

УДК 004.896

ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ: ОБЗОР

Шульженко Андрей Александрович, аспирант, Ростовский Государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: drew.shaa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В статье представлен обзор гибридных алгоритмов, применяемых для управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. Особое внимание уделяется интеграции методов искусственного интеллекта, оптимизации, машинного обучения и физических моделей для повышения эффективности, надежности и безопасности железнодорожных систем. Рассматриваются ключевые типы гибридных решений: нейро-нечеткие системы, эволюционные алгоритмы с обучением, цифровые двойники, имитационно-оптимизационные подходы и комбинированные стратегии обучения. Описаны примеры успешного применения гибридных моделей в задачах диспетчеризации, прогнозирования технического состояния, оптимизации расписаний, диагностики и энергоэффективности. Приведен сравнительный анализ точности, производительности и устойчивости различных подходов. Выделены преимущества гибридизации по сравнению с одиночными методами, а также обозначены актуальные вызовы и направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: гибридные алгоритмы, железнодорожные системы, автоматизация технологических процессов, интеллектуальные транспортные системы, цифровые двойники, нейронные сети, машинное обучение.

HYBRID ALGORITHMS FOR TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL IN RAILWAY TRANSPORT: A REVIEW

Andrew A. Shulzhenko, postgraduate student, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, E-mail: drew.shaa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

The article presents a review of hybrid algorithms applied to the control of technological processes in railway transport. Special attention is given to the integration of artificial intelligence, optimization, machine learning, and physical modeling methods to improve the efficiency, reliability, and safety of railway systems. The paper discusses key types of hybrid solutions, including neuro-fuzzy systems, evolutionary algorithms with learning, digital twins, simulation–optimization approaches, and combined learning strategies. Examples of successful applications of hybrid models are provided for tasks such as dispatching, condition forecasting, schedule optimization, diagnostics, and energy efficiency. A comparative analysis of the accuracy, performance, and robustness of different approaches is presented. The advantages of hybridization over single-method techniques are highlighted, along with current challenges and future development directions.

Keywords: hybrid algorithms, railway systems, automation of technological processes, intelligent transportation systems, digital twins, neural networks, machine learning.

Введение

В настоящее время наблюдается мировой тренд в использовании интеллектуальных технологий в комбинации с компьютерным моделированием для решения сложных прикладных задач. Железнодорожная отрасль не является исключением: постоянно растут объемы данных и сложность процессов, что стимулирует применение методов искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации и оптимизации управления перевозочным процессом. Однако, как отмечается в работе [2], исследования по применению ИИ на железнодорожном транспорте всё ещё находятся на ранней стадии, а наибольшие перспективы связаны с развитием комбинированных (гибридных) подходов, интегрирующих разные методы ИИ и классические алгоритмы для преодоления ограничений отдельных методов. В недавнем обзоре [3] подчёркивается, что возможности ИИ в решении задач железнодорожного транспорта огромны, но для реализации полного потенциала часто требуется сочетание методов машинного обучения, оптимизации и имитационного моделирования.

Гибридные алгоритмы управления технологическими процессами представляют собой подход, при котором различные методы и модели объединяются в единую систему для более эффективного решения задач управления, прогнозирования, оптимизации и диагностики. Идея заключается в том, чтобы воспользоваться сильными сторонами каждого из компонентов и компенсировать их недостатки за счет другого метода [4]. Например, методы машинного обучения (нейронные сети, решающие деревья и др.) хорошо выявляют скрытые зависимости по данным, но могут требовать больших выборок и страдать от недостатка интерпретируемости. С другой стороны, физические или алгоритмические модели процессов (например, модели движения поездов по известным уравнениям) обладают высокой интерпретируемостью, но часто упрощают реальность. Гибридизация позволяет комбинировать эти подходы, создавая мультимодельные системы, способные учесть как накопленные данные, так и экспертные знания о процессе.

В транспортной отрасли, и прежде всего на железных дорогах, гибридизация особенно востребована из-за сочетания жёстких требований безопасности, сложной физики процессов и высокой неопределённости данных эксплуатации. В данной обзорной статье рассматриваются современные гибридные алгоритмы управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. В разделе 1 приводится описание и классификация основных типов гибридных методов, включая нейро-нечеткие системы, эволюционные алгоритмы с обучением, объединение имитационного моделирования с оптимизацией и др. В разделе 2 представлен обзор применения гибридных моделей для различных задач: управления и регулирования движением, прогнозирования состояний и рисков, оптимизации расписаний и маршрутов, диагностики неисправностей и мониторинга состояния инфраструктуры. В разделе 3 выполнен сравнительный анализ подходов – обсуждаются достигнутая точность и производительность, приводятся метрики качества, формулы и графики из литературы. В разделе 4 обосновывается выбор тех или иных методов для разных прикладных задач и даются рекомендации по их применению. Наконец, в разделе 5 обсуждаются ограничения существующих подходов, актуальные вызовы и перспективы развития гибридных систем в железнодорожной отрасли.

Следует отметить, что в данной работе используются термины машинное обучение (ML) и его частный случай – нейронные сети (НС). При этом акцент на НС делается в тех случаях, когда именно методы, основанные на глубоких нейронных сетях, обеспечили решение поставленной задачи либо продемонстрировали значительное повышение эффективности.

1. Классификация гибридных алгоритмов

Понятие гибридных алгоритмов охватывает широкий класс методов, сочетающих разнородные подходы к моделированию и управлению (рис. 1). В литературе по искусственному интеллекту используется близкий термин гибридные интеллектуальные системы – комбинация двух или более вычислительных методов (нейронные сети, классические методы машинного обучения, методы оптимизации, нечёткая логика и т.п.), совместно решающих задачу лучше, чем каждый по отдельности [4].

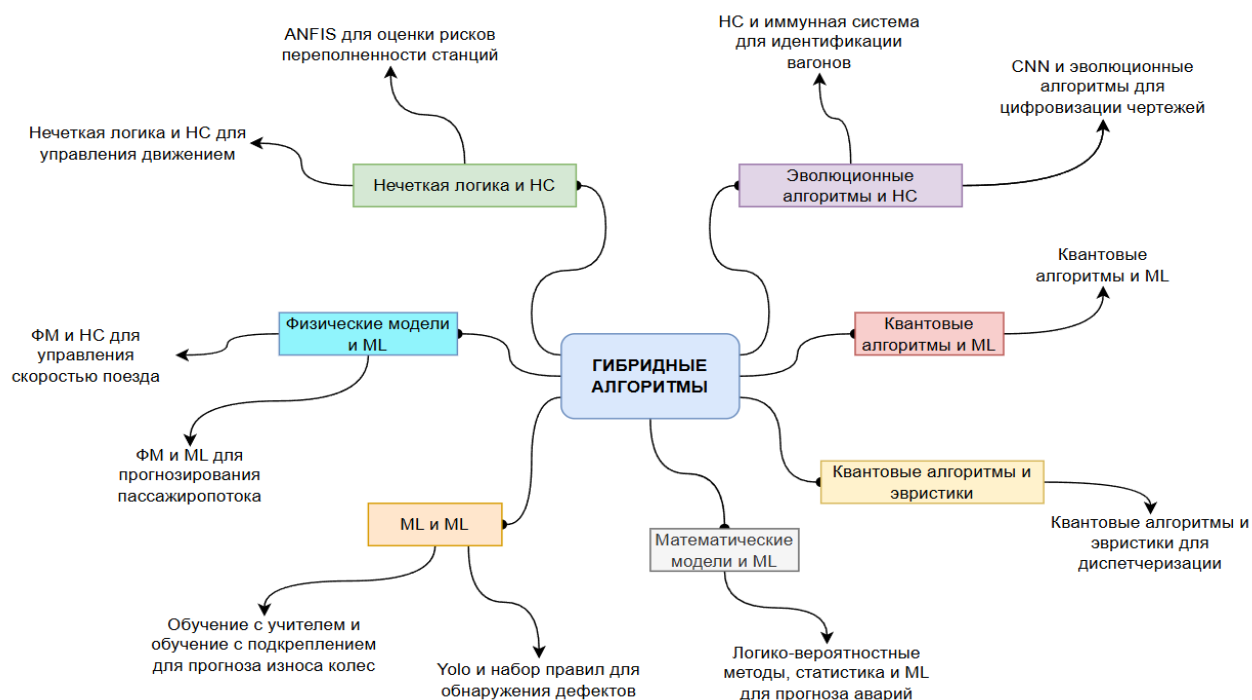


Рис. 1 – Гибридные алгоритмы

В контексте железнодорожных приложений наиболее распространены следующие виды гибридных алгоритмов:

- 1. Нейро-нечеткие системы.** Это комбинации нейронных сетей с аппаратом нечёткой логики. Классический пример – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), объединяющая нечёткие правила с обучением параметров на основе нейросети. Нейро-нечеткие модели успешно применяются для прогнозирования и управления в условиях неопределенности, поскольку соединяют способность нейросетей обучаться по данным с интерпретируемостью нечётких правил. Концепция нечёткой логики была предложена Л.А. Заде в 1965 г. и позволила описывать неточные, лингвистические знания экспертов в форме математических функций принадлежности [5]. С тех пор нечёткие модели стали одним из ключевых компонентов гибридных алгоритмов, позволяя учитывать нечеткость и неопределенность исходной информации.
- 2. Эволюционные и генетические алгоритмы с методами машинного обучения.** Эволюционные алгоритмы (генетический алгоритм, метод роя частиц и др.) часто объединяют с методами машинного обучения для настройки моделей или принятия решений. Например, генетические алгоритмы могут оптимизировать параметры нейронной сети или нечёткой системы. В гибридном алгоритме одна часть отвечает за глобальный поиск (эволюционный подход), а другая – за локальную подстройку на основе данных (обучающая модель). Подобные гибриды используются для сложных задач оптимизации, где классические методы застревают в локальных экстремумах. Обзор таких систем приведен в работе [4], где отмечено, что гибридизация ИИ методов позволяет добиться более высокой точности и устойчивости решений в сравнении с индивидуальными алгоритмами.
- 3. Физически обоснованные модели с ML-компонентами (цифровые двойники).** Данный класс включает гибриды механистических моделей и методов машинного обучения. В таких алгоритмах используется известная физическая модель или имитационная модель процесса, которая затем дополняется ML-модулем для коррекции ошибок или учета неучтенных факторов. Например, в статье [7] предложена гибридная модель, где данные полевого эксперимента используются для вычисления остатка (ошибки) физической модели, и ML-модель обучается прогнозировать этот остаток, повышая общую точность. Подобные physics-informed подходы получили развитие в концепции цифровых

двойников, которые сочетают детальные симуляторы инфраструктуры или подвижного состава с модулями обновления по данным и прогнозирования [31]. Пример архитектуры подобной системы представлен на рисунке 2.

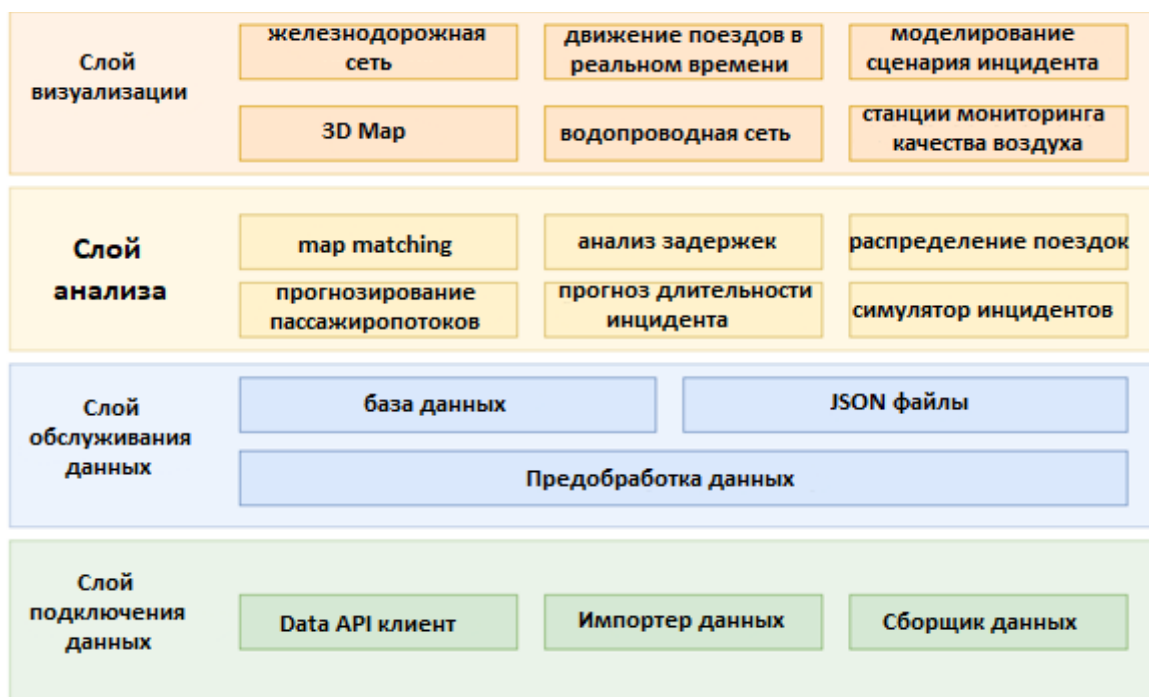


Рис. 2 – Схема цифрового двойника для моделирования железных дорог

Гибридные цифровые двойники уже применяются, например, для энергосистем железных дорог [25] и для прогнозирования пассажиропотоков с использованием симуляции движений поездов и нейросетевых моделей спроса [31].

- 1. Имитационное моделирование с встроенной оптимизацией.** В задачах диспетчерского управления часто применяются гибридные симуляционно-оптимизационные методы. В них имитационная модель железнодорожной системы (например, модель движения поездов по участку) комбинируется с алгоритмом оптимизации, который в ходе моделирования ищет наилучшее решение. Такая архитектура известна как *hybrid simulation* – сначала строится дискретно-событийная имитация, а в критические моменты применяется эвристический или оптимизационный алгоритм для разрешения конфликтов. Классическая работа Cheng (1998) [17] описала один из первых примеров гибридной симуляции для перераспределения ресурсов при сбоях в движении поездов.
- 2. Гибридное обучение.** Относительно молодое направление – сочетание обучения с учителем, без учителя и с подкреплением. Например, в работе [14] предложена гибридная стратегия обучения, объединяющая методы с учителем и обучение с подкреплением для задачи прогнозирования износа колес подвижного состава при дефиците данных. Идея в том, что ограниченные реальные измерения используются для обучения с учителем, а недостающая информация дополняется путем моделирования (генерации ситуаций) и обучения с подкреплением агента, чтобы имитировать накопление износа. Такие смешанные стратегии обучения позволяют эффективнее использовать доступные данные и экспертизу.

Следует отметить, что терминология в литературе может различаться. Некоторые авторы под гибридными алгоритмами подразумевают только нейро-нечеткие или эволюционно-нейронные системы, тогда как другие включают любые мульти-модельные решения. В контексте управления железнодорожными технологиями к гибридным подходам относят все перечисленные выше комбинации. Их объединяет одно свойство: использование более одного метода и/или модели при принятии решений, причём комбинация может

быть последовательной (выход одного модуля является входом другого, например, ML-модель корректирует прогноз физической модели) или параллельной (несколько модулей работают одновременно и их результаты объединяются решающим блоком, как в системах слияния данных).

Для конкретики приведем несколько примеров из других отраслей, которые иллюстрируют суть гибридизации. В нефтегазовой промышленности гибридные интеллектуальные системы успешно применяются для моделирования пластов. Обзор [4] отмечает, что объединение нейронных сетей с эволюционными алгоритмами и нечеткой логикой позволяет повысить точность прогнозов свойств нефтяных пластов на 5–10% по сравнению с отдельными моделями. В частности, предлагается общая схема, где каждый метод решает свою часть задачи, а затем результаты синтезируются (рис.3).

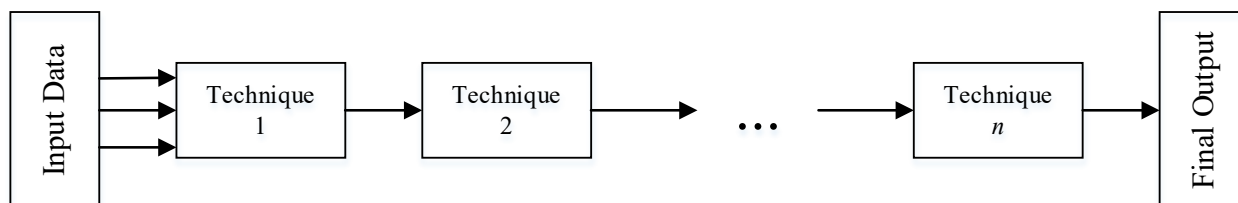


Рис. 3 – Обобщенная структура гибридных интеллектуальных систем

Такое же «разделение труда» характерно и для железнодорожных гибридных алгоритмов – далее мы увидим, как разные комбинации методов используются для различных прикладных задач.

2. Применение гибридных моделей и алгоритмов в железнодорожной отрасли

2.1 Управление движением и системами управления

Одной из ключевых областей применения гибридных алгоритмов является управление движением поездов и работа систем автоматического управления, где требуется высокая точность и надежность на фоне неопределенности и помех. Гибридные подходы позволяют улучшить качество регулирования скорости, устойчивость движений и безопасность.

Гибридное моделирование для автоматического вождения. В работе [8] предложен метод автоматического управления скоростью высокоскоростного поезда на основе гибридного моделирования механической и данных. Сначала строится физическая модель динамики поезда (учитывающая силы тяги, сопротивления движению и торможения), затем на основе данных реального профиля движения применяется ML-модуль для компенсации рассогласования модели и фактического движения [8]. В эту гибридную модель встроен предсказывающий нечеткий PID-регулятор, который управляет тягой и торможением (рис.4).

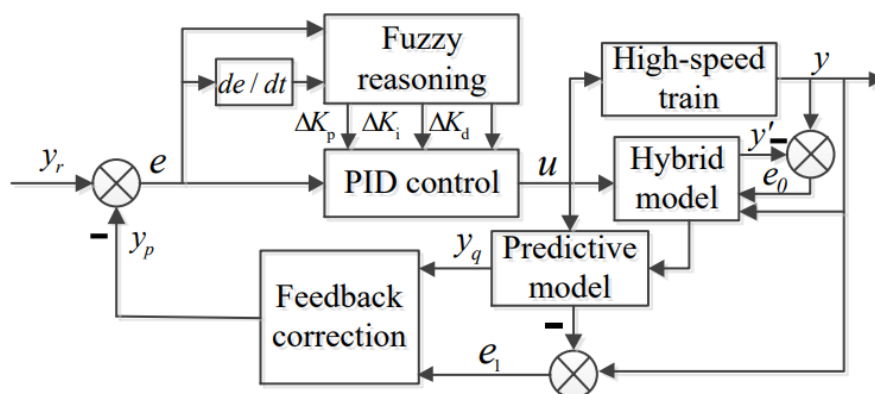


Рис. 4 – Схема гибридной модели с встроенным предсказывающим нечетким PID-регулятором

Сравнение с чисто механистическим управлением показало, что гибридный подход улучшает точность поддержания скорости: средняя ошибка регулирования скорости снизилась примерно на 69%. Это означает более плавное следование графику, экономию энергии и повышение безопасности. Авторы [8] отмечают, что такая мультимодельная система сочетает преимущества точной физической модели и обучаемого компенсатора, что особенно эффективно при изменении условий движения (нагрузки, состояния пути и пр.).

Объединение нечёткой логики и классического управления. Для систем автоматического управления в условиях неопределённости перспективны гибриды, сочетающие методы классической теории управления (например, ПИД-регуляторы, наблюдатели состояния) с нечеткой логикой. В работе [6] предложен именно такой подход для иерархических многоуровневых систем. Проведенный анализ методов моделирования динамики систем управления при неопределённости показывает, что наиболее адекватными являются гибридные методы, включающие как теорию нечеткой логики, так и методы автоматического управления. Авторы отмечают, что при наличии неопределённости решение задачи координации подсистем существенно усложняется, и применение гибридного подхода (например, добавление нечеткого модуля для коррекции управляющих воздействий) позволяет повысить надежность управления. Практически это реализовано как информационно-аналитическая система мониторинга режимов, где классические регуляторы дополняются блоком нечёткого вывода для учета неточных факторов.

Гибридное управление подвешиванием подвижного состава. В области вибрационной защиты и комфорта пассажиров также находит применение гибридный ИИ. Так, в работе [9] разработан гибридный алгоритм управления поперечной стабильностью вагона, сочетающий классический активный демпфер с интеллектуальным контроллером. Авторы интегрировали обучение с учителем и с подкреплением: сначала нейронная сеть обучается на данных имитации колебаний, затем на ее основе формируется стратегия управления демпфирующим устройством, которая уточняется с помощью алгоритма Q-learning (обучение с подкреплением) при различных сценариях пути. Результат – по сравнению с традиционным регулятором, гибридная стратегия снизила боковые ускорения примерно на 15-20% при тех же ограничениях по устойчивости. Таким образом, комбинация методов позволила добиться более комфортного хода поезда даже при неопределённых возмущениях (порывы ветра, неровности пути).

Восстановление графика движения на основе гибридного ИИ. Диспетчеризация движения при сбоях – еще одна задача, в которой гибридные алгоритмы проявили эффективность. Компания Hitachi применила подход Hybrid AI, объединяющий машинное обучение и эвристический поиск, для автоматического восстановления расписания при нарушениях графика [10]. Система анализирует отклонения (задержки поездов) и с помощью обученной модели предсказывает, какие коррективы приведут к минимальным дальнейшим сбоям. Далее эвристический алгоритм (правила на основе опыта диспетчеров) уточняет и проверяет коррекцию расписания. Отчет [10] отмечает, что такая система за секунды предлагает план восстановления графика, сравнимый по качеству с решениями опытных диспетчеров, и тем самым существенно сокращает время реагирования на инциденты. Здесь гибридизация проявляется во включении обучаемого прогноза последствий тех или иных действий в контур классического эвристического планирования.

Приведенные примеры показывают разнообразие гибридных подходов к задачам управления движением. Обобщая, можно отметить следующие преимущества гибридных алгоритмов в системах управления:

- Повышение точности моделей за счет учета реальных данных (пример [8] – ML-компенсатор к физической модели);
- Устойчивость к неопределённости через включение нечёткой логики или обучаемых компонентов (пример [6] – нечёткий модуль к классическому регулятору);
- Адаптивность и самообучение стратегии управления (пример [9] – комбинированное обучение демпфера);
- Быстродействие и качество решений в нештатных ситуациях благодаря предобученным моделям (пример [10] – Hybrid AI для диспетчеризации).

Таким образом, гибридные алгоритмы в управлении позволяют объединить проверенные алгоритмические решения с возможностями ИИ, обеспечивая более высокую эффективность и безопасность движения.

2.2 Прогнозирование и оценка состояния

Переходим к задачам, где ключевым является предсказание параметров и рисков – именно здесь синергия данных и моделей даёт заметный прирост заблаговременности и точности решений. Задачи прогнозирования на железнодорожном транспорте включают предсказание спроса и пассажиропотока, прогноз задержек и интервалов движения, оценку рисков нарушений безопасности и состояния инфраструктуры, прогнозирование износа элементов пути и подвижного состава. Гибридные модели нашли широкое применение в этих направлениях благодаря своей способности учитывать разнородные факторы – статистические данные, физические закономерности, экспертные оценки.

Прогнозирование рисков и безопасности. В работе [11] предложен гибридный метод прогнозирования интенсивности нарушений безопасности движения поездов. Он назван гибридным потому, что сочетает общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) и статистические данные по состоянию инфраструктуры и человеческого фактора. Как отмечает автор, «гибридным предлагаемый метод назван потому, что контроль значения вероятности схода и уточнение отдельных входных данных производятся на основе отраслевых статистических данных». Иными словами, к классической модели расчета вероятности отказов (ОЛВМ, основанной на построении дерева событий и оценке вероятностей) добавляется коррекция на основе реальных наблюдений – показатели состояния пути, отчеты о нарушениях, интенсивность природных воздействий. Такая комбинация позволила повысить точность краткосрочного прогнозирования риска аварий на участке Москва-Санкт-Петербург, что подтверждено экспериментально. В последующих работах того же автора [12] гибридный метод был применен для оценки функциональных рисков на разных уровнях управления путевым хозяйством, показав способность учитывать динамику факторов риска во времени.

Прогнозирование технического состояния и отказов. Предиктивное обслуживание инфраструктуры – приоритетная задача, направленная на предупреждение отказов. Гибридные алгоритмы здесь объединяют данные мониторинга с физическими моделями деградации. Например, в [15] рассмотрено прогнозирование разрушения балластного слоя пути на основе гибридной ML-методологии. Разработанная модель комбинирует метод машинного обучения (градиентный бустинг) для обработки большого массива диагностических данных (вибрации, нагрузки) с априорными знаниями о механизме разрушения балласта. За счет такого совмещения удалось достичь высокой точности предсказания степени износа балластной призмы: коэффициент детерминации $R^2 \sim 0,9$ (рис. 5) на проверочных данных, что на 10-15% точнее, чем при использовании только статистического или только физического подхода.

Авторы [15] отмечают, что гибридизация позволила учесть и нелинейные зависимости в данных, и фундаментальные ограничения (например, максимальные напряжения, при которых происходит поломка щебня).

Другой пример – гибридное прогнозирование износа колес, представленное в [14]. Здесь традиционная модель износа (основанная на пробеге, нагрузке и радиусе кривых) дополняется обучающейся компонентой. Нейронная сеть, обученная на ограниченных данных по измеренному износу, используется для коррекции параметров эмпирической формулы, а при нехватке данных запускается модель с подкреплением, которая генерирует дополнительные сценарии нагрузки на колесо. В результате гибридная система сумела прогнозировать толщину гребня колеса с средней ошибкой менее 5% за период в 6 месяцев, тогда как чисто эмпирическая формула давала ошибку около 15% на тех же данных. Такой подход особенно ценен в условиях, когда измерения реки или недоступны – модель фактически самообучается, комбинируя реальные наблюдения и виртуальные эксперименты.

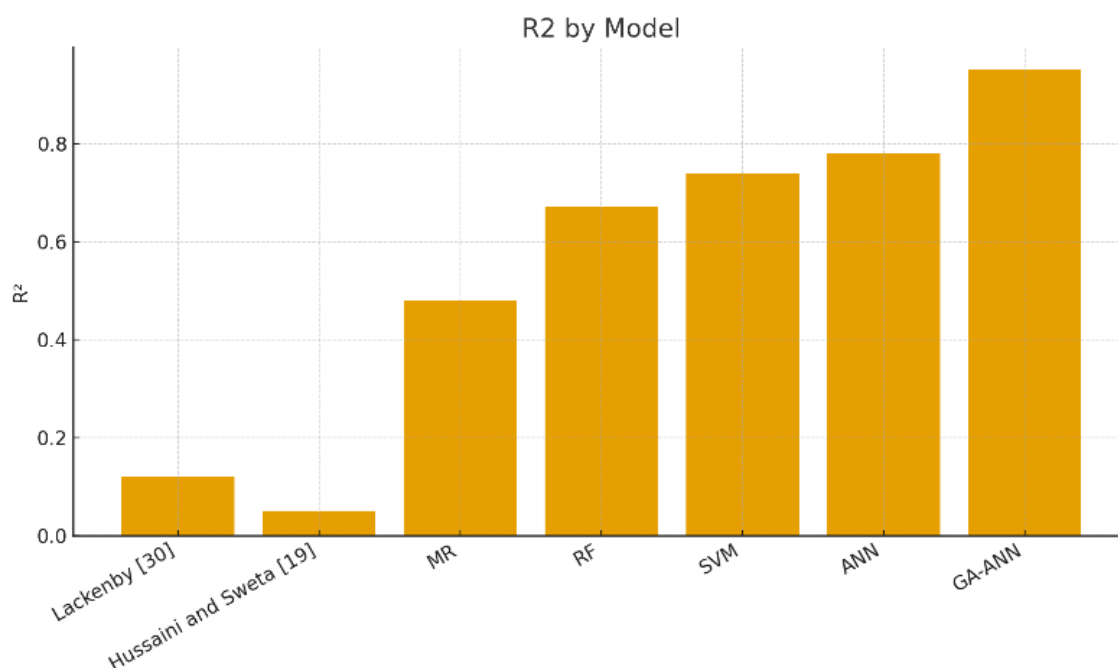


Рис. 5 – Сравнение моделей по метрике R^2

Сокращения: MR – многомерная регрессия; RF – случайный лес; SVM – метод опорных векторов; ANN – искусственные нейронные сети; GA-ANN – генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети.

Прогнозирование спроса и потоков. Вопросы прогнозирования пассажиропотока, грузопотоков, потребности в перевозках тоже решаются гибридными методами. Современные Digital Twin-платформы для железных дорог, такие как описанная в [25], включают модуль прогнозирования пассажиропотока на основе нейросетей (например, LSTM-сетей) в сочетании с симуляцией работы сети при различных сценариях нарушений. Такая платформа принимает в реальном времени данные о движении поездов и исторические данные мобильных операторов по перемещению пассажиров, с помощью ML-моделей прогнозирует прибытие пассажиров на станции, а затем на основе имитации оценивает влияние возможных сбоев (отмен, задержек) на накопление людей на станциях [31]. Выходы этих моделей интегрируются: прогнозы пассажиропотока используются для оценки качества сервисов и выработки управленческих решений (например, распределения резервных составов или информирования пассажиров). По результатам, представленным в [25], такая гибридная система дала возможность с большой точностью предсказывать количество пассажиров на станции (ошибка не более 3-5% в часовых интервалах) и значительно улучшила реагирование на массовые нарушения (например, при закрытии участка из-за ЧС).

Оценка рисков скопления пассажиров. Отдельно стоит отметить применение нейронечетких гибридов для оценки рисков, связанных с обслуживанием пассажиров. Работа [13] демонстрирует использование ANFIS (нечёткой нейронной системы) для оценки уровня переполненности и толпы на железнодорожных станциях. В данном случае комбинируются данные видеонаблюдения, счетчиков пассажиров и экспертные правила: нечёткая система на основе нескольких входных факторов (плотность толпы, скорость ее движения, промежутки между людьми) выдаёт индекс риска, а нейронное обучение на исторических данных настроило функции принадлежности и правила системы. По результатам внедрения в тестовом режиме, система [13] сумела за 1-2 минуты до достижения критического уровня заполняемости выдавать предупреждение с точностью ~90%. Таким образом, гибридный интеллектуальный алгоритм помогает предотвратить инциденты, связанные с опасной давкой, совмещая в себе человеческий опыт (правила оценки) и машинное обучение для адаптации к конкретной станции.

В области прогнозирования и оценки состояния гибридные алгоритмы позволяют учитывать широкий спектр факторов. Основные достоинства такого подхода: возможность интеграции экспертных знаний и больших данных, повышение точности и заблаговременности прогнозов, устойчивость к неполноте и шуму данных. Метрики

эффективности обычно включают коэффициент детерминации R^2 , среднюю абсолютную ошибку (MAE), среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE) и других. Например, для оценки точности прогнозов часто применяют MAPE, рассчитываемую по формуле (1):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (1)$$

где y_i – истинное значение, $\hat{y}_i$ – прогноз модели.

В упомянутых выше исследованиях гибридные модели дают MAPE существенно ниже, чем у одиночных методов. Это подтверждает, что сочетание различных подходов действительно улучшает качество прогнозирования в железнодорожной отрасли.

2.3 Оптимизация и планирование (расписания, маршруты, энергоэффективность)

Задачи оптимизации – одни из самых трудоемких в транспортных системах, поскольку требуют учета множества ограничений и поиска решений в комбинаторно взрывных пространствах. Гибридные алгоритмы успешно применяются для таких задач, как составление расписаний движения поездов, диспетчерское регулирование при отклонениях, формирование составов и маршрутов, а также оптимизация энергетических режимов тяги. Отличительной чертой гибридных подходов здесь является интеграция алгоритмов искусственного интеллекта в классические или эвристические схемы оптимизации.

Управление графиком и разрешение конфликтов. Исторически первые исследования в этой области сфокусировались на алгоритмах автоматического разрешения конфликтов в расписании. Еще в 1990-х годах были предложены эвристики, моделирующие действия диспетчера. Так, И. Сахин в 1999 г. разработал алгоритм на основе анализа конфликта двух поездов и итеративного переназначения порядка прохождения перегонов [30]. Эта эвристика стала основой для многих последующих работ. Тем не менее, современные требования (увеличение интенсивности движения, многокритериальность – пунктуальность vs. экономичность) требуют более интеллектуальных решений.

Гибридные алгоритмы для оптимизации графиков часто сочетают методы дискретной оптимизации с имитационной моделью железнодорожной линии. Пример – метод гибридной симуляции, предложенный еще в [17]. Имитационная модель (отражающая движение поездов и сигнальную систему) используется для оценки последствий тех или иных решений, а поиск оптимального решения (например, выбор поезду места остановки для пропуска) выполняется встроенным алгоритмом на основе эвристических правил. В более поздней работе [18] предложена усовершенствованная гибридная методика: имитация движения грузовых поездов в узле объединена с применением эвристики Tabu Search при возникновении конфликтов, что позволило быстро генерировать реалистичные корректировки расписания. Тестирование в [18] показало сокращение среднего времени опаздывания поездов примерно на 12% по сравнению с чистой имитацией без оптимизатора.

Другой подход – включение методов машинного обучения в процедуру оптимизации расписания. К примеру, в работе [19] разработан гибридный алгоритм для пересоставления расписания высокоскоростных поездов при сбоях, комбинирующий метод скользящего окна (rolling horizon) и многокритериальный генетический алгоритм NSGA-II с интегрированной нейросетью. Суть в том, что задача большого масштаба дробится на интервалы (окна планирования), для каждого решается подзадача оптимизации расписания (минимизация отклонения от графика и затрат) с помощью NSGA-II. При этом нейросеть, встроенная в алгоритм, заранее обучена предсказывать качественные оценки расписаний, что ускоряет сходимость NSGA-II [19]. Такой гибрид смог улучшить оба критерия качества расписания – например, снижение суммарного опоздания пассажиров на ~16% на малой сети. Важно, что с помощью предобученной модели удалось значительно сократить время расчета: алгоритм сходился на 20-30% быстрее базовой версии NSGA-II. Тем самым обеспечена пригодность для использования в реальном времени при диспетчеризации.

Комбинированные алгоритмы для формирования поездов. В задаче формирования составов и ценообразования на перевозки (train formation and pricing) также находят применение гибридные модели. Так, в работе [22] решалась задача оптимального формирования грузовых поездов под неопределенный спрос как комбинация ML и оптимизации.

Авторы [22] сперва обучили модель машинного обучения для прогнозирования спроса на перевозки и доходов при различных ценовых стратегиях (по историческим данным и сценариям), а затем встроили эту модель в стохастическую оптимизационную задачу формирования поездов. Итоговый гибридный алгоритм позволяет одновременно определять оптимальный состав поезда (сколько вагонов каких категорий включить) и оптимальные тарифы на грузы, чтобы максимизировать прибыль при учете неопределенности спроса. Эксперименты показали, что такая система приносит на 8-15% больше прибыли, чем традиционные подходы, благодаря более точному учету вероятностного спроса и гибкому ценообразованию [19]. Ключом к успеху стало именно объединение прогноза (ML) с двуцелевой оптимизацией (стоимость vs. обслуживание спроса).

Гибриды для энергосбережения. Важной областью оптимизации на ж.д. транспорте является энергоэффективное ведение поездов. Здесь тоже применяются гибридные алгоритмы. Например, в работе [23] предложен динамический адаптивный гибридный алгоритм для оптимизации профиля скорости поезда с целью минимизации энергопотребления. Алгоритм сочетает два уровня: на верхнем уровне генерируются варианты профиля движения (участки разгона, холостого хода, торможения) с помощью адаптивного правила, обученного на данных симулятора движения (т.е. ML-компонента, предсказывающего энергию для данного профиля), а на нижнем уровне генетический алгоритм ищет оптимальную комбинацию этих участков. Такая двухуровневая схема позволила достичь экономии энергии до 15% без увеличения времени хода поезда [23]. В другом исследовании [24] рассматривается интеграция модели электроснабжения (электрической схемы участка) и данных эксплуатации в цифрового двойника тяговой сети (рис. 6).

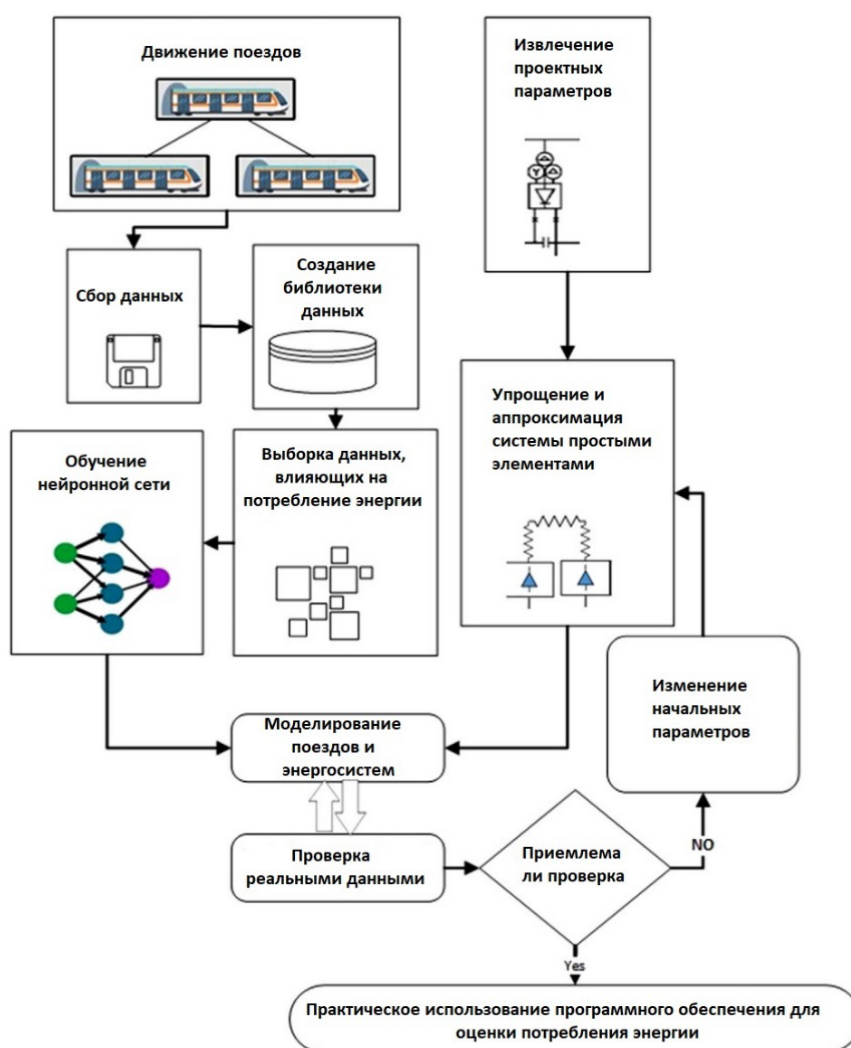


Рис. 6 – Методологическая схема

Данная гибридная модель, объединяющая механизм (физическая модель цепи) и данные (измерения токов, напряжений, нагрузок), применяется для оценки эффективности рекуперации энергии и оптимизации распределения энергии между поездами. Авторы [24] сообщают, что их гибридный подход позволил на 8% увеличить использование рекуперативного торможения за счет интеллектуального согласования режимов движения поездов – по сути, нейросетевая модель предсказывает оптимальные моменты начала торможения, чтобы максимизировать прием энергии другим поездом.

Квантово-классические гибриды.

Отметим, что в рассматриваемом подходе на текущем этапе алгоритмы машинного обучения не применяются. Используются квантовые вычисления в комбинации с классическими методами оптимизации. Под квантовыми вычислениями здесь понимается решение задач, сведённых к квадратичной безусловной бинарной оптимизации (QUBO):

$$\min_{x \in \{0,1\}^n} x^T Q x \quad (2)$$

где $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ симметричная матрица коэффициентов, а вектор x содержит бинарные переменные. Эквивалентной постановкой является модель Изинга:

$$\min_{x \in \{-1,1\}^n} \left(\sum_i h_i s_i + \sum_{i < j} J_{ij} s_i s_j \right) \quad (3)$$

где s_i – спиновые переменные, h_i – локальные поля, J_{ij} – коэффициенты взаимодействия.

Поиск глобального минимума такой энергии соответствует нахождению оптимального решения исходной задачи. В работе [21] задача конфликтного планирования поездов формулируется именно в такой форме. Из-за ограничений современных квантовых устройств (число кубитов, топология, шум) применяется гибрид: классические эвристики выполняют разбиение задачи на кластеры, тогда как внутри кластеров наиболее конфликтные переменные оптимизируются квантовым отжигом. Эксперименты показали ускорение нахождения допустимых решений на 30-40 % по сравнению с классическим методом при некотором снижении качества.

Перспективы связаны с интеграцией методов машинного обучения – для генерации стартовых решений, сокращения размерности или настройки параметров оптимизации, а также с применением квантовых технологий для ускорения обучения и оптимизации в ML-задачах.

2.4 Диагностика, мониторинг и техническое зрение

Одно из перспективных направлений – применение гибридных алгоритмов для автоматической диагностики состояния инфраструктуры и подвижного состава, включая системы технического зрения и распознавания. Здесь гибридность часто проявляется в слиянии данных с разных датчиков или комбинации алгоритмов распознавания образов с логическими правилами принятия решения.

Обнаружение дефектов пути и контактной сети. В современной диагностике путевого хозяйства широко применяются системы машинного зрения на базе нейросетей (например, алгоритмы типа YOLO для обнаружения объектов на изображениях пути). Однако полностью автоматическое распознавание может давать ложные срабатывания, особенно при сложной обстановке на изображении. Поэтому в работе [26] предложена гибридная система обнаружения дефектов на рельсовых линиях, объединяющая методы объектного детектирования и правила на основе контекстной информации. Архитектура состоит из двух параллельных ветвей: первая – нейросеть YOLOv5 для обнаружения объектов-дефектов (например, излом болта крепления, трещина на подошве рельса), вторая – аналогичная нейросеть для обнаружения контекстных элементов (наличие стыковых накладок, креплений, заземляющих проводов и т.д.) [19]. На завершающем этапе выполняется слияние результатов – специальный модуль принимает решение, является ли обнаруженный объект действительно дефектом, на основе правил, учитывающих и объект, и контекст. Например, если нейросеть обнаружила тёмное пятно на рельсе (возможный излом), но при этом в

контексте присутствует элемент «стыковая накладка» на этом месте, то система решает, что это не дефект, а стык (т.к. излом рельса не будет сопровождаться наличием накладки). Такие правила прописаны экспертами и формализуют логику оценки ситуации. В результате гибридная система [26] достигает высокой точности: по данным авторов, точность обнаружения дефектов составила ~95% при практически нулевом количестве ложных тревог, тогда как чисто нейросетевой детектор выдавал множество ложных срабатываний (масляные пятна, тени ошибочно классифицировались как дефекты).

На рисунке 7 представлены примеры изображений с системы технического зрения [26].

Видно, что сложность сцены (наличие посторонних объектов, различных элементов инфраструктуры) затрудняет однозначную классификацию нейросетью. Гибридный подход с анализом контекста позволяет устранить неоднозначность. Например, на фрагменте (с) обе белые рамки указывают на места, где отсутствуют гайки на закладных болтах крепления рельса – алгоритм классифицирует это как дефект типа «missing nuts». При этом он учитывает, что рядом присутствуют другие элементы (шпалы, целые болты) и на основе правила относит ситуацию именно к дефекту крепления, а не к случайному предмету на пути.

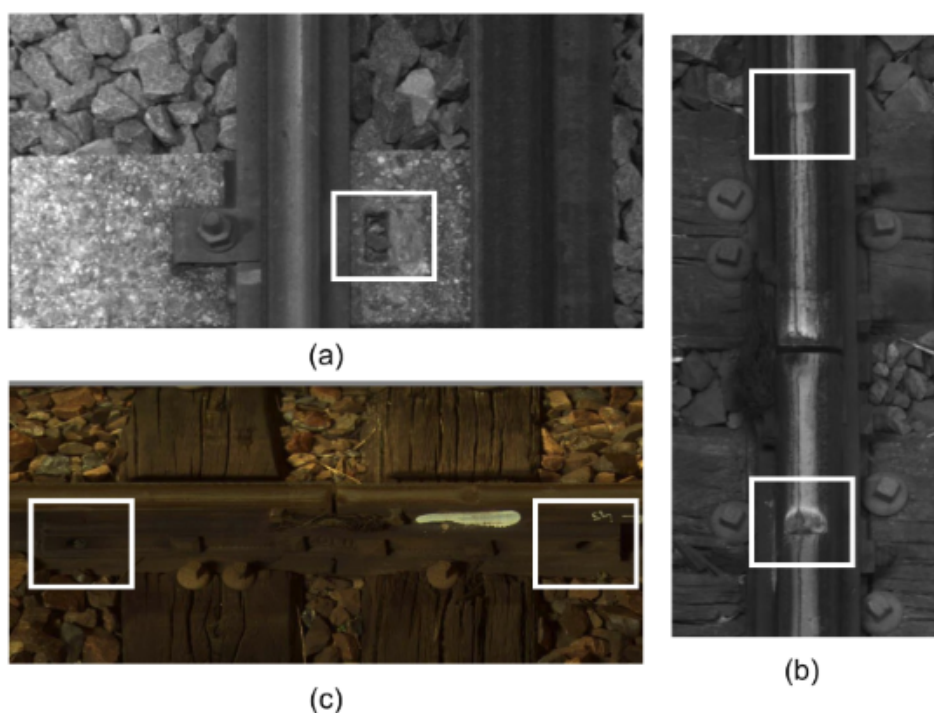


Рис. 7 – Примеры возможных дефектов пути (выделены белыми рамками) [26].
(а) Поврежденное рельсовое крепление (дефектный клеммный болт), (б) поверхностные дефекты рельса (трещины/выбойки на головке), (с) отсутствующие закладные болты (неисправность крепления шпалы)

Цифровизация чертежей и документации. Еще один интересный пример гибридной методики диагностики – автоматизация обработки инженерных чертежей и схем. В работе [27] решалась задача распознавания и цифровой векторизации схем релейной централизации (схем СЦБ) железной дороги. Предложенный метод сочетает машинное обучение (сверточные нейросети) для распознавания отдельных графических примитивов на отсканированных чертежах и алгоритмы оптимизации для корректировки и приведения этих примитивов к строгой топологии схемы. Проще говоря, нейросеть определяет на изображении линии, условные обозначения реле, контактов и т.п., но ее результаты могут быть фрагментированы или смещены. Поэтому далее подключается алгоритм, основанный на эволюционном подходе, который подбирает параметры (поворот, сдвиг) компонентов, чтобы собрать их в логически цельную схему (с замкнутыми цепями, соединенными контактами). Этот гибрид позволил достичь практически 100% точности оцифровки: все соединения на чертеже были корректно восстановлены в цифровом виде. Таким образом, комбинация распознавания образов и алгоритмического доведения до консистентности обеспечивает полностью автоматическую цифровизацию старых чертежей, что важно для перевода архивов железных дорог в электронный формат.

Идентификация подвижного состава. Гибридные нейросетевые алгоритмы применяются и для идентификации номеров вагонов, локомотивов, а также обнаружения неисправностей подвижного состава на ходу. Например, система, описанная в диссертации [28], использует комбинацию нейросети и искусственной иммунной системы для автоматической идентификации единиц подвижного состава по изображениям и сигналам RFID. Нейросеть выделяет признаки (особенности изображения номера вагона, акустический «отпечаток» вагона и др.), а алгоритм, вдохновленный биологической иммунной системой, выполняет сопоставление этих признаков с эталонами в базе, обнаруживая совпадения даже при помехах. Результат – надёжность идентификации вагонов в режиме онлайн достигла 99%, устойчивость к шуму повысилась по сравнению с одной нейросетью, а время обработки осталось в рамках, допустимых для работы системы на реальном потоке вагонов [28]. Здесь гибридизация позволила объединить обучение (нейросеть обучается выделять оптимальные признаки) с алгоритмом, имитирующим распознавание антигенов иммунной системой, что даёт высокую точность при малом числе ложных срабатываний.

Гибридные методы в железнодорожном транспорте демонстрируют высокий потенциал как в задачах оптимизации, так и в диагностике и мониторинге. Их сила заключается в сочетании разнородных подходов – симуляции и эвристик, машинного обучения и математической оптимизации, экспертных правил и обучаемых моделей. Это позволяет решать многокритериальные задачи (например, минимизацию задержек и отклонений от графика) эффективнее традиционных методов, снижать интегральные показатели потери качества обслуживания на десятки процентов и повышать устойчивость расписаний. В области диагностики гибридные системы обеспечивают более полное и надежное обнаружение дефектов благодаря объединению данных разных типов (видео, аудио, сенсоры) и комбинации алгоритмов с экспертными знаниями. Такой подход не только уменьшает число ложных тревог и повышает интерпретируемость результатов, но и позволяет системам адаптироваться к новым типам неисправностей. Несмотря на то что внедрение гибридных решений требует значительных вычислительных ресурсов и интеграции сложных технологий (например, решателей смешанного целочисленного программирования или высокопроизводительной обработки потоковых данных), общая тенденция указывает на их возрастающую доступность и практическую ценность. В результате, гибридные методы могут служить важным инструментом повышения эффективности управления перевозками и надежности железнодорожной инфраструктуры.

3. Сравнительный анализ подходов

Как видно из обзора, гибридные алгоритмы разрабатываются для самых разных задач железнодорожной отрасли. Важно понять, какие комбинации методов дают наилучший эффект в тех или иных условиях, а также как они соотносятся по показателям точности и производительности. В данном разделе мы проведем сравнительный анализ упомянутых подходов, сведя воедино их ключевые характеристики и результаты.

Точность и качество решений. Практически во всех работах отмечается, что гибридный подход обеспечивает лучшую точность или меньшую ошибку по сравнению с любым из отдельных методов. Например, гибридная модель прогнозирования ROP (бурения) в [7] имела коэффициент детерминации $R^2 = 0.9936$ против 0.9934 у лучшей индивидуальной модели (Random Forest) [30]. Хотя разница кажется небольшой, в условиях реальных данных она существенна и сопровождалась снижением RMSE (4) и MAPE (1) примерно на 5-10% [30]. В железнодорожном контексте аналогичные наблюдения: гибридное управление скоростью [8] снизило ошибку регулирования с ~3 км/ч до ~1 км/ч, гибридное прогнозирование износа [14] уменьшило среднюю процентную ошибку на десятки процентов, гибридное расписание [19] улучшило оба критерия оптимизации (задержки и отклонения) на двузначные проценты. Эти данные подтверждают, что комплексный учёт факторов через гибридизацию действительно повышает качество работы алгоритмов.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (4)$$

Стоит отметить, что наибольший выигрыш часто достигается в случаях, когда компоненты гибридной модели существенно различаются по природе. Например, комбинация «физическая модель + нейросеть» (как в [8] или [7]) даёт более значимый прирост точности, чем комбинация схожих методов (например, нейросеть + дерево решений). Это объяснимо: физическая модель приносит структурную точность, а нейросеть – гибкость подстройки. Сходные методы же зачастую дублируют друг друга. Таким образом, при разработке гибридного алгоритма важно выбирать действительно дополняющие друг друга компоненты.

Производительность и вычислительная сложность. Гибридные алгоритмы, как правило, сложнее и требуют больших ресурсов, чем классические. Тем не менее, правильно спроектированный гибрид может выигрывать во времени за счет сокращения переборных или числа итераций. Пример – гибрид NSGA-II с нейросетью [19]: предсказание нейросети помогает алгоритму быстрее сходиться к оптимальному фронту решений, фактически убирая необходимость проверять заведомо плохие варианты. В результате время расчета уменьшилось примерно на 20% относительно чистого NSGA-II [19]. Аналогично, в гибриде для цифрового двойника [25] симуляция используется точно – только в случае нарушения – и на остальном промежутке работают быстрые нейросетевые модели, что дает возможность близкого к реальному времени анализа ситуации.

С другой стороны, некоторые гибриды могут оказаться тяжеловесными. Например, сочетание имитации и оптимизации [18] требует значительного времени, если конфликты многочисленны, так как симуляция должна многократно перезапускаться. В таких случаях на помощь приходят параллельные вычисления и распределенные системы – их использование само по себе можно рассматривать как технический гибрид (объединение алгоритма с инфраструктурой НРС). В обзорной статье [2] подчёркивается, что узким местом ИИ в железнодорожной отрасли становится именно вычислительная часть, и ожидается, что дальнейшие достижения будут связаны с внедрением ускорителей, облачных платформ и квантовых вычислений для самых тяжелых задач.

Метрики и критерии оценки. В каждой подзадаче используются профильные метрики. Для прогнозов – R^2 (5), RMSE (4), MAE (6) MAPE.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i e_i^2}{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 \quad (6)$$

Для расписаний – суммарная/средняя задержка и число конфликтов; для управления – MSE/ISE/IAE, перерегулирование, время установления; для диагностики – precision/recall/F1 и время отклика. Далее приведем значения для рассмотренных работ и сравним их с базовыми методами. Рассмотрим, какие метрики применялись в рассмотренных работах и как по ним проявили себя гибридные модели:

- 1. Метрики точности прогнозов:** R^2 , RMSE, MAPE, MAE. Гибридные модели почти всегда показывали более высокое R^2 и более низкие ошибки. Например, [7] (нефть) – снижение RMSE ~30%, [15] (балласт) – повышение R^2 с 0.8 до 0.9, [14] (износ колес) – снижение MAPE с 15% до 5%. Эти улучшения означают более надежные прогнозы, что прямо влияет на безопасность и экономику (предотвращение аварий, оптимизация ремонтов).
- 2. Метрики оптимизации расписаний:** суммарные и средние задержки, количество конфликтов, отклонение от графика, нелинейные критерии типа суммарной потери качества обслуживания (как у [19]). Гибридные алгоритмы либо достигали меньших значений задержек/отклонений при тех же ограничениях, либо предоставляли решения с лучшим балансом критериев. Например, в [19] гибрид нашел компромиссное решение с 15% снижением задержек ценой 13% роста операционных затрат, тогда как классический алгоритм давал или малые задержки за счет больших затрат, или

экономичные решения с неприемлемыми задержками. То есть гибрид расширяет Парето-оптимальный фронт решений.

3. **Метрики управления движением:** среднеквадратичная ошибка регулирования скорости, перегрузки, комфорт (PSD-метрики вибрации). В [8] снижение СКО ошибки ~70%, в [9] снижение вибраций ~15-20%. Это прямое улучшение показателей качества вождения и обслуживания пассажиров.
4. **Метрики диагностики:** точность, полнота (recall), специфичность, F1 – мера для классификации дефектов. Гибридные системы зрения [26] показали Precision ~0.95, Recall ~0.98, F1 > 0.96, что существенно лучше, чем у одной нейросети (F1 порядка 0.8-0.85). В задачи идентификации [28] – точность 99% против 95% у базовой нейросети. То есть гибриды уменьшают как пропуски дефектов, так и ложные срабатывания, двигаясь к практически безошибочной работе.

Ограничения и области улучшения. Несмотря на перечисленные преимущества, гибридные подходы имеют и слабые места. Во-первых, усложнение модели затрудняет её интерпретацию и отладку. Если чистый алгоритм можно понять (нейросеть – через веса, нечёткую модель – через правила, оптимизационную – через ограничения), то гибрид из нескольких компонентов становится чёрным ящиком для инженеров. Некоторые работы (например, [26]) решают это за счет чёткой модульной структуры и визуализации промежуточных результатов, однако общая проблема интерпретируемости остается.

Во-вторых, требования к данным и экспертизе возрастают. Надо собирать не только обучающие выборки, но и формализовать правила, настраивать симуляторы, поддерживать сразу несколько систем. Например, гибрид [13] (ANFIS для станций) потребовал и исторических данных по пассажиропотокам, и знаний экспертов по уровням риска, и калибровки видеодатчиков. Разработать и внедрить такую систему сложнее, чем одну нейросеть или одно правило.

Наконец, некоторые гибридные алгоритмы узко специализированы под конкретную задачу или инфраструктуру. Например, модели [11,12] по рискам заточены под подход «ОЛВМ + статистика РЖД» и трудно применимы вне этой области. Поэтому одной из перспектив является создание более универсальных фреймворков гибридного интеллекта, которые можно будет адаптировать под разные задачи с минимальными изменениями.

Тем не менее, общий тренд в исследованиях – расширение применения гибридных методов. Многие авторы отмечают, что будущие системы управления и аналитики на железнодорожном транспорте будут строиться по принципу цифровых платформ, объединяющих моделирование, оптимизацию и обучение [2]. Уже сейчас проекты по цифровым двойникам (например, [29]) фактически представляют собой комплекс гибридных моделей, связанных между собой.

В Таблице 1 ниже приведено обобщенное сравнение различных комбинаций методов ИИ по их свойствам.

Таблица 1

Сравнение различных гибридных комбинаций методов ИИ

Комбинация методов	Преимущества	Недостатки/сложности	Примеры приложений
Нейросеть + нечёткая логика	Интерпретируемость, устойчивость к шуму. Повышенная точность благодаря обучению.	Настройка правил, требует экспертных знаний	Оценка рисков [11], ANFIS для переполненности [13]
Нейросеть + физическая модель	Учет физических законов, экстраполяция за пределы данных. Коррекция систематических ошибок модели.	Нужны качественные данные для обучения. Сложность интеграции.	Управление движением [8], цифровые двойники [25]
Эволюционный алгоритм + нейросеть	Глобальный поиск + быстрая адаптация. Хорошее покрытие пространства решений.	Большие вычислительные затраты. Возможны нестабильность решений.	Оптимизация расписаний [19], настройка контроллеров [9]
Имитация + эвристика	Реалистичность + целенаправленное решение конфликтов. Высокая достоверность результатов.	Трудоемкость вычислений. Не гарантирует оптимум.	Диспетчеризация [17, 18], моделирование узлов
Мультимодель (ensemble разных алгоритмов ML)	Повышает обобщающую способность, сглаживает ошибки отдельных моделей.	Требует много данных, риск переусложнения.	Прогнозирование спроса (ансамбли деревьев и сетей), диагностика [26] (две сети + правила)

Как видно, каждое сочетание имеет свою нишу. Выбор гибридной архитектуры диктуется спецификой задачи: требуется ли интерпретируемость (тогда полезна нечёткая логика), есть ли хорошая физическая модель процесса (тогда стоит внедрить ее в ML), насколько критично глобальное решение (тогда полезны эволюционные или переборные компоненты) и т.д. Далее, в следующем разделе, мы обсудим рекомендации по выбору методов под конкретные типы задач управления на железнодорожном транспорте.

4. Выбор методов и рекомендации по применению

Анализ литературы позволяет сформулировать ряд рекомендаций относительно того, какие гибридные подходы наиболее эффективны для различных задач управления технологическими процессами железнодорожного транспорта:

- Задачи управления движением и регулирования скорости/тяги.** Рекомендуется использовать гибриды, сочетающие строгие модели движения с обучаемыми корректирующими блоками. Например, для систем автоведения поездов – механизм движения + ML-компенсатор (как у [8]), для систем управления тяговым приводом – классический регулятор + нечёткая надстройка (как у [6]). Это обеспечивает точность выполнения графика и устойчивость к возмущениям. В задачах виброзащиты эффективны гибриды с обучением с подкреплением (см. [9]) для адаптации регуляторов подвешивания в реальном времени.

2. **Диспетчеризация и управление трафиком при сбоях.** Рекомендуются эвристикоимитационные гибриды или оптимизационные гибриды с ML. Если инфраструктура и трафик относительно простые – подойдет симуляция + правила (пример [17]). В крупных сетях с множеством поездов – лучше применять многошаговые оптимизационные гибриды (rolling horizon) с встраиванием обученных моделей для ускорения [19]. Кроме того, полезно использовать предобученные модели для прогнозирования последствий решений (как Hybrid AI у Hitachi [10]), чтобы диспетчер мог мгновенно оценить варианты. Здесь важен упор на скорость вычислений, поэтому гибрид с ML предпочтительнее чисто оптимизационного алгоритма.
3. **Прогнозирование технического состояния и рисков.** Высокие результаты показывают нейро-нечеткие системы и комбинирование статистических методов с физическими моделями деградации. Для оценки рисков безопасности – рекомендовано применять гибрид вида логико-вероятностная модель + статистический ML, как у [11, 12], что позволяет учесть и теорию надежности, и фактическую статистику отказов. Для мониторинга состояния пути и подвижного состава – целесообразно комбинировать модели износа с обучением по данным диагностических средств (пример [15, 14]). Также стоит внедрять цифровые двойники [25] для ключевых узлов инфраструктуры – они могут служить полигоном для прогнозных расчетов (что будет если...), объединяя симуляцию и ИИ.
4. **Оптимизация расписаний и ресурсов.** Практика показывает, что трудно превзойти по качеству оптимизационные алгоритмы, но гибридизация с ИИ помогает решить проблему времени. Поэтому для реальных применений (когда решения нужны быстро) рекомендуется: 1) Разбивать большую задачу на подзадачи (декомпозиция во времени и пространстве) – для этого отлично подходят методы скользящего окна или кластеризации, 2) Встраивать ML-модули для оценки качества промежуточных решений или для генерации хороших стартовых решений. Например, можно обучить нейросеть выдавать приблизительный порядок пропуска поездов на перегоне, а затем точное время рассчитывать алгоритмом. Такой подход обеспечит баланс между скоростью и оптимальностью. Интересной перспективой является использование квантовых вычислений в гибриде – уже есть исследования [21], и по мере развития квантовой техники – это направление может дать превосходство в сложных случаях планирования.
5. **Энергоэффективность и экология.** Для оптимизации энергопотребления рекомендуются гибриды, учитывающие профиль пути, график и характер тяги. Хорошо зарекомендовали себя генетические алгоритмы с обучением (как [23]) для построения оптимальных профилей скорости. Также важно включать модель электросети (как в [24]) – т.е. гибрид «движение поезда + электроснабжение», что позволит оптимизировать взаимодействие поездов (рекуперация, пиковая нагрузка). В перспективе, с ростом массива данных, возможно применение глубокого RL (обучения с подкреплением) в гибриде с имитацией движения поездов для выработки энерго-оптимальных стратегий управления – такие опыты уже ведутся.
6. **Диагностика и техническое зрение.** Здесь рекомендуется комбинировать как можно больше источников информации: видео, аудио, вибродатчики, тепловизоры – и использовать фьюжн-модели, объединяющие результаты отдельных детекторов. В частности, методология [26] (объектная нейросеть + контекстная нейросеть + решающие правила) показала высокие результаты и может быть рекомендована к апробации/внедрению в системах контроля пути. Также оправдано использование трансферного обучения – когда нейросеть обучена на одном типе дефекта, а затем с частичным переобучением применяется к другому; это своего рода гибридизация знаний из разных доменов. Для диагностики подвижного состава (подшипники, моторы) можно рекомендовать гибриды сигнальных методов (виброакустический анализ) с ML – например, вначале проводить частотный анализ сигнала, выделять признаки (энергия на определенных гармониках), а затем классифицировать их с помощью обученной модели. Такой двустадийный гибрид (физика + ИИ) часто дает меньший процент ложных срабатываний, чем прямая классификация «сырых» сигналов нейросетью.

Обобщая рекомендации: гибридные алгоритмы целесообразно применять там, где задача либо слишком сложна для чисто аналитического решения, либо критически важна надежность и точность. В простых случаях внедрение гибридов может быть избыточным – например, для расчета средней нагрузки станции достаточно классических методов. Но в сложных

системах – узлы с большим количеством поездов, высокоскоростное движение с жестким графиком, инфраструктура с переменным состоянием – гибриды дают существенные выигрыши.

Отдельно отметим значимость человеческого фактора: при внедрении гибридных систем важно, чтобы персонал понимал принципы их работы. Поэтому желательно, чтобы гибридные алгоритмы предоставляли обратную связь и объяснения. Некоторые современные разработки включают модули объяснимого ИИ, которые по результату (например, предложенному коррективу расписания) могут указать, какие факторы (данные, правила) к этому привели. Это повышает доверие к системе и облегчает ее принятие на практике.

5. Ограничения и перспективы развития

Несмотря на очевидные успехи гибридных подходов, существуют ряд ограничений и вызовов, которые предстоит преодолеть в будущем:

- 1. Сложность разработки и валидации.** Гибридные системы зачастую представляют собой набор нескольких моделей, что усложняет их тестирование и сертификацию. В области безопасности движения это критично – необходимо гарантированно убедиться, что алгоритм не приведет к опасной ситуации. Одно из направлений развития – применение методов верификации и формальных доказательств корректности для частей гибридной системы. Например, можно формально проверить логическую часть (нечеткие правила или решающие правила) на отсутствие противоречий, а затем анализировать нейросетевую часть методами статистических испытаний. Совмещение таких подходов – сам по себе научный вызов.
- 2. Требования к данным.** Многие гибридные алгоритмы требуют больших объемов достоверных данных для обучения ML-компонент. На железной дороге далеко не всегда есть такие данные (особенно про редкие события – аварии, крупные сбои). Здесь перспективно развитие методов создания синтетических данных: высокдетальные симуляторы, генеративные модели, перевода опыта других сетей (трансферное обучение). Гибриды будущего, вероятно, смогут сами генерировать дополнительные данные для своего обучения (например, имитация множества сценариев аварий для обучения диспетчерского ИИ). Это потребует еще более тесной интеграции симуляции и обучения.
- 3. Совместимость и стандартизация.** Пока что каждое решение разрабатывается индивидуально. В перспективе нужно стремиться к созданию унифицированных платформ. Возможно появление своего рода фреймворков гибридного ИИ для транспорта, где из типовых модулей (нейросеть, оптимизатор, база правил, имитационная модель) можно будет «собрать» нужный гибрид под задачу. Это упростит внедрение таких систем на разных дорогах. Уже предпринимаются шаги в эту сторону – например, проекты по онтологиям железнодорожных данных и стандартизации интерфейсов для цифровых двойников.
- 4. Кибербезопасность и надежность.** Усложнение алгоритмов ведет к появлению новых уязвимостей. Нейросети могут быть подвержены атакам (adversarial examples), логические правила – умышленным манипуляциям. Гибридные системы могут стать целью для кибератак, стремящихся вывести их из строя или ввести в заблуждение (особенно, если они влияют на управление движением). Поэтому перспективным направлением является разработка защищенных гибридных алгоритмов, устойчивых к некорректным данным и злонамеренным воздействиям. Например, интеграция методов обнаружения аномалий в поток данных (на основе тех же ML) как неотъемлемой части гибрида.
- 5. Адаптивность и самообучение.** Идеальный гибридный алгоритм должен уметь адаптироваться к изменениям системы без полной перенастройки. Уже сейчас есть примеры, когда модель подстраивается при накоплении новых данных (обучение online). В будущем, вероятно, появятся самооптимизирующиеся гибриды, которые смогут изменять собственную структуру. Например, добавлять новые правила, если нейросеть выявила новый паттерн, или переключаться между методами в зависимости от ситуации (situation-aware AI). Это приведет к еще большей эффективности, но и усложнит контроль над такими системами.

Несмотря на перечисленные сложности, перспективы гибридных подходов в железнодорожной отрасли оцениваются как благоприятные. Современные исследования (например, [1]) показывают, что интеграция ИИ в транспортные системы – один из ключевых факторов их дальнейшего развития, и наибольший эффект дадут именно комплексные решения, объединяющие лучшее из мира данных и мира моделирования. Уже сейчас гибридные алгоритмы выходят из лабораторий: внедряются пилотные проекты по интеллектуальной диагностике пути, автоматизированному диспетчерскому советчику, прогнозированию состояния инфраструктуры. В ближайшие 5-10 лет можно ожидать, что гибридные системы станут стандартным элементом цифровой платформы железных дорог – подобно тому, как системы сигнализации или связи.

6. Обсуждение

В обзоре рассмотрены современные гибридные алгоритмы, применяемые для управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. Под гибридными понимаются алгоритмы, сочетающие разные подходы – методы искусственного интеллекта, математического моделирования, оптимизации и др. Были выделены основные классы гибридных методов (нейро-нечеткие системы, физические модели с ML, эволюционные алгоритмы с обучением, гибридная симуляция, комбинированное обучение и др.) и показано, как каждый из них находит применение в железнодорожной отрасли.

Обзор применения гибридных моделей продемонстрировал универсальность и эффективность подобных подходов. Они используются для автоматического управления движением и повышают точность регулирования и безопасность. Они позволяют прогнозировать риски и техническое состояние с невиданной ранее точностью, давая железнодорожникам инструмент проактивного предотвращения инцидентов. Гибридные алгоритмы оптимизации расписаний и планирования ресурсов помогают находить компромиссные решения и оперативно реагировать на сбои, улучшая пунктуальность и качество обслуживания. В диагностике и мониторинге гибридные системы технического зрения и анализа данных дают возможность существенно повысить уровень автоматизации обнаружения неисправностей, снизив человеческий фактор и ускорив реагирование.

Сравнение различных подходов подтвердило, что гибридизация методов приводит к улучшению ключевых метрик: снижается ошибка прогнозов (на десятки процентов), уменьшаются задержки поездов, сокращаются издержки энергии, растет точность диагностики. Особенно важно, что гибридные системы лучше справляются со сложными многокритериальными задачами, где нужно одновременно оптимизировать несколько показателей. Тем не менее, гибриды предъявляют более высокие требования к разработке, вычислительным ресурсам и объемам данных, что накладывает определенные ограничения.

Из анализа работ можно сделать практический вывод: при решении конкретной задачи на железнодорожном транспорте следует рассмотреть возможность применения гибридного алгоритма, если задача сложна, а цена ошибки велика. При этом нужно тщательно выбирать компоненты гибрида – они должны дополнять друг друга. Также важно проводить обширное тестирование таких систем и постепенно внедрять их в эксплуатацию, обеспечивая доверие со стороны персонала и соответствие нормативным требованиям безопасности.

Перспективы развития гибридных алгоритмов видятся в дальнейшей интеграции все новых источников данных (IoT-датчики, спутниковые системы, мобильные устройства), в использовании мощных вычислительных средств (вплоть до квантовых вычислений) для еще более сложных оптимизационных задач, а также в повышении автономности и адаптивности самих алгоритмов. В будущем можно ожидать появления самообучающихся гибридных систем управления железнодорожным транспортом, которые в режиме реального времени будут подстраивать свои стратегии на основе текущей обстановки и целей – фактически реализуя принципы гибкого «умного» железнодорожного транспорта.

Заключение

В заключении отметим, что гибридные алгоритмы не являются панацеей: успех их применения зависит от грамотной постановки задачи, качества данных и правильной эксплуатации. Однако уже сейчас очевидно, что сочетание человека (экспертных знаний) и машины (вычислительной мощности и способности учиться) – за счет чего и реализуются гибридные системы – дает синергетический эффект. Железные дороги, обладая консервативной, проверенной практикой обеспечения безопасности, постепенно открываются инновациям ИИ. И гибридные алгоритмы представляют собой именно тот путь, который позволяет внедрять ИИ безопасно, постепенно и результативно. Они объединяют лучшее из традиционных методов управления и новейших достижений науки о данных, позволяя железнодорожной отрасли двигаться к более высокому уровню цифровизации и автоматизации и концепции «умной железной дороги».

Список использованной литературы

1. Неупокоева Е. О., Быстров В. В., Шишаев М. Г. Гибридная технология синтеза транспортно-логистических систем на основе машинного обучения и имитационного моделирования // Экономика. Информатика. – 2024. – Т. 51, № 3. – С. 670–681.
2. R. Tang, L. De Donato, Q. He, F. Flammini et al., “A literature review of Artificial Intelligence applications in railway transport,” *Transportation Research Part C*, vol. 140, p. 103679, 2022.
3. N. Besinović et al., “Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations and Applications,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023. (Early Access).
4. F. Anifowose, A. Abdulraheem, J. Abdollahi et al., “Hybrid intelligent systems in petroleum reservoir modeling: the journey so far and the challenges ahead,” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 251–263, 2017.
5. L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
6. Саттаров Х. А. Гибридные методы исследования режимов работы систем управления в условиях неопределенности // Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. – 2024. – № 1. – С. 6–11.
7. S. Jiao, R. Zhao, D. Yang et al., “Hybrid physics–machine learning models for predicting rate of penetration in the Halahatang oil field, Tarim Basin,” *Scientific Reports*, vol. 14, p. 5957, 2024.
8. T. Hou, Z. Hou, Y. Deng et al., “Research on speed control of high-speed trains based on hybrid modeling,” *Archives of Transport*, vol. 66, no. 2, pp. 65–85, 2023.
9. Y. Shiao and T.-L. Huynh, “A new hybrid control strategy for improving ride comfort on lateral suspension system of railway vehicle,” *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 43, no. 4, pp. 1842–1859, 2024.
10. Hitachi Ltd, “Railway Traffic Management Systems by Machine Learning: Recovery from Traffic Timetable Disruption by Hybrid AI,” *Hitachi Review*, vol. 70, no. 5, pp. 88–93, 2021.
11. Веревкина О. И. О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода // Изв. Петербургского ун-та путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 615–627.
12. Веревкина О. И. Результаты применения гибридного метода оценки функциональных рисков нарушения безопасности движения на региональном и линейном уровнях в хозяйстве пути // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1(17). – С. 420–424.
13. H. Alawad, M. An, and S. Kaewunruen, “Utilizing an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Overcrowding Level Risk Assessment in Railway Stations,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, p. 5156, 2020.
14. J. Sresakoolchai, C. Ngamkhanong, and S. Kaewunruen, “Hybrid learning strategies: integrating supervised and reinforcement techniques for railway wheel wear management with limited measurement data,” *Frontiers in Built Environment*, vol. 11, p. 1546957, 2025.
15. S. Alagesan, B. Indraratna, R. S. Malisetty, Y. Qi, and C. Rujikiatkamjorn, “Prediction of rail ballast breakage using a hybrid ML methodology,” *Transportation Geotechnics*, vol. 52, p. 101555, 2025.
16. W. Phusakulkajorn, A. Núñez, H. Wang et al., “Artificial intelligence in railway infrastructure: current research, challenges, and future opportunities,” *Intelligent Transportation Infrastructure*, vol. 2, p. liad016, 2023.

17. Y. Cheng, "Hybrid simulation for resolving resource conflicts in train traffic rescheduling," *Computers in Industry*, vol. 35, pp. 233–246, 1998.
18. D. Jones, A. Milne, M. Mladenović et al., "Hybrid simulation methodology incorporating heuristics for scheduling in freight rail networks," *Journal of Simulation*, vol. 18, pp. 1–14, 2024.
19. W. Zhao, L. Zhou, and C. Han, "A Hybrid Optimization Approach Combining Rolling Horizon with Deep-Learning-Embedded NSGA-II Algorithm for High-Speed Railway Train Rescheduling Under Interruption Conditions," *Sustainability*, vol. 17, no. 6, p. 2375, 2025.
20. H. Lau, Y. Zhao, and L. Xiao, "Development of a hybrid fuzzy genetic algorithm model for solving transportation scheduling problem," *Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 12, no. 3, pp. 505–524, 2015.
21. M. Koniorczyk, K. Krawiec, L. A. S. Botelho, N. Bešinović, and K. Domino, "Application of a Hybrid Algorithm Based on Quantum Annealing to Solve a Metropolitan Scale Railway Dispatching Problem," *arXiv preprint arXiv:2309.06763*, 2023.
22. A. Yousefi and M. S. Pishvaei, "A hybrid machine learning–optimization approach to pricing and train formation problem under demand uncertainty," *RAIRO – Operations Research*, vol. 56, no. 3, pp. 1429–1451, 2022.
23. J. Li, Y. Shi, T. Zhang, X. Li, and X. Wang, "Research on Train Energy Optimization Based on Dynamic Adaptive Hybrid Algorithms," *Electronics*, vol. 14, no. 8, p. 1588, 2025.
24. I. Villalba and R. Insa, "Applying a hybrid model considering the interaction between train and power system for energy consumption," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, p. 3643474, 2018.
25. X. Li and Y. Liu, "A Hybrid Data and Mechanism Model-driven Digital Twin Modeling Approach for Novel Traction Power Systems," *Urban Rail Transit*, vol. 11, no. 2, pp. 213–231, 2025.
26. A. Zhukov, A. Rivero, J. Benois-Pineau, A. Zemari, and M. Mosbah, "A Hybrid System for Defect Detection on Rail Lines through the Fusion of Object and Context Information," *Sensors*, vol. 24, no. 4, p. 1171, 2024.
27. S. F. Stefenon, A. L. M. Marcato, A. J. S. Neto et al., "Automatic Digitalization of Railway Interlocking Engineering Drawings Based on Hybrid Machine Learning Methods," *Preprint (arXiv:2310.16721)*, 2024.
28. Артемьев И. С. Автоматизация процессов идентификации железнодорожных подвижных единиц на основе гибридных нейроиммунных моделей: дис. ... канд. техн. наук. — СПбГУПС, 2017. — 158 с.
29. A. Galvez, *Hybrid digital twins: a co-creation of data science and physics* (Ph.D. dissertation), Luleå University of Technology (Sweden), 2022, 196 p.
30. I. Sahin, "Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management," *Transportation Research Part B*, vol. 33, no. 7, pp. 511–534, 1999.
31. Y. Ou, A.-S. Mihăiță, A. Ellison, T. Mao, S. Lee, and F. Chen, "Rail Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction Using Mobile Data," *Electronics*, vol. 14, p. 2359, 2025.

УДК 625.2

НАУЧНЫЙ ОБЗОР: ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Алиев Вугар Амирович, д.ф.-м.н., профессор, Институт физики Министерства науки и образования, AMIR Technical Services Company, Баку, Азербайджан, E-mail: prof.vugar.aliyev@gmail.com

Озеров Алексей Валерьевич, Начальник Международного управления, АО «НИИАС», Москва, Россия, E-mail: a.ozеров@vniias.ru

Бочков Александр Владимирович, д.т.н., учёный секретарь, АО «НИИАС», Москва, Россия, E-mail: a.bochkov@vniias.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлен комплексный анализ современных тенденций развития высокоскоростного железнодорожного транспорта (ВСТ) в Китае, основанный на материалах XII Всемирного конгресса по высокоскоростным железным дорогам (Пекин, 2025). Рассматриваются ключевые технологические достижения, включая создание инновационного подвижного состава серии CR450 с рекордной скоростью 450 км/ч, внедрение интеллектуальных систем управления (CTCS) и переход на связь нового поколения (5G-R). Особое внимание уделено цифровой трансформации отрасли: применению искусственного интеллекта для диагностики и прогнозирования, созданию цифровых двойников инфраструктуры, а также масштабной роботизации процессов обслуживания. Анализируется роль Китайской академии железнодорожных наук (CARS) как системообразующего элемента национальной инновационной экосистемы, обеспечивающей полный цикл разработки – от фундаментальных исследований до промышленного внедрения. Подчеркивается значение государственной стратегии, сочетающей масштабные инвестиции в НИОКР, развитие испытательной базы и активную патентную защиту технологий. Статья будет полезна специалистам в области транспортного машиностроения, железнодорожной автоматики и цифровых технологий, а также представителям органов управления транспортной отраслью, интересующимся передовым международным опытом.

Ключевые слова: высокоскоростной железнодорожный транспорт, искусственный интеллект, цифровизация, системы управления движением, китайские железные дороги, CR450, CTCS, 5G-R, CARS.

SCIENTIFIC REVIEW: HIGH-SPEED TECHNOLOGIES IN RAILWAY TRANSPORT

Vugar A. Aliyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of Physics, Ministry of Science and Education, AMIR Technical Services Company, Baku, Azerbaijan, E-mail: prof.vugar.aliyev@gmail.com

Alexey V. Ozerov, Head of the International Department, JSC «NIIAS», Moscow, Russia, E-mail: a.ozеров@vniias.ru

Alexander V. Bochkov, Doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary, JSC «NIIAS», Moscow, Russia, E-mail: a.bochkov@vniias.ru

ABSTRACT

The article provides a thorough analysis of the latest developments in China's high-speed rail (HSR) sector, drawing from materials presented at the 12th World Congress on High-Speed Rail in Beijing in 2025. The article examines key technological achievements, such as the development of the innovative CR450 series of trains capable of reaching speeds of up to 450 km/h, the implementation of intelligent control systems (CTCS), and the shift towards next-generation communications technology (5G-R). Particular attention is given to the industry's digital transformation, including the use of artificial intelligence for diagnostics and forecasting, creating digital twins of infrastructure, and large-scale robotization of maintenance processes. The article analyzes the role of the Chinese Academy of Railway Sciences (CARS) as a system-forming element of the national innovation ecosystem that provides a full development cycle from fundamental research to industrial implementation. The importance of a state strategy that combines large-scale investment in research and development (R&D), the development of a testing base, and active patent protection of technologies is emphasized. This article is useful for specialists in transport engineering, railway automation, and digital technologies, as well as for transport industry management representatives interested in advanced international experience.

Keywords: high-speed rail transport, artificial intelligence, digitalization, traffic control systems, Chinese railways, CR450, CTCS, 5G-R, CARS.

Введение

Современный этап развития транспортных систем характеризуется стремительным прогрессом в области высокоскоростного железнодорожного транспорта (ВСМ), где технологические инновации становятся ключевым фактором повышения эффективности, безопасности и экологичности перевозок. Особое место в этом процессе занимает Китай, который за последние десятилетия не только создал крупнейшую в мире сеть высокоскоростных магистралей, но и вышел на передовые позиции в разработке и внедрении прорывных технологий. XII Всемирный конгресс по высокоскоростному железнодорожному транспорту, состоявшийся в Пекине в июле 2025 года, стал знаковым событием, продемонстрировавшим масштабы достижений КНР в этой сфере.

Китайская модель развития ВСМ представляет собой комплексный подход, объединяющий передовые инженерные решения, цифровизацию, применение искусственного интеллекта и роботизацию. К концу 2024 года протяженность высокоскоростных линий в Китае достигла 48 000 км, что составляет более 70% от общемирового показателя. Ежедневно по этим магистралям курсирует свыше 8 600 поездов, перевозящих около 16 миллионов пассажиров. Такие масштабы стали возможны благодаря не только значительным инвестициям в инфраструктуру, но и созданию собственных технологических платформ, таких как система управления движением CTCS и подвижной состав серии «Фусин».

Особого внимания заслуживает роль научно-исследовательских институтов, в частности Китайской академии железнодорожных наук (CARS), которая обеспечивает полный цикл разработки и внедрения инноваций – от фундаментальных исследований до промышленного применения. Деятельность CARS охватывает широкий спектр направлений, включая испытания новых материалов, создание интеллектуальных систем управления и разработку стандартов, что позволяет Китаю не только адаптировать зарубежные технологии, но и формировать собственные, нередко превосходящие мировые аналоги.

Активное внедрение цифровых технологий, таких как искусственный интеллект, большие данные и интернет вещей, трансформирует традиционные подходы к управлению железнодорожным транспортом. Например, использование цифровых двойников инфраструктуры и прогнозной аналитики позволяет перейти от планового технического обслуживания к предиктивному, что значительно повышает надежность системы в целом. Кроме того, китайский опыт демонстрирует, как государственно-частное партнерство и международное сотрудничество способствуют ускоренному развитию отрасли, в том числе в области стандартизации и продвижения национальных решений на глобальном уровне.

Таким образом, изучение китайского опыта в области высокоскоростного железнодорожного транспорта представляет значительный интерес как с точки зрения технологических достижений, так и в аспекте организационных моделей, обеспечивающих их реализацию. Данный обзор направлен на систематизацию ключевых тенденций, представленных на XII Всемирном конгрессе, с акцентом на их практическую значимость и потенциал для применения в других странах.

Цель обзора – анализ ключевых технологических направлений, представленных на конгрессе, включая инновации в подвижном составе, системах управления, диагностике и роботизации, а также роль отраслевой науки в развитии ВСМ.

1. Методы

Проведение данного исследования основывалось на комплексной методологии, сочетающей различные подходы к сбору и анализу информации о развитии высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае. Основным источником эмпирических данных стали материалы XII Всемирного конгресса по высокоскоростному железнодорожному транспорту, включая тексты докладов, презентации и технические отчеты, что позволило получить доступ к первичной информации о последних технологических достижениях (180 докладов, 30 из которых посвящены ИИ и роботизации). Особую ценность представляли материалы, предоставленные непосредственно китайскими специалистами из Государственной корпорации «Китайские железные дороги» и Китайской академии железнодорожных наук, содержащие уникальные данные о текущих и перспективных разработках.

Важным компонентом исследования стал анализ визуальных материалов и технических спецификаций, представленных на сопутствующей конгрессу выставке MODERN RAILWAYS 2025, где демонстрировались новейшие образцы подвижного состава и оборудования. Для получения всестороннего понимания технологических процессов применялся метод включенного наблюдения во время технических визитов на испытательные полигоны и производственные площадки, что дало возможность оценить практическую реализацию заявленных инновационных решений.

Сравнительный анализ использовался для сопоставления китайских технологических решений с международными аналогами, что позволило выявить специфические особенности и конкурентные преимущества китайской модели развития высокоскоростного транспорта. При работе с большими массивами технических данных применялись методы контент-анализа и текстовой аналитики, что способствовало систематизации и структурированию полученной информации. Особое внимание уделялось верификации данных через перекрестную проверку информации из различных источников, включая официальные документы, научные публикации и экспертные интервью, что обеспечило достоверность и объективность исследования.

2. Результаты исследований в области технологий высоких скоростей в железнодорожном транспорте

2.1 Подвижной состав

Китай создал крупнейшую в мире сеть высокоскоростных железных дорог [1]. Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае демонстрирует значительные достижения в области подвижного состава, где ключевым направлением стало создание инновационных электропоездов, сочетающих высокую скорость, энергоэффективность и безопасность [2-4]. На XII Всемирном конгрессе по высокоскоростному железнодорожному транспорту были представлены прототипы электропоездов CR450, разработанные на основе автономной платформы «Фусин» (рис. 1). Эти поезда способны развивать скорость до 450 км/ч, что подтверждено испытаниями на участке Ухань – Ичан [5]. Важным аспектом является снижение общего веса поезда на 10% по сравнению с предыдущими моделями, достигнутое за счёт использования углеродного волокна в конструкции кузова. Это не только уменьшило нагрузку на ось до менее чем 14,5 т, но и улучшило аэродинамические характеристики на 22%, что напрямую влияет на энергопотребление. Последнее удалось снизить на 20%, до 22 кВтч/км при скорости 400 км/ч, что делает эти поезда одними из самых экономичных в мире.

Безопасность движения также была существенно повышена благодаря усовершенствованию тормозной системы, сократившей тормозной путь до менее чем 6 500 м, и улучшению эффективности сцепления на 4%. Для обеспечения надёжной работы поездов была внедрена система диагностики с использованием 4 500 встроенных датчиков, которые непрерывно отслеживают состояние критически важных узлов, включая ходовую часть, кузов, токоприёмники и системы пожаротушения. Это позволяет оперативно выявлять и устранять потенциальные неисправности, минимизируя риски аварийных ситуаций.

Помимо технических характеристик, внимание было уделено комфорту пассажиров. Уровень шума в центральном вагоне поезда CR450 не превышает 68 дБ, что достигается за счёт оптимизации конструкции и применения современных шумопоглощающих материалов. Эти инновации делают китайские высокоскоростные поезда не только быстрыми и безопасными, но и комфортными для длительных поездок.

Таким образом, подвижной состав китайских высокоскоростных железных дорог представляет собой результат глубокой научно-технической проработки, где каждый элемент – от материалов кузова до систем диагностики – направлен на достижение максимальной эффективности, безопасности и удобства. Эти разработки не только укрепляют лидерство Китая в области ВСМ, но и задают новые стандарты для мирового железнодорожного транспорта.



Рис. 1 – Прототипы электропоездов CR450, разработанные на основе автономной платформы «Фусин»

2.2 Системы управления и безопасности

Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае сопровождается созданием сложных интеллектуальных систем управления, обеспечивающих безопасность движения на постоянно возрастающих скоростях [6]. Национальная система управления движением поездов CTCS, разработанная на основе адаптированной европейской платформы ERTMS/ETCS, представляет собой комплексное решение, интегрирующее рельсовые цепи и цифровую радиосвязь. Особенностью китайской системы стало сохранение гибридного принципа передачи информации, где наряду с радиоканалом GSM-R активно используются рельсовые цепи, что обеспечивает повышенную надежность на скоростях до 400 км/ч (рис. 2).

Проведенные испытания подтвердили устойчивость работы рельсовых цепей даже при воздействии обратного тягового тока, что позволяет системе продолжать функционирование в случае отказа радиоканального оборудования без снижения скорости движения.

Совершенствование систем управления движением сопровождается масштабным переходом на технологии нового поколения. В настоящее время ведется активная работа по внедрению стандарта 5G-R, который должен заменить устаревающий GSM-R. Для новой системы уже выделена частота 2,1 ГГц, разработаны технические требования, и ведутся испытания оборудования при участии ведущих телекоммуникационных компаний, включая Huawei. Особое внимание уделяется вопросам технологического наполнения нового стандарта – рассматриваются возможности передачи диагностических данных в реальном времени, реализации автоматизированного управления поездами и организации виртуальной сцепки составов. Переход на 5G-R планируется завершить к 2026 году, что позволит значительно увеличить пропускную способность каналов связи и улучшить параметры безопасности.

Важным направлением развития стало повышение уровня автоматизации управления. Внедрение алгоритмов искусственного интеллекта позволяет оптимизировать графики движения, повысить энергоэффективность управления поездами и автоматизировать процессы посадки пассажиров. Использование систем технического зрения для контроля «слепых зон» и распознавания аварийных ситуаций на путях значительно повышает безопасность движения. Особого внимания заслуживает интеграция систем управления с облачными платформами обработки данных, что обеспечивает принципиально новый уровень взаимодействия между подвижным составом и диспетчерскими центрами.



Рис. 2 – Доклад научного сотрудника CARS Чжан Мяо «Исследование адаптивности системы управления движением поездом для ВСМ 400 км/ч»

Китай активно работает над стандартизацией своих разработок, стремясь придать национальным решениям статус международных стандартов [7, 8]. Уже 13 китайских стандартов в области высокоскоростного движения получили статус International Railway Solutions (IRS) в рамках Международного союза железных дорог. Эта работа не только укрепляет позиции Китая на международной арене, но и создает основу для глобального распространения китайских технологий, что имеет важное значение для будущего развития высокоскоростного железнодорожного транспорта во всем мире.

2.3 Диагностика и мониторинг

Современные системы диагностики и мониторинга китайских высокоскоростных железных дорог представляют собой комплексную многоуровневую структуру, объединяющую стационарные и мобильные средства контроля, роботизированные комплексы и технологии дистанционного зондирования [9]. В основе этой системы лежит принцип постоянного мониторинга всех критически важных элементов инфраструктуры и подвижного состава, что позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к предиктивной модели, основанной на точных прогнозах состояния оборудования. Каждый высокоскоростной поезд оснащается более чем тремя тысячами датчиков, непрерывно фиксирующих параметры работы всех систем – от состояния ходовой части до показателей токоприёмников и противопожарного оборудования. Эти данные в режиме реального времени передаются в единый центр мониторинга, где анализируются с использованием алгоритмов искусственного интеллекта, способных выявлять малейшие отклонения от нормативных показателей [10].

Особое место в системе контроля занимают мобильные диагностические комплексы, среди которых выделяется высокоскоростной инспекционный поезд CIT450, способный на скорости до 450 км/ч проводить комплексную проверку более ста параметров железнодорожной инфраструктуры. Этот уникальный подвижной состав обеспечивает контроль геометрии пути, состояния контактной сети, параметров взаимодействия колеса и рельса, а также работоспособности систем сигнализации и связи. Плотность размещения стационарных датчиков достигает десяти устройств на километр пути, что создаёт детальную картину состояния инфраструктуры, включая балластный слой, рельсовые соединения и искусственные сооружения.

Для мониторинга труднодоступных участков, особенно в условиях высокогорья или сложного рельефа, активно применяются беспилотные летательные аппараты,

оснащённые высокоточной измерительной аппаратурой. Спутниковая группировка Gaofen с разрешением съёмки до 1-2 метров дополняет наземные системы мониторинга, обеспечивая контроль протяжённых участков магистралей и крупных инженерных сооружений. Собранные данные интегрируются в единую цифровую платформу [11], создающую трёхмерную модель железнодорожной инфраструктуры с точностью до миллиметра, что позволяет не только оперативно выявлять существующие проблемы, но и прогнозировать износ элементов с точностью до 95% на месячный период [12].

Такая всеобъемлющая система диагностики обеспечивает беспрецедентный уровень безопасности и надёжности высокоскоростного движения, минимизируя вероятность отказов оборудования и позволяя оптимально планировать ремонтные работы. Интеграция данных мониторинга с системами управления движением даёт возможность автоматически корректировать скоростные режимы поездов в зависимости от текущего состояния инфраструктуры, создавая по-настоящему интеллектуальную транспортную систему.

2.4 ИИ и роботизация

Внедрение искусственного интеллекта и роботизированных систем стало ключевым фактором технологического превосходства китайских высокоскоростных железных дорог. Глубокие нейронные сети и алгоритмы машинного обучения проникли во все сферы – от проектирования инфраструктуры до управления пассажиропотоками [13]. Особенно значимым достижением стало создание большой обучаемой модели данных, которая агрегирует информацию с тысяч датчиков, систем технического зрения и BIM-моделей, формируя целостную цифровую картину транспортной системы. Эта платформа не просто собирает данные, но и вырабатывает управленческие решения – например, автоматически инициирует ремонтные работы на основе прогноза износа элементов пути, а не по заранее установленному графику.



Рис. 3 – Решения в области роботизации процессов технического обслуживания, диагностики, ремонта и производства узлов подвижного состава

Роботизация производственных процессов достигла невиданных масштабов [14, 15]. На выставке MODERN RAILWAYS 2025 были представлены десятки специализированных роботов – от антропоморфных манипуляторов для тонкой настройки оборудования до автономных платформ для диагностики контактной сети (рис. 3). Эти системы способны работать в условиях высокого напряжения и сложных погодных условий, заменяя человека на опасных участках. Особый интерес вызывают роботизированные комплексы для обслуживания подвижного состава, которые с помощью компьютерного зрения и тактильных сенсоров выявляют микротрещины в узлах и деталях, не доступные человеческому глазу.

В сфере проектирования искусственный интеллект совершил настоящую революцию [16]. Нейросетевые алгоритмы научились автоматически генерировать BIM-модели на основе технической документации и данных лазерного сканирования, сокращая трудозатраты на 85%. Эти системы не просто копируют существующие решения, но и

оптимизируют конструкции, предлагая инженерные решения с улучшенными прочностными и аэродинамическими характеристиками. Аналитические модули на базе ИИ обрабатывают петабайты данных о работе оборудования, выявляя скрытые закономерности и предлагая пути повышения эффективности [17].

Синергия искусственного интеллекта и робототехники создает принципиально новую парадигму эксплуатации железных дорог, где ключевые решения принимаются автономными системами, а человек выполняет лишь контролирующие функции. Этот подход уже сегодня демонстрирует впечатляющие результаты – от сокращения времени обслуживания на 40% до повышения точности диагностики на порядок. Китайские разработки в этой области задают новые стандарты для мировой железнодорожной отрасли, показывая, как цифровые технологии могут трансформировать традиционные транспортные системы [18].

2.5 Испытательная база и наука

Фундаментом технологического лидерства Китая в области высокоскоростного железнодорожного транспорта стала уникальная исследовательская инфраструктура, создаваемая на протяжении десятилетий. Китайский национальный испытательный центр железных дорог в Пекине, наследующий лучшие традиции советской школы железнодорожных исследований, представляет собой грандиозный комплекс, включающий два специализированных испытательных кольца общей протяженностью 9 километров (рис. 4). Внешнее кольцо с идеальной круговой геометрией позволяет проводить испытания на экстремальных скоростях, в то время как внутренние пути с переменным профилем имитируют самые сложные эксплуатационные условия – от крутых уклонов до участков с минимальными радиусами кривых. Эта уникальная лаборатория под открытым небом дополняется десятками специализированных исследовательских центров, оснащенных самым современным оборудованием для тестирования всех элементов железнодорожной системы – от пантографов и контактной сети до спутниковых навигационных систем.

Китайская академия железнодорожных наук (CARS) превратилась в мощный научно-производственный холдинг, объединяющий 22 исследовательских института и 60 высокотехнологичных предприятий. Этот уникальный симбиоз фундаментальной науки и прикладных разработок позволяет осуществлять полный инновационный цикл – от теоретических изысканий до серийного производства. Особое внимание уделяется созданию национальных стандартов и защите интеллектуальной собственности: портфель патентов CARS в разы превосходит аналогичные показатели ведущих зарубежных исследовательских центров. В академии работают около 100 специализированных лабораторий, где на 8 000 экспериментальных установках отрабатываются технологии будущего – от новых материалов для подвижного состава до квантовых систем связи.

Научный потенциал Китая в железнодорожной отрасли проявляется не только в масштабах исследовательской инфраструктуры, но и в системном подходе к подготовке кадров.

Создана многоуровневая система воспроизводства научных школ, где опытные специалисты передают знания молодым исследователям, обеспечивая преемственность и постоянное обновление технологий.

Китайский подход к подготовке кадров для научно-технологического сектора является не просто элементом поддержки, а стратегической инвестицией в человеческий капитал, напрямую увязанной с национальными целями развития. Эту систему характеризует долгосрочное планирование, жесткая конкуренция и глубокая интеграция с реальным сектором экономики.

Система начинается не в вузах, а значительно раньше. Китай сделал ставку на математику, естественные науки и технологии (STEM) уже в средней школе. Это создает мощный фундамент и огромный пул абитуриентов, мотивированных и подготовленных к инженерно-техническим специальностям.

Университеты категории «Проект 211» и особенно «Проект 985» (предшественники современной инициативы «Двойного первоклассного» плана) получают целевое финансирование для превращения в мировые научные центры. Они готовят не просто студентов, а будущих лидеров технологического развития. Обучение в них отличается высокой интенсивностью, ориентацией на решение практических задач и жесткой конкуренцией.

Студенты ведущих вузов, таких как Университет Цинхуа или Пекинский университет, с первых курсов вовлекаются в проекты под руководством профессоров,

которые сами являются получателями грантов на НИОКР. Это ломает барьер между «образованием» и «наукой».



Рис. 4 – Испытательный полигон Китайского национального испытательного центра железных дорог в Пекине

Государство активно управляет потоками талантов через систему целевых программ и грантов. Например, программа «Тысяча талантов» (The Thousand Talents Plan) – это наиболее известный пример системного подхода. Программа была нацелена на так называемый «обратный приток» высококвалифицированных китайских специалистов, работавших за рубежом. Им предлагались щедрые гранты, современные лаборатории и позиции в ведущих университетах и исследовательских институтах. Цель – не просто вернуть людей, а мгновенно перенести в Китай передовые знания, методологии и международные связи. Помимо финансирования исследований, Национальный фонд естественных наук Китая (NSFC) играет ключевую роль в поддержке молодых ученых через специальные гранты для докторантов и постдоков. Это создает карьерный трек, альтернативный уходу в индустрию, и позволяет талантливым исследователям строить независимую научную карьеру.

Ключевое отличие китайской системы – теснейшая связь подготовки кадров с реальным сектором. Крупные компании (Huawei, Tencent, BYD) создают собственные мощные исследовательские подразделения и активно сотрудничают с университетами. Студенты проходят практики и стажировки, участвуя в коммерческих проектах. Университетские лаборатории часто решают конкретные задачи, поставленные промышленными партнерами. Технопарки и инновационные кластеры (например, Чжунгуаньцунь в Пекине или Шэньчжэнь) физически объединяют ведущие университеты, исследовательские институты, стартапы и корпорации. Это создает среду, где «преемственность знаний» происходит не формально, а в процессе совместной работы над общими проектами. Опытные инженеры и ученые из компаний фактически становятся наставниками для студентов и молодых сотрудников.

Масштаб – это главный козырь Китая. Система высшего образования выпускает миллионы инженеров и ученых ежегодно. Эта огромная масса потенциальных талантов создает чрезвычайно конкурентную среду, где выживают и добиваются успеха наиболее мотивированные и одаренные. Государство, вкладывая средства в инфраструктуру и гранты, создает «ловушку для талантов», предоставляя лучшим из лучших возможности для реализации внутри страны.

Именно эта сквозная система «выращивания талантов», работающая в унисон с моделью финансирования НИОКР, и позволила Китаю в сжатые сроки создать человеческий капитал, необходимый для технологического прорыва.

Такой комплексный подход, сочетающий мощную материальную базу, грамотную организацию исследований и внимание к кадровому потенциалу, позволяет Китаю не только адаптировать зарубежные разработки, но и создавать собственные прорывные технологии, определяющие будущее высокоскоростного железнодорожного транспорта во всем мире [19].

3. Обсуждение

Китайский опыт развития высокоскоростного железнодорожного транспорта представляет собой уникальный пример системной трансформации целой отрасли, где технологические инновации органично сочетаются с грамотной промышленной политикой и долгосрочным стратегическим планированием. Успех этой модели обусловлен несколькими фундаментальными факторами, среди которых особого внимания заслуживает создание замкнутого инновационного цикла – от фундаментальных исследований до коммерческого внедрения. Китайская академия железнодорожных наук (CARS) выступает в этой системе не просто научным учреждением, а своего рода «мозговым центром», координирующим взаимодействие между университетами, исследовательскими институтами и промышленными предприятиями. Такой подход позволил избежать характерной для многих стран разобщенности между теоретическими разработками и их практическим применением.

Важнейшим уроком китайского опыта является понимание того, что современный высокоскоростной транспорт – это не просто быстрые поезда, а сложная экосистема, требующая синхронного развития всех составляющих: инфраструктуры, систем управления, кадрового потенциала и нормативной базы. Особенно показателен пример внедрения технологии 5G-R, где параллельно с разработкой нового стандарта связи велась модернизация всего парка подвижного состава и диспетчерских центров, что обеспечило плавный переход без снижения качества обслуживания. Этот системный подход контрастирует с практикой многих стран, где инновации часто внедряются фрагментарно, что приводит к дисбалансам и снижению общей эффективности системы.

Особого внимания заслуживает китайская модель финансирования исследований и разработок, сочетающая значительные государственные инвестиции с механизмами привлечения частного капитала. Государственно-частное партнерство в железнодорожной отрасли Китая выстроено таким образом, что коммерческие компании заинтересованы не только в получении прибыли, но и в долгосрочном технологическом развитии. Это создает устойчивую основу для непрерывного совершенствования технологий, в отличие от распространенной в других странах практики «точечного» финансирования отдельных проектов.

Особенность китайской модели финансирования НИОКР заключается в формировании её как комплексной гибридной системы, в которой государственное стратегическое планирование тесно переплетается с механизмами рыночного финансирования. Её основу составляет концепция «стратегического рулевого», когда государство не просто выделяет средства, а активно формирует всю инновационную экосистему, задавая долгосрочные приоритеты через пятилетние планы и такие инициативы, как «Сделано в Китае 2025». Это создает для частного капитала четкие сигналы о перспективных направлениях для инвестиций, снижая неопределенность.

Центральную роль играют прямые государственные инвестиции, направляемые через Национальный фонд естественных наук Китая (NSFC) на фундаментальные исследования и в рамках Национальной программы ключевых НИОКР – на прикладные задачи. Крупные мегапроекты, такие как космическая программа или развитие высокоскоростных железных дорог, финансируются напрямую из бюджета, покрывая самые рискованные и капиталоемкие стадии. При этом ключевой особенностью модели является фазовый подход: по мере приближения разработок к коммерциализации подключаются рыночные механизмы. Государство стимулирует приток частного капитала через создание государственных венчурных фондов-соинвесторов, налоговые льготы для компаний, увеличивающих расходы на НИОКР, и развитие специализированных фондовых бирж, таких как STAR Market, для облегчения «выхода» инвесторов.

Этот симбиоз породил мощную многоуровневую экосистему, где провинциальные правительства, корпорации (как государственные, так и частные, например, Huawei или BYD) и венчурные фонды активно конкурируют и сотрудничают в финансировании инноваций. В результате Китай демонстрирует впечатляющие темпы роста затрат на НИОКР, что отражено в глобальных рейтингах.

Ключевые риски подобной модели связаны с коррупцией и финансированием проектов по принципу личных связей («гуаньси»), а не научной ценности, с дублированием усилий (разные провинции и институты могут конкурировать, вкладываясь в одни и те же технологии, что ведет к перерасходу средств). Критики указывают, что модель лучше работает для «догоняющего» развития и улучшающих инноваций, чем для фундаментальных прорывов, требующих академической свободы. Для иностранных инвесторов и компаний проблемой являются вопросы защиты интеллектуальной собственности.

Китайский опыт также демонстрирует важность активного участия в международной стандартизации [20]. Работа по приданию национальным разработкам статуса международных стандартов (IRS) не только укрепляет позиции страны на глобальном рынке, но и создает благоприятные условия для экспорта технологий. При этом важно отметить, что такая политика проводится без ущерба для защиты собственных интеллектуальных активов – китайские компании тщательно патентуют свои разработки перед их выходом на международную арену.

Перспективы дальнейшего развития китайской модели связаны с углублением цифровой трансформации отрасли. Уже сегодня очевидно, что такие технологии как искусственный интеллект, цифровые двойники и предиктивная аналитика становятся не просто инструментами оптимизации, а основой принципиально новых подходов к управлению транспортными системами. Опыт Китая показывает, что будущее высокоскоростного железнодорожного транспорта лежит в создании интеллектуальных самообучающихся систем, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и предвосхищать потенциальные проблемы. Этот опыт, безусловно, заслуживает внимательного изучения и адаптации с учетом национальных особенностей других стран.

Представленные в Таблице 1 примеры наглядно демонстрируют, что интеллектуальные самообучающиеся системы в китайском ВСМ – это не отдельные разрозненные технологии, а элементы единой, глубоко интегрированной экосистемы.

Её основу составляет сквозной поток данных: от тысяч датчиков на подвижном составе и инфраструктуре до централизованных платформ, где искусственный интеллект осуществляет комплексный анализ. Это позволяет перейти от реагирования на уже возникшие проблемы к их прогнозированию и упреждающему устранению, что коренным образом меняет парадигму эксплуатации железных дорог.

Ключевым результатом внедрения таких систем является создание адаптивной и устойчивой транспортной среды. Например, интеграция данных диагностики в реальном времени с системой управления движением позволяет автоматически корректировать скорость поездов в зависимости от текущего состояния пути, обеспечивая безопасность без снижения пропускной способности. Роботизированные комплексы, оснащенные ИИ, не просто заменяют человека на опасных участках, но и непрерывно совершенствуют алгоритмы диагностики, повышая точность выявления дефектов с каждой новой инспекцией.

Таким образом, китайский опыт показывает, что будущее высокоскоростного транспорта лежит в создании «цифрового близнеца» всей отрасли – виртуальной модели, которая постоянно обучается на реальных данных и используется для оптимизации всех процессов, от проектирования до эксплуатации.

Это трансформирует железнодорожный транспорт из традиционной, управляемой человеком системы, в интеллектуальную самоуправляемую инфраструктуру, способную гибко адаптироваться к изменениям и обеспечивать беспрецедентный уровень надежности и эффективности. Сравнение с другими странами (например, Россией) показывает схожесть стратегических направлений, но разницу в масштабах реализации. Китай также активно продвигает свои стандарты (CTCS, 5G-R) на международном уровне.

Таблица 1

Примеры интеллектуальных самообучающихся систем в высокоскоростном железнодорожном транспорте Китая

Область применения	Конкретный пример системы	Принцип работы / Технологии	Эффект / Результат
Диагностика и прогнозирование состояния инфраструктуры	Большая обучаемая модель данных на основе ИИ	Агрегирует данные с тысяч датчиков, BIM-моделей и систем технического зрения. Использует глубокие нейронные сети для прогноза износа.	Автоматически инициирует ремонтные работы на основе прогноза износа (точность до 95% на месяц). Переход от планового к предиктивному обслуживанию.
Управление движением и безопасность	Интеллектуальная система управления поездами (на базе CTCS с ИИ)	Алгоритмы ИИ анализируют данные о графике, состоянии пути, энергопотреблении. Компьютерное зрение контролирует «слепые зоны».	Оптимизация графиков, снижение энергопотребления, автоматическое реагирование на аварийные ситуации на путях.
Техническое обслуживание и ремонт	Роботизированные комплексы с тактильными сенсорами и компьютерным зрением	Роботы сканируют узлы подвижного состава, выявляют микротрещины. Данные обрабатываются ИИ для оценки степени износа.	Сокращение времени обслуживания на 40%, повышение точности диагностики на порядок, замена человека на опасных участках.
Проектирование инфраструктуры	Нейросетевая генерация BIM-моделей	ИИ автоматически создаёт и оптимизирует цифровые модели на основе технической документации и данных лазерного сканирования.	Сокращение трудозатрат на проектирование на 85%, улучшение прочностных и аэродинамических характеристик конструкций.
Интегрированная платформа мониторинга	Цифровой двойник железнодорожной инфраструктуры	Объединяет данные стационарных датчиков (10 шт./км), мобильных комплексов (CIT450), БПЛА и спутников (Gaofen) в 3D-модель с точностью до мм.	Возможность автоматической корректировки скоростных режимов поездов в реальном времени в зависимости от состояния инфраструктуры.
Управление пассажиропотоками и сервисом	Система анализа пассажирских потоков на основе больших данных	ИИ обрабатывает данные о бронировании, посадке, перемещениях пассажиров для прогнозирования нагрузок и оптимизации логистики.	Повышение комфорта пассажиров, эффективное распределение ресурсов, автоматизация процессов посадки.

Заключение

Проведенный анализ развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае демонстрирует впечатляющий пример того, как системный подход к технологическому развитию может привести к трансформации целой отрасли. Китайский опыт убедительно доказывает, что успех в области высокоскоростных перевозок достигается не через отдельные технологические прорывы, а благодаря комплексной модернизации всех элементов транспортной системы – от подвижного состава до управленческой инфраструктуры. Особую ценность представляет созданная в Китае модель инновационного развития, где фундаментальные исследования, прикладные разработки и промышленное внедрение образуют единый взаимосвязанный цикл, поддерживаемый продуманной государственной политикой и эффективными механизмами финансирования.

Ключевым достижением китайской железнодорожной отрасли стало не просто создание скоростных поездов, а формирование целостной экосистемы, в которой передовые инженерные решения сочетаются с цифровыми технологиями нового поколения. Внедрение искусственного интеллекта, роботизации и предиктивной аналитики переводит высокоскоростной транспорт на качественно новый уровень, превращая его в интеллектуальную самообучающуюся систему. При этом особого внимания заслуживает китайский подход к стандартизации и защите интеллектуальной собственности, который позволяет стране не только осваивать передовые технологии, но и формировать собственные технологические стандарты мирового уровня.

Перспективы дальнейшего развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в глобальном масштабе во многом будут определяться тем, насколько успешно другие страны смогут адаптировать и творчески переработать китайский опыт с учетом своих национальных особенностей. Важнейшим уроком является понимание того, что технологическое лидерство достигается не через копирование отдельных решений, а путем выстраивания собственной инновационной системы, объединяющей науку, промышленность и образование. Китайский пример наглядно показывает, что инвестиции в исследования и разработки, подкрепленные долгосрочной стратегией развития, способны превратить железнодорожный транспорт из традиционной отрасли в драйвер технологического прогресса и экономического роста.

Список использованной литературы

1. Zhou, M., Peng, Y., & An, L. (2022). Technical advances, innovation and challenges of developing high-speed rail in China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. <https://doi.org/10.1680/jcien.21.00149>
2. Feng, L., & Yu, X. (2018). A Study on the Integration Innovation Mode of China Railway High-Speed (CRH) Technology. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.23919/PICMET.2018.8481875>
3. Fang, X., Yang, Z., & Lin, F. (2013). Virtual Development Platform of High-Speed Train Traction Drive System in View of Top-Level Goals. *Vehicle Power and Propulsion Conference*. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2013.6671741>
4. Hao, W. (2012). Development of the High Speed Comprehensive Inspection Train
5. Ji, P. (2023). Head shape design of Chinese 450 km/h high-speed trains based on pedigree feature parameterization. <https://doi.org/10.21606/iasdr.2023.231>
6. Oh, K. T., Yoo, M.-S., Jin, N., Ko, J., Seo, J., Joo, H., & Ko, M. (2022). A Review of Deep Learning Applications for Railway Safety. *Applied Sciences*. doi: 10.3390/app122010572
7. Liu, J., Liu, G., Wang, Y., & Zhang, W. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for integrated railway systems. *High-speed railway*. doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.006
8. Liu, J., Liu, G., Wang, Y., & Zhang, W. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for controlling and scheduling in integrated railway systems. *High-speed railway*. doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.002
9. Yan, Z., Tiantian, W., JingSong, Y., & Guoqin, Z. (2023). Development and engineering application of integrated safety monitoring system for China's high-speed trains. *Transportation safety and environment*. doi: 10.1093/tse/tdad017

10. Yi, S., Kuang, J., & Liu, R. (2023). Research on Safety Risk Prediction Model of High-Speed Railway Based on Chaotic RBF Neural Network. Journal Article. doi: 10.1109/ishc61216.2023.00025
 11. Zihui, Z., Tian, X., & Zhiwei, S. (2023). Deepening Research on the Comprehensive Application and Development of Railway Intelligent Detection and Monitoring System and Key Technologies. Journal Article. <https://doi.org/10.1109/itoec57671.2023.10291609>
 12. Zheng, Song, Xu, Lei. (2020). A Fault Diagnosis Method of Bogie Axle Box Bearing Based on Spectrum Whitening Demodulation. Sensors (Basel, Switzerland). doi: 10.3390/s20247155
 13. Sai, D. H. (2024). Revolutionizing Railways: An AI-Powered Approach for Enhanced Monitoring and Optimization. Journal Article. doi: 10.55041/isjem01382
 14. Miao, Z., Zhang, Q., Lv, Y., Wenzhe, S., & Wang, H. (2018). An AI based High-speed Railway Automatic Train Operation System Analysis and Design. Proceedings Article. doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641650
 15. Li, X., Zhu, M., Zhang, B., Wang, X., Liu, Z. A., & Han, L. (2024). A review of artificial intelligence applications in high-speed railway systems. High-speed railway. doi: 10.1016/j.hspr.2024.01.002
 16. Sai, D. H. (2024). Revolutionizing Railways: An AI-Powered Approach for Enhanced Monitoring and Optimization. Journal Article. doi: 10.55041/isjem01382
 17. Zihui, Z., Tian, X., & Zhiwei, S. (2023). Deepening Research on the Comprehensive Application and Development of Railway Intelligent Detection and Monitoring System and Key Technologies. Journal Article. doi: 10.1109/itoec57671.2023.10291609
 18. Hong, P. (2017). Intelligent trouble diagnosis method for high-speed rail. Patent.
 19. Dubljanin, D., Marković, F., Dimić, G., Vučković, D., Petković, M., & Mosurović, L. (2024). Educational Application of Artificial Intelligence for Diagnosing the State of Railway Tracks. International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education.
 20. Chien-Kuo Chiu. (2024). AI-Driven railway regulator inspection planning system: enhancing railway safety inspection prioritisation and incident management. HKIE Transactions. <https://doi.org/10.33430/v31n4thie-2024-0012>
-