



Центр научно-технической информации и библиотек
– филиал ОАО «РЖД»

Дифференцированное Обеспечение Руководства

85/2025

Мультиагентный искусственный интеллект в диспетчерском управлении движением поездов

Интеллектуальная система диспетчерского управления пропускной способностью и перевозочным процессом CTMS (Capacity and Traffic Management System) – это ключевой элемент комплекса средств, для обеспечения цифровизации и автоматизации железных дорог Германии (DB).

Система CTMS разрабатывается в рамках инициативы компании Digitale Schiene Deutschland (DSD) железных дорог Германии и преследует цель повысить пропускную способность, качество и эффективность работы сети за счет развертывания цифровых технологий. В системе CTMS предусмотрено использовать искусственный интеллект (ИИ), для которого разработан метод мультиагентного обучения с подкреплением (MARL), позволяющий формировать детальные графики движения поездов значительно быстрее по сравнению с классическими методами.

Создавая технологии ИИ для системы CTMS, компания DSD использует результаты НИОКР в рамках проекта AI4REALNET¹. Кроме того, разработки по применению метода MARL в системе CTMS ведутся в рамках германо-французского проекта с участием национальных операторов железнодорожной инфраструктуры и университетов обеих стран.

Система CTMS рассматривается как универсальный инструмент, способный строить графики движения на всем горизонте планирования работы железнодорожной системы – от долгосрочного (включая планирование путевых работ) до оперативного – с целью регулирования текущего перевозочного

¹ AI4REALNET (AI for REAL-World network operation) – проект, который реализуется при поддержке Евросоюза и направлен на разработку приложений ИИ для критически важной инфраструктуры (железных дорог, электроэнергетики и воздушного транспорта).

процесса. На всех этапах формируются графики, которые достаточно детализированы для полностью или частично автоматизированного вождения поездов и автоматического управления системами централизации. При этом CTMS поддерживает как традиционные системы интервального регулирования на основе фиксированных блок-участков, так и перспективную поездоцентричную логику обеспечения безопасности.

Для такой комплексной системы принятия решений, как CTMS, компания DSD создает технологию составления графиков движения при помощи искусственного интеллекта, основанного на методе MARL. В его основе лежит глубокое обучение нейронной сети с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL), которая обучается решать комплексные задачи путем взаимодействия с динамической имитационной моделью. Метод DRL хорошо зарекомендовал себя в сферах стратегического планирования и непрерывного управления процессами в реальном времени.

Задача ИИ состоит в поиске приемлемых решений, при которых реализуются запросы на движение для всех поездов в имитационной модели с достижением всех критериев оптимизации. Если этот процесс завершается успешно, генерируется план-график работы полигона, содержащий всю информацию, требуемую для управления системами централизации и поездами, что в перспективе позволяет полностью автоматизировать работу стационарных средств ЖАТ и обеспечить автоведение поездов.

В отличие от классических методов ИИ ищет приемлемое, но необязательно оптимальное решение. Его сильной стороной является интеллектуальное сокращение объема информации и параллельные вычисления, что позволяет найти решение за короткий срок. Это имеет ключевое значение для системы диспетчерского регулирования движения поездов в реальном времени. Метод, разрабатываемый для CTMS, предназначен не для оптимизации существующих графиков движения, а для их разработки с нуля с формированием плана-графика работы полигона. Следовательно сфера его применения не ограничивается диспетчерским регулированием, а охватывает также планирование эксплуатационного процесса. Акцент на управлении каждым отдельным поездом с учетом общей эксплуатационной ситуации позволяет распараллелить вычисления и масштабировать их на крупные полигоны с большим числом одновременно курсирующих поездов.

Модели DLR воздействуют на имитируемую среду и обучаются посредством функций, таких как:

– *воздействия* – на каждом этапе имитационного моделирования ИИ принимает решения о воздействиях на два компонента эксплуатационного процесса: скорости движения поезда и перевода в нужное положение

следующей стрелки на его маршруте;

– *наблюдения* – на каждом этапе имитационного моделирования ИИ получает информацию о каждом поезде, позволяющую определить возможности для его движения, и об общей эксплуатационной обстановке на сети;

– *поощрения* – эта функция обратной связи на современном этапе разработки упрощенно награждает модель за прибытие поезда в пункты остановки и надлежащий выезд за пределы полигона. Успешность имитируемых рейсов оценивается числом полностью выполненных рейсов.

В начале обучения модель ИИ пытается пропустить поезда по полигону при помощи случайных воздействий. За счет обратной связи ИИ обучается управлять поездами и инфраструктурой таким образом, чтобы формировался график движения, позволяющий реализовать все запросы на движение. Для выхода на этот уровень ИИ должен выполнить тысячи циклов имитационного моделирования с широким спектром разнообразных эксплуатационных ситуаций.

Для возможности масштабирования на крупные полигоны и сеть в целом в модели DRL применяется метод мультиагентного обучения с подкреплением MARL. При одноагентной модели на каждом этапе одним комплексным воздействием приходится управлять всеми имитируемыми поездами, а при методе MARL также используется единственная модель ИИ, но решения принимаются отдельно для каждого поезда с учетом текущей ситуации и на основе сформированной в процессе обучения общей стратегии, охватывающей все поезда. Этот процесс допускает распараллеливание задач, что позволяет масштабировать модель в расчете на большее число поездов. Кроме того, стратегия принятия решений может применяться в отношении разного числа поездов.

Основной идеей данного подхода является такое формирование графика, при котором на основе запросов на движение с минимальными требованиями генерируется детальный план-график работы полигона. В процессе диспетчерского регулирования перевозочного процесса система управления также генерирует оперативный график движения, однако при этом отличаются граничные условия и цели оптимизации. При возникновении сбоя запускается имитационное моделирование на основе информации о текущей эксплуатационной ситуации с данными о местоположении и скорости движения поездов в условиях определенного (возможно, нарушенного) состояния инфраструктуры и системы ЖАТ. Запросы на движение при диспетчерском регулировании представлены в последней актуальной версии нормативного графика движения, т. е. для каждого поезда должны быть по возможности выполнены заложенные в график условия в отношении

графиковых остановок и выхода за пределы полигона.

Метод MARL опробовали на реальном полигоне – Магдебургском железнодорожном узле с развернутой длиной путей 343 км и 29 станциями.

В варианте 1 ставилась задача координации интенсивного движения поездов на определенной станции Бидериц. Были сгенерированы 100 сценариев с запросами на движение, в которых по 10 поездов в разных сочетаниях проследовали через станцию, в том числе с остановкой на ней. Система CTMS должна была регулировать сквозное движение через станцию и распределение перронных путей между поездами, совершающими остановку.

В варианте 2 исследовалось составление планов-графиков работы для всего выбранного полигона с генерацией 72 сценариев, при этом число поездов разных категорий и с разными характеристиками варьировалось от 17 до 41. Оценивались возможности CTMS принятия значительного числа решений по планированию и регулировочным воздействиям на полигоне с большим числом путей и стрелок, а также по протяженности координируемых маршрутов и величине временного горизонта. Для оценки качества диспетчерского регулирования был закрыт один из интенсивно используемых путей в центральной части полигона. Кроме того, имитировались внезапные нарушения и на других путях. Важно было подтвердить способность ИИ реагировать на возникновение неизвестных ситуаций.

Результаты исследований

Для варианта 1: ИИ с применением метода MARL нашел решения для всех сценариев (100%).

Для варианта 2: применение метода MARL позволило организовать бесконфликтное движение 94% поездов в 72 сценариях, причем это касалось как планирования, так и диспетчерского регулирования движения поездов. Модель ИИ смогла справиться с неожиданными изменениями в железнодорожной инфраструктуре. Следует также отметить, что модель ИИ обеспечила 100%-ный показатель в сценарии с 19 поездами, но в сценарии с 41 поездом проявила себя несколько хуже (99%).

В среднем для генерации прогнозного графика движения поездов на горизонте 42 мин. для каждого из сценариев потребовалось менее 30 с. Несмотря на некоторый разброс значений, обусловленный разной сложностью сценариев и различными нагрузками на аппаратное обеспечение, можно видеть линейный рост времени вычислений по мере увеличения числа поездов на полигоне вместо экспоненциального роста, характерного для традиционных технологий. Такое сокращение времени вычислений при сопоставимом качестве их результатов делает возможным применение метода MARL для диспетчерского регулирования движения поездов в реальном времени.

Метод MARL подтвердил свой потенциал в качестве быстрого, гибкого и универсального инструмента автоматического построения долгосрочных и оперативных графиков движения поездов для будущей цифровой железнодорожной системы, однако он требует дальнейшего развития для улучшения масштабируемости и качества результатов.

*Источники: по материалам компаний Digitale Schiene Deutschland (англ. яз.);
zdmira.com, 21.09.2025*