

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

**И.С. МАКАРОВ,**

Московский физико-технический институт (МФТИ),  
ведущий программист-разработчик  
лаборатории волновых процессов и систем управления

**Р.А. ГОРБАЧЕВ,**

МФТИ, ведущий инженер, заведующий лабораторией  
волновых процессов и систем управления,  
кандидат технических наук

**М.В. ФОМИН,**

ООО «КиберТех-Сигнал», технический директор

**А.Н. НОВИКОВ,**

МФТИ, ведущий инженер  
лаборатории волновых процессов и систем управления

**А.В. КАЛИНКИН,**

ООО «КиберТех-Сигнал»,  
руководитель департамента автоматизации

**В** СЛЕДСТВИЕ увеличения объемов грузовых и пассажирских перевозок все более актуальной становится задача соблюдения нормативного графика движения, поскольку любое отклонение от него может привести к значительным задержкам поездов или их отмене. В связи с этим особое внимание уделяется вопросам совершенствования процессов управления движением поездов, растет потребность в реализации систем поддержки принятия решений (СППР), оставляющих за человеком выбор окончательного варианта действий.

Эффективно решать задачи оперативной корректировки графика движения поездов помогает применение технологии искусственного интеллекта (ИИ), а именно – нейронной сети, которая используется в качестве инструмента поиска решений конфликтных ситуаций. Ее основная концепция заключается в применении теории игр, в которой главным игро-

ком является поездной диспетчер. В динамической среде он пошагово взаимодействует с группой агентов, в качестве которых выступают поезда [1]. Целью игры является достижение всеми поездами конечных точек их маршрутов с учетом заданных ограничений и с минимальным отклонением по времени от нормативного графика движения.

Указанную технологию планируется использовать как один из методов решения конфликтных ситуаций в рамках проекта по реализации СППР в процессах диспетчерского управления. Ранее в подобных целях применялись классические алгоритмы теории графов (например, поиск кратчайшего пути). С их помощью можно найти оптимальное решение, однако оно будет таковым только на текущем шаге, без учета перспективы развития ситуации.

Устранить указанный недостаток помогает использование алгоритмов, основанных на та-

ких новейших технологиях, как машинное обучение искусственного интеллекта, позволяющих отыскивать оптимальное решение на несколько шагов вперед. Для оценки применимости такого подхода сопоставим задачу поиска решения конфликтных ситуаций со схожей с ней в некоторой степени игрой в шахматы. В этих целях сравним две основные части шахматных программ – Stockfish и AlphaZero [2; 3]. Первая из них использует сложный набор аналитических функций в зависимости от текущей ситуации на доске, а вторая – технологии ИИ, в частности, глубокие сверточные нейронные сети. По результатам тысячи игр, проведенных между этими программами, наивысшую эффективность показало применение второго подхода – за одно и то же время при решении такого класса задач AlphaZero требовалось выполнять в 1000 раз меньше обчетов ситуации, чем Stockfish.

За рубежом технологии искусственного интеллекта применяются в основном непосредственно в системах управления движением самого поезда, прогнозирования неисправностей подвижного состава и др.

На данный момент вектор развития автоматизации сместился на трудоемкий процесс управления движением поездов, который реализует поездной диспетчер. Ему приходится искать варианты решения конфликтных ситуаций во многом опытно-экспертным путем. Системы автоматизации этого процесса на основе технологий искусственного интеллекта уже

начали находить свое применение в сфере скоростного движения. Однако на одном и том же участке могут обращаться несколько типов поездов, отличающихся приоритетом и технологическими характеристиками, что усложняет задачу поиска приемлемого решения.

Благодаря применению технологии машинного обучения искусственного интеллекта, участвующего в построении планового графика, появляется возможность увеличить пропускную способность участка. Однако ИИ, обученный таким образом, не способен оперативно разрешать конфликты. Это задача весьма актуальна в реальных условиях, когда наиболее приоритетным направлением поиска является именно максимально возможное приближение исполненного графика движения к плановому.

Технология поиска конфликтов математическими методами с помощью теории графов лучше приспособлена к решению задач диспетчерского управления. Однако так же, как и предыдущая, она применима только для одного типа движения, поскольку не учитывает, например, приоритеты пропуска поездов или ограничения по максимально разрешенной скорости движения в зависимости от характеристик поезда.

В представленной далее технологии разрешения конфликтов с помощью искусственного интел-

лекта, обученного на базе генетических алгоритмов, решены все эти проблемы. Системы СППР для диспетчерского аппарата, построенные на основе такого ИИ, могут адаптироваться под особенности железных дорог разных стран и позволяют учитывать их специфику (в частности, различные виды движения, а также правила и ограничения, связанные с ними).

Пример реализации данной технологии показан на **рис. 1**. При возникновении нештатных ситуаций оператор вносит в плановый график движения поездов действующие ограничения на движение по перегонам и станциям, после чего запускает поиск оптимального решения. В результате модулем разрешения конфликтов предлагается максимально приближенный к исходным данным вариант графика, в котором учтены приоритетность ниток и другие нормативные параметры.

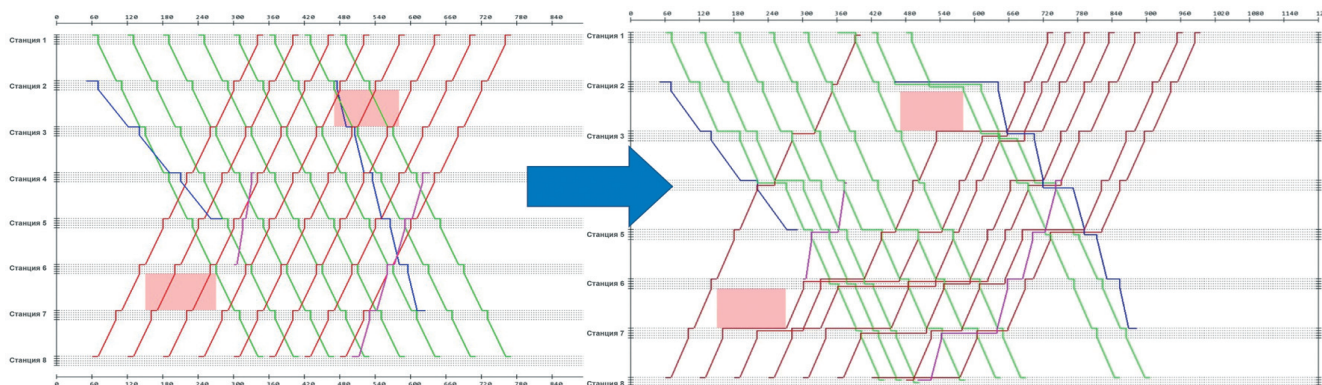
Для поиска решений при возникновении конфликтных ситуаций в указанной технологии реализована модель движения поездов. В целом граф железнодорожного участка представляется как совокупность сегментов. Для максимальной обобщенности введено понятие инфраструктурного сегмента – такого фрагмента железнодорожной сети, на котором в конкретный момент

времени может находиться только один поезд (например, участок пути на станции или блок-участок на перегоне). Каждый инфраструктурный сегмент имеет уникальный идентификатор и имя, характеризуется длиной, направленностью и смежными с ним инфраструктурными сегментами.

Поезд задается как объект, имеющий следующие показатели: уникальный идентификатор; тип движения; длина; скорость; приоритет; координаты и маршрут. Маршрут в свою очередь содержит информацию о времени прибытия и стоянок на станциях, а также список всех станций, на которых должен останавливаться поезд.

Помимо этого, для поезда задается статус, в котором учитываются, в том числе, произошедшие с ним непредвиденные ситуации. Он может иметь статус «Движение» (движется), «Стоянка» (стоит), «Остановка движения» (закончил движение) или «Окончание стоянки» (закончил стоянку). Поезд может получать команды «Двигаться», «Продолжить» и «Ожидать». Первая и последняя из них выполнимы только в том случае, если поезд находится в статусе «Стоянка», который подразумевает либо плановую стоянку, либо окончание движения по перегону

Рис. 1. Работа модуля разрешения конфликтов



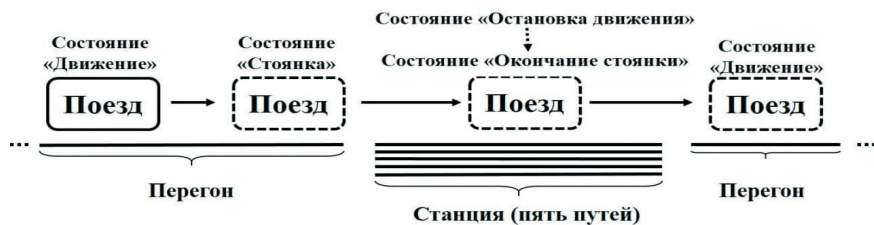


Рис. 2. Математическая модель движения поезда по участку

(рис. 2).

В представленной технологии принятие решений в процессах управления движением поездов будет реализовано на основе интеллектуального управления. Для этого была построена полносвязная искусственная нейронная сеть, обученная с использованием генетического алгоритма и состоящая из трех слоев – входного, выходного и скрытого, содержащих 392, 102 и 392 нейрона соответственно (рис. 3). На ее вход поступает информация о сегментах графа участка, а также поездах с их маршрутами, а на выходе формируется вектор команд для ожидающих их поездов. В результате анализа предметной области была сформирована тестовая модель, включающая в себя объекты инфраструктуры – станции и перегоны, а также поезда различных типов, следующие по построенным маршрутам. Разбиение всего участка на инфраструктурные сегменты обеспечило комфортное формирование входного вектора признаков для нейронной сети.

Действия главного игрока (поездного диспетчера) заключаются в том, что на каждом шаге игры он отдает команды каждому поезду таким образом, чтобы поезда следовали по соответствующим им маршрутам и не нарушали заданные технологические ограничения по пути следования (см. рис. 2).

Непредвиденные ситуации в данной игре генерируются случайным образом с частотой, которую пользователь задает в качестве входного параметра. Существует фиксированный набор непредвиденных ситуаций (например, ложная занятость пути, потеря контроля стрелки, перегорание лампы светофора или неисправность локомотива), для каждой из которых задается продолжительность. Игра дискретизирована по времени и состоит из шагов – отрезков времени, не содержащих событий (изменений состояния инфраструктурного сегмента или статуса поезда). События могут быть как штатными (сопутствующими движению поезда, например изменение статуса

движения), так и нештатными. Под изменением статуса движения поезда понимается следующее: пока поезд движется по инфраструктурному сегменту или стоит на нем, он находится в статусе «Движение» или «Стоянка» соответственно. Однако когда он достигает конца инфраструктурного сегмента или закончилось время запланированной остановки, его статус меняется на «Закончил движение» и «Закончил стоянку» соответственно, что и является запланированным событием. Это означает, что данный поезд готов получить следующую команду и начать движение на указанном инфраструктурном сегменте или продолжать стоять до следующего события. Из-за слишком мелкой гранулярности шагов, приводящей к их однообразию, от равномерной дискретизации временной шкалы по минутам было решено отказаться в пользу шагов по событиям.

При разрешении конфликтных ситуаций с учетом ограничений на соблюдение маршрутов игроку-поезду необходимо минимизировать отклонение по времени от нормативного графика движения с учетом других необходимых параметров (например, энергоэффективности).

СППР для главного игрока (поездного диспетчера) основывается на интеллектуальном управлении с помощью полносвязной искусственной нейронной сети с несколькими скрытыми слоями. Вектор входных параметров формируется на основе информации о состоянии каждого инфраструктурного сегмента и их числе в сети, а также о поезде (его статусе, программном индексе маршрута и др.), если таковой присутствует на данном инф-

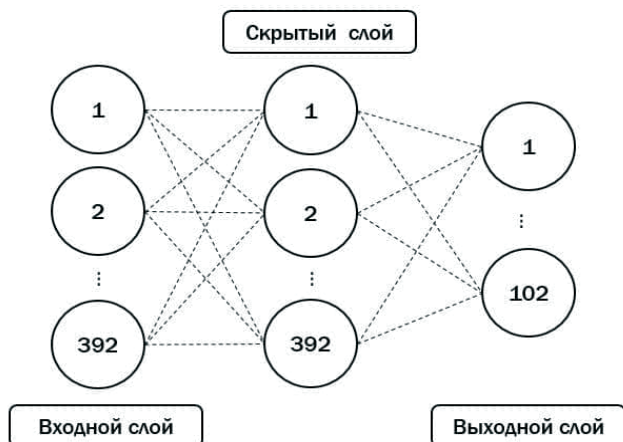


Рис. 3. Архитектура предполагаемой нейронной сети

раструктурном сегменте. Такой подход к формированию входного вектора обеспечивает ему фиксированную размерность при любом числе поездов в системе.

Вектор выходных параметров содержит данные о трех типах команд для каждого поезда:

- «Продолжить» — требует от поезда сохранять свой статус до следующего события (продолжать двигаться или стоять, если он движется или стоит соответственно);
- «Движение» — указывает поезду, завершившему движение или стоянку на текущем инфраструктурном сегменте, следующий инфраструктурный сегмент, в направлении которого он должен начать движение;
- «Команда» — это служебная команда-заглушка, применяющаяся в ситуации, когда на инфраструктурном сегменте поезда нет.

Для отыскания наилучшего решения оптимизационной задачи при обучении нейронной сети был применен генетический алгоритм, основанный на имитации процессов естественного отбора, в ходе которого выживают особи с наибольшей функцией приспособленности. Основным материалом при этом служат естественные мутации генов и их комбинации, получаемые при размножении. Наиболее приспособленные особи получают возможность скре-

шиваться (кроссовер) и давать потомство, на которое впоследствии оказывают влияния случайные мутации.

В данной технологии генетический алгоритм реализован следующим образом. Первый шаг — это создание начальной популяции из 100 особей, каждая из которых представляет собой отдельный экземпляр нейронной сети со случайными, равномерно распределенными весами связей. На втором шаге особи подготавливаются для естественного отбора в следующее поколение, для чего их сортируют по результатам оценки эффективности. Иначе говоря, для всех особей вычисляется ошибка наилучшей особи и все они сортируются в порядке ее возрастания для последующей операции генерации. На третьем шаге генерируется сле-

дующее поколение. В этих целях отбирается заданное число особей с лучшими значениями оценки эффективности, которые копируются в новое поколение. Дополнительно к части особей применяются операции скрещивания и случайные мутации. Далее процесс повторяется со второго шага до тех пор, пока ошибка наилучшей особи не станет минимальной.

Генетические алгоритмы применяются для решения самых разных задач и хорошо зарекомендовали себя при поиске наиболее эффективных решений. К достоинствам таких технологий можно отнести оптимальную применимость на разветвленном участке железнодорожного пути. Это дает преимущества применения на диспетчерских участках, имеющих крупные узловые станции.

#### Литература

1. Intelligent control systems for maintenance of railway rolling stock. / E.M.Zakharova, F.F.Paschenko, A.K.Takmazyan, I.K.Minashina, N.A.Kuznetsov // Proceedings of the 11th IEEE International conference on the application of information and communication technologies : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017. — V. 1. — pp. 423–425.
2. A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play / D.Silver, Th.Hubert, J.Schrittwieser, I.Antonoglou, M.Lai, A.Guez, M.Lanctot, L.Sifre, Dh.Kumaran, Th.Graepel, T.Lillicrap, K.Simonyan, D.Hassabis // Science : AAAS, 2018. — V. 362 — pp. 1140–1144.
3. Stipić A. Deep learning advancements: closing the gap. / A.Stipić, T.Bronzin, B.Prole, K.Pap // 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics conference proceedings : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) — 2019. — pp. 1087–1092.

## В следующем номере

- Год науки и технологий. Представляем научно-исследовательские организации железнодорожного транспорта
- Развитие клиентоориентированной технологии продвижения контейнерных поездов
- Формирование цифровой экосистемы управления требованиями к продукции железнодорожного назначения на основе машиночитаемой нормативно-технической документации
- Зарубежный опыт реализации проектов по развитию магистральной железнодорожной инфраструктуры.