205.
12. Козлов, А.В. Мобильные субсидиарные системы // А.В. Козлов // Наука и технологии железных дорог. 2019. Т.3. – 4(12). – С.50-56.
13. Розенберг, Е. Н. Центры управления перевозками: эволюция и целевое состояние / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, Н. О. Бересток // Наука и технологии железных дорог. – 2021. – Т. 5, № 3(19). – С. 9-14.
14. Долгий А.И. Облачные технологии для ответственных систем железнодорожного транспорта / А.И. Долгий, Е.Н. Розенберг, А.В. Озеров // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 11. – С. 20-25.
15. Розенберг, Е.Н. О переходе к предиктивному управлению транспортными системами с использованием Big Data / Е.Н. Розенберг, М.Г. Лысыков, А.В. Озеров, А.М. Ольшанский // Техника железных дорог. – 2018. – № 1 (41). –С. 32-33.
16. Озеров, А.В. Система текущей корректировки графика движения поездов с использованием современных методов обработки данных / А.В. Озеров, Г.М. Биленко // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: Межвузовский сборник научных трудов. – Москва: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта». – 2022. – С. 41-46.
17. Озеров, А.В. Предиктивная аналитика с использованием Data Science на железнодорожном транспорте / А.В. Озеров, А.М. Ольшанский, А.П. Куроптева // Наука и технологии железных дорог. – 2020. – № 4(16). – С. 63-76.
18. Павловский, А.А. К концепции внедрения информационного моделирования в железнодорожном транспортном комплексе / А.А. Павловский, А.В. Озеров, А.П. Куроптева // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – № 3(23). – С. 20-31.
19. Гургенидзе, И.Р. Комплекс имитационного моделирования работы железнодорожных станций и участков / Гургенидзе И.Р., Калинин С.В., Халевин Д.Ю., Козловский А.П. // Железнодорожный транспорт. – 2021. – №12. – С. 38-42.
20. Розенберг Е. Н. Цифровая железная дорога – путь в будущее / Е. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 4. – С. 36-41.
21. Озеров, А.В. Железнодорожная радиосвязь нового поколения / А.В. Озеров, А.П. Куроптева // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – № 1(25). – С. 17-24.