

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

© 2015 А.В. Игнатенков<sup>1</sup>, М.Г. Лысиков<sup>1</sup>, А.М. Ольшанский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», г.Москва

<sup>2</sup> Самарский государственный университет путей сообщения

Поступила в редакцию 30.07.2015

В статье рассматриваются основные подходы к интеллектуализации системы прогнозирования времени прибытия поездов на станции и применение искусственных нейронных сетей к разработке графика движения поездов.

*Ключевые слова:* график движения поездов, искусственная нейронная сеть, станция, прогнозирование.

Одной из ключевых транспортных систем для РФ является железнодорожный транспорт как набор взаимодействующих предприятий, инфраструктуры, средств передачи и обработки информации, объединенных ключевыми бизнес-процессами.

Особенностью железных дорог как вида транспорта является жесткое следование технологическому процессу, который остается принципиально неизменным уже в течение многих лет.

Итак, железнодорожный транспорт представляет собой сложную иерархическую систему с наличием в ней различных игроков с разнообразными интересами, кроме того, находящуюся в процессе реформирования.

В ходе реформирования значительно возрос уровень сложности системы: если в 2005 году мы говорили об еще четырехуровневой системе, то в настоящее время это – система, в которой включено от 6 до 8 уровней управления, причем разные подотрасли железнодорожного транспорта обладают различным числом уровней.

В то же время, сложившаяся система является матричной, то есть, изначально предопределяющей наличие конфликтов между горизонтальным (территориальным) и вертикальным (функциональным) уровнями управления.

Эти ключевые особенности привели к тому, что реализация традиционной технологии перевозочного процесса (на что был ориентирован железнодорожный транспорт изначально) прев-

ратилась в задачу, на которую влияет куда больше управленческих факторов, чем ранее.

Кроме того, существенно изменилась и отраслевая принадлежность участников перевозочного процесса, работающих на единой инфраструктуре: частные компании, квази-государственные образования с участием регионов, дочерние компании ОАО «РЖД» и др.

Это привело к тому, что гораздо труднее стало достичь технологической и экономической координации усилий всех служб и участников перевозочного процесса как в части собственно перевозок (результат – снижение маршрутной скорости, падение пассажирооборота и др.), так и в части планирования предстоящей работы [1].

Таким образом, в сложившихся условиях ключевая роль в повышении эффективности перевозочного процесса отводится интеллектуализации процесса принятия управленческих решений.

Цель настоящей статьи – сформулировать основные направления развития перспективных интеллектуальных технологий управления транспортными системами на основе авторских подходов.

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте может быть разделен на 2 уровня:

1. Работа линий (участков) и пропуск поездов по перегонам
2. Процесс поездообразования и переработки поездопотока на станциях (сортировочных, грузовых).

Сортировочная станция – важнейшая подсистема железнодорожного транспорта, задачами которой является формирование поездов и согласование режимов работы участков.

Эффективность оперативного управления сортировочной станцией во многом зависит от своевременности получения и правильности использования предварительной информации о подходе поездов и наличии локомотивов и локомотивных бригад. В соответствии с Инструкцией по оперативному планированию поездной

*Игнатенков Александр Владимирович, начальник отдела разработок программного обеспечения отделения информационных технологий линейного уровня управления перевозками. E-mail: a.ignatenkov@gmail.com*

*Лысиков Михаил Григорьевич, начальник отделения информационных технологий линейного уровня управления перевозками. E-mail: m.g.lysikov@gmail.com*

*Ольшанский Алексей Михайлович, кандидат технических наук, докторант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».*

*E-mail: lexolshans@gmail.com*

и грузовой работы железных дорог оперативное планирование работы станции осуществляется на сутки, смену и по 4 - 6 - часовым периодам в течение смены (текущее планирование).

Рассмотрим практическую схему обработки информации о подходе поезда. Для этого разделим процесс получения информации о подходе поезда на три условных этапа:

- дальний подход;
- предварительный подход;
- точный подход.

**Дальний подход** – информация о поезде, появляющаяся после его формирования и отправления со станции формирования, либо после пересечения поездом границы государства или дороги. В общем случае – первичная информация, поступающая в автоматизированную систему обработки информации и управления перевозками. Особую актуальность дальний подход имеет для ускоренных поездов и маршрутов. Наиболее неточным (либо вообще отсутствует) является дальний подход для составов порожних вагонов, т.к. их продвижение очень часто происходит не по плану формирования, а по регулировке дорожного диспетчера.

Дальний подход получается работниками станции за 3-7 часов до прибытия поезда и имеет малую точность.

**Средний подход** – информация о поезде, которая поступает на данную станцию после проследования поездом последней станции смены локомотива и бригад (а также последней станции перелома веса и длины).

Время получения предварительного подхода диспетчером зависит от длины плеч обращения локомотивов и локомотивных бригад (для сравнения: плечи Орехово-Зуево – Люблино (через Михнево) и Орехово-Зуево – Кусково) и, в среднем, составляет от 1,5 до 3-5 часов.

Тем не менее, точность планирования работы, основанная на таком подходе, не превышает 40-60%.

Говоря иначе, поезда прибывают и отправляются с высоким уровнем неорганизованности.

Поездопоток, входящий на сортировочную станцию, можно разделить на две компоненты:

- поездопоток, входящий планомерно с удаленных станций (например, такие корреспонденции как Екатеринбург-Сортировочный – Нижний Новгород – Ярославль, Инская – Челябинск – Уфа – Кинель и т.п.), главной особенностью которого является относительное постоянство времени прохождения по участкам и, в идеальном случае, фиксированное время проследования «реперных» станций с постоянной скоростью. Это дает возможность прогнозировать прибытие и обработку такого поездопотока заранее.

- поездопоток стохастический, образуемый местными назначениями, учитывающий измене-

ния конъюнктуры рынков и поэтому входящий и уходящий своеобразными волнами, который можно описать некоторым сечением случайного процесса  $X_t = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ . Здесь  $1, 2, \dots, n$  – компоненты этого процесса, зафиксированные в момент  $t$ . Такой процесс может быть в первом приближении рассматриваться как стационарный, а его колебания и отклонения значимы только в пределах местного узла.

Каждый компонент указанного вектора можно записать как  $x_i$ , с учётом некоторой ошибки прогноза, имеющей ширину, причём для обеих категорий поездопотока эта ширина отличается [3].

В последние 40 лет происходит подъём интереса к нейронным сетям – динамическим или статическим моделям, построенным из элементарных блоков – формальных нейронов, объединённых в квазимозговые структуры [2]. Важная черта – это параллельность обработки информации, возможность сохранения в «памяти» определенных образов и возможность достройки образов по ассоциациям, что роднит их с мышлением человека.

Одним из принципов прогнозирования поездной обстановки предлагается считать использование двух нейронных сетей для прогнозирования как по регулярному, так и по стохастическому поездопотоку; каждая из сетей будет прогнозировать свою компоненту перспективного поездопотока. Исходя из логики задачи, а также из того, что в данном случае функция распознавания образов или классификация режимов работы станций не является главной задачей, автором выбрана архитектура многослойного перцептрона, обучающегося по классической градиентной схеме с обратным распространением ошибки [3].

Рассматривалась сортировочная станция с четырьмя подходами (направлениями), имитирующая основные особенности поведения потока, входящего в станцию Ярославль – Главный Северной железной дороги. На каждом направлении были выделены одиннадцать участков и двенадцать «участковых» станций. Данные формировались за предыдущие 30 дней, при этом по условиям задачи на указанном полигоне в день возникало дополнительно 20 новых поездов.

Для полученных тестовых данных была поставлена задача построить модель нейронной сети, позволяющей прогнозировать времена прибытия на основе прогноза отклонений от нормативного графика движения поездов.

По итогам проведенных нами построения моделей и анализа их работы на тестовой выборке наилучшим образом себя показали многослойные перцептроны с выходными нейронами, характеризуемые линейной функцией активации, представляющей собой линейную комбинацию сигналов, полученных от скрытых нейронов. Наилучшей из них оказалась модель с

4-мя скрытыми нейронами, характеризуемыми экспоненциальной функцией активации.

Величина относительной ошибки прогноза для худшей из отобранных сетей не превысила 15% от абсолютного значения отклонения по станции, которое составило 4 минуты. Таким образом, момент прибытия грузового поезда прогнозируется с точностью 36-40 секунд [3].

Таким образом, показана принципиальная возможность применения нейросетевого подхода к транспортным системам. На модельных данных полученную точность можно считать достаточной для того, чтобы развивать нейросетевые модели в управлении железнодорожными системами.

Перспективным направлением в области построения интеллектуальных систем управления работой станций является переход на нейросетевое прогнозирование и управление всеми подразделениями, участвующими в работе станции.

Система для прогнозирования работы станции включает два блока, отвечающие за предсказание плана подхода поездов: это блок дальнего прибытия поездов и «случайного местного фона». Результат функционирования системы подается на вход нейронной сети, которая с учетом положения поездов на последнем перегоне и реакции работников центра управления перевозками (ДЦУП) (предварительно работа аппарата ДЦУП должна быть формализована в виде неких отношений, например, нечетких логических схем) выдаст скорректированный прогноз прибытия поездов на станцию.

Моменты, связанные с функционированием деповского комплекса и выдачей исправных локомотивов под поезда, учитываются в блоке «система прогноза тягового подвижного состава (ТПС) для станции». На первом этапе данный блок будет иметь вероятностный характер, выдавая среднее число локомотивов и плановое время их появления на выход в выбранный период с учетом закона распределения отказов в подлежащих выдаче локомотивах. На втором этапе – результат разработки планов по выдаче локомотивов на основе уже выданного системой плана подхода поездов.

С учетом влияния фактора ТПС появится прогноз времен прибытия-убытия поездов с выбранной станции.

Далее производится считывание из автоматизированных систем управления работой станции или расчет (например, с помощью имитационной модели) текущего положения на станции (число поездов, занятость путей, времена простоя, отклонения от точек отправления поездов), в результате разницы между фактическим и прогнозным положением поступает в систему адаптации вычислений прогноза. До тех пор, пока точность прогноза не войдет в заданную пользователем зону, будет производиться корректировка про-

ноза. Удовлетворяющий по точности прогноз будет приниматься в качестве планового задания на следующий период.

Представленный подход может применяться и к процессу поездообразования с целью прогноза времени отправления поезда с сортировочной станции.

Теперь рассмотрим формализованный подход к разработке графика движения поездов (ГДП).

График движения поездов – система событий и процессов между ними, выбранная и заданная на многомерном графе путей и станций, включая необходимые условия и ограничения на отношения между элементами графа и категорией процесса.

Такое определение ГДП является новым с позиций практики и теории управления эксплуатационной работой железных дорог. Оно включает в себя следующие элементы:

- точность графика (1 мин. для всех поездов, 0,5 минуты для скоростного графика);
- множество отдельных пунктов сети  $N$  станций;
- набор данных о соединении пунктов сети – матрица  $N \times N$ , а также матрица корреспонденций всех поездов, необходимых в графике (также  $N \times N$ );
- топологию путей  $\{R_N\}$  и набор свойств  $\{r_{1N} \dots r_{kN}\}$  каждого пути (длина, специализация работы, запреты на отдельные операции и пр.);
- моменты отправок поездов  $(a_1 \dots a_{1440})$  по всем отдельным пунктам;
- моменты прибытий поездов  $(b_1 \dots b_{1440})$  по всем отдельным пунктам;
- путность соединений между станциями (матрица  $N \times N$ ), значения путности 1,2,3,4;
- набор ограничений по прибытию и отправлению поездов (выраженный через условия допустимых неодновременных / одновременных прибытий и отправок, попутных следований, с помощью задаваемых величин межпоездного интервала и пр.);
- пропускную способность станций и перегонов;
- емкости станций (их парков);
- сведения о лимитирующих перегонах;
- информацию о минимальных перегонных временах хода между отдельными пунктами;

Задав указанные элементы, будем считать, что задано многообразие графиков движения поездов. В ряде случаев может быть задано и необходимое пользователю количество поездов по каждому направлению.

На практике график движения поездов обычно представляют в следующем виде: на вертикальной оси отмечают станции, на горизонтальной – время. С помощью ломаных линий, называемых нитками графика, каждая из которых соответствует одному поезду – происходит отображение движения поезда.

Чаще всего в современных условиях новый график движения поездов строится на основе предыдущих вариантов с внесением заданных корректировок. Программное обеспечение для этого основывается на переборе всех вариантов прокладки ниток с некоторой оптимизацией. При этом оптимальность чаще носит локальный характер. Это не освобождает пользователей от необходимости многократно согласовывать разрабатываемые графики.

По мнению авторов, можно выделить следующие проблемы, требующие последующего решения.

1. Пусть дан участок железнодорожной сети, на котором проложен некоторый график движения поездов. Требуется проложить ещё одну нитку (копировать имеющуюся) либо в указанное, либо в произвольное время с соблюдением всех ограничений и критериев допустимости полученного графика.

2. Пусть дан участок железнодорожной сети с некоторыми ограничениями. Требуется проложить заданное число поездов указанных категорий.

3. Пусть дан участок железнодорожной сети, на котором проложен некоторый график движения поездов. К существующим ограничениям добавляется дополнительное: некоторый перегон между двумя станциями не может осуществлять работу поездов в некотором направлении (либо в обоих направлениях) в заданный промежуток времени. Требуется перестроить имеющийся график движения поездов.

4. Построить искусственную нейронную сеть, учитывающую, помимо описанных выше ограничений, ёмкость станции – т.е. возможность одновременно находиться на станции не более чем заданному количеству поездов.

С учётом ранее сказанного было решено попробовать применить к данной проблематике аппарат ИНС. Предлагается следующая архитектура нейронной сети. Каждый слой нейронной сети соответствует выбранной железнодорожной станции. В слое представлены нейроны, каждый из которых имеет номер от 1 до 1440 (по числу минут в сутках при нескоростном типе графика). Подробное описание их будет дано ниже.

Каждый нейрон может находиться в нескольких состояниях: «активен» - состояние нейрона, при котором входной сигнал может быть принят на вход соответствующего нейрона, «сон» - состояние, при котором значение потенциала данного нейрона равно нулю, «выключен» - нейрон не может принимать сигналы с предыдущего слоя.

Первоначальное состояние каждого нейрона – «активен». Поезд может прийти на текущую станцию (слой) в текущую минуту (номер нейрона в слое). Состояние «сон» наступает, если

поезд актуализирован (прибыл или отправился) на текущей станции в текущую минуту. Состояние «выключен» означает, что поезд не может прийти на текущую станцию в текущую минуту.

Из каждого нейрона  $i$ -го слоя идут связи к каждому нейрону слоя с номером  $i+1$  (всего 1440 связей). Кроме того, каждый нейрон связан с несколькими нейронами слева (т.е. с нейронами с меньшим номером) и справа (с нейронами с большим номером). Также каждый нейрон имеет связь с самим собой, что необходимо для того, чтобы более часто используемый нейрон оставлял остаточное возбуждение для последующего применения данного нейрона. Веса связей первоначально задаются случайным образом вещественными числами от нуля до единицы. В дальнейшем они изменяются в процессе обучения нейронной сети.

Связи нейрона с соседними нейронами в том же слое означают следующее. В случае нахождения нейрона в состоянии «сон», все нейроны, которые связаны с ним, переходят в состояние «выключен». Такая зависимость будет выражать такую сущность, как межпоездной интервал по станции – если поезд отправился со станции (прибыл на станцию), в течение некоторого времени ни один поезд не может отправиться с той же станции (прибыть на ту же станцию).

Если состояние нейрона «сон», то по исходящим связям на следующий слой будет передана информация о том, что поезд пришёл на указанную станцию в данное время.

В качестве первого прототипа выступает сеть, написанная на языке C#. Задача – подобрать с помощью обучения веса нейронов таким образом, чтобы решалась задача прокладки поездов по участку.

Обучение проводится следующим образом. Первоначальные веса определяются случайным образом числами от 0 до 1. Затем на первый слой подаются сигналы о том, что конкретная минута рассматриваемых суток инцидентна событию на станции. Нейроны, номера которых совпадают с минутами входа или выхода какого-либо поезда с первой станции, переходят в состояние «сон», соседние с помощью внутренних связей переходят в состояние «выключен». Затем с помощью связей активируются нейроны на следующем слое. Поскольку веса на данном этапе являются случайными, нейроны на следующем слое также активизируются случайным образом. По действительным значениям времён появления поездов на этом участке из обучающего набора вычисляется величина ошибки и происходит изменение веса для её уменьшения.

Для анализа работы сети её промежуточные состояния, т.е. наборы весов, значения выходов нейронов, представляются в формате xml. На сегодняшний момент ИНС умеет строить график

движения поездов одного типа (только пригородные, только грузовые и т.п.).

Основная трудность синтеза предлагаемой архитектуры заключается в том, что, в отличие от распространенных классических архитектур многослойного персептрона и сети Хопфилда, предлагаемая конструкция должна как запоминать некоторые образы (в виде ранее исполненных графиков), что роднит ее с сетью Хопфилда и рекуррентными нейронными сетями, так и должна предсказывать «траекторию» нитки графика движения поездов (что роднит ее с задачей аппроксимации функции и прогнозирования ее значений). Кроме того, требует исследования аспект устойчивости функционирования предлагаемой архитектуры сети.

Таким образом, авторами создан прототип нейронной сети квазихопфилдовского типа с несколькими состояниями нейронов и наличием обратных связей.

Описанная нейронная сеть позволяет запоми-

нать такие ограничения железнодорожного участка, как времена хода и межпоездные интервалы, а также воспроизводить движение поезда по нему.

Вышеуказанные проблемы требуют выработки определенных синтетических нейросетевых архитектур и будут решены в ходе работы над проектом по созданию интеллектуальных систем управления железнодорожным транспортом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ольшанский А.М.* О некоторых принципах формирования отраслевых компаний // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. 2013. №1. С.50-53.
2. *Хайкин Саймон.* Нейронные сети: полный курс: [пер. с англ.] 2-е издание. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
3. *Лысиков М.Г., Ольшанский, А.М.* О некоторых подходах к прогнозированию прибытия поездов на сортировочные станции // Вестник транспорта Поволжья. 2014. №4. С.74-81.

## INTELLIGENT RAIL TRAFFIC TECHNOLOGIES

© 2015 A.V. Ignatenkov<sup>1</sup>, M.G. Lysikov<sup>1</sup>, A.M. Olshansky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC "Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport", Moscow

<sup>2</sup> Samara State Railway University

In the article intelligent neural network approaches to the rail arrival time forecast system and to construction of rail train schedule are considered.

*Keywords:* train schedule, artificial neural network, station, forecast.

---

*Alexander Ignatenkov, Head of Development Department of IT Linear Control Department.*

*E-mail: a.ignatenkov@gmail.com*

*Michael Lysikov, Head of IT Linear Control Department.*

*E-mail: m.g.lysikov@gmail.com*

*Alexey Olshansky, Candidate of Technics, Doctoral Student of Rail Automation, Telemechanics and Communication Department. E-mail: lexolshans@gmail.com*