

УДК 656.2:519.868

Математическая модель организации эксплуатационной работы в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка

Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Мамаев Э. А., Чеботарева Е. А. Математическая модель организации эксплуатационной работы в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 60–74. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-60-74

Аннотация

Цель: Формализация эксплуатационной работы железнодорожного участка для представления в имитационных и цифровых моделях управления в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка. **Методы:** Методической основой исследования является системный подход, при котором объект исследования рассматривается как сложная система, состоящая из взаимодействующих подсистем и элементов. Используются методы динамического и нейросетевого программирования, а также инструментарий для структурного анализа, алгоритмизации и моделирования сложных систем управления. **Результаты:** В исследовании представлены основные сущности, имеющие отношение к организации работы железнодорожного участка, их состояния, алгоритмы взаимного влияния, а также параметры оценки эффективности управления. Выполнена формализация иерархии идентификационных параметров участка железнодорожной сети и объектов, находящихся на ней, для формирования цифрового двойника и нейросетевых процедур управления. Предложен подход к выработке организационно-технологических решений, направленных на эффективное использование пропускных способностей участков и направлений полигона сети с применением технологий цифровых двойников и технологий искусственного интеллекта. **Практическая значимость:** Представлены индикаторы разных уровней организации работы участка железнодорожной сети, состояния объектов транспортной инфраструктуры и поездной ситуации на участке, влияющие на пропускную способность участка. Формализация объектов и процессов железнодорожного транспорта имеет значение для последующих исследований в области технологий искусственного интеллекта, для разработки и внедрения интеллектуальных технологий управления перевозочным процессом. Апробация предложенной модели выполняется на базе учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» с целью отработки опыта использования искусственного интеллекта в задачах управления перевозочным процессом.

Ключевые слова: Железнодорожный участок, пропускная способность, математическая модель, цифровая модель, нейросетевое управление.

Введение

Одним из качественных индикаторов мощности железнодорожного транспорта является показатель пропускной способности [1], определяемый для участков сети. Оценка пропускной

способности железнодорожного участка имеет важное значение для планирования эксплуатационной работы не только для перевозчика, но и для грузоотправителей, которые в качестве основного критерия качества перевозки выдвигают выпол-

нение сроков доставки. Безусловно, железнодорожный перевозчик — ОАО «РЖД» стремится максимально завершить логистический процесс организации перевозки с выполнением договорных обязательств [2].

В то же время следует подчеркнуть, что грузопоток, находящийся в системе железнодорожных перевозок, является в определенном смысле «незавершенным производством». С экономической точки зрения для производственных предприятий увеличение объема незавершенного производства, при прочих равных условиях, является скорее негативным фактом, поскольку увеличивается время оборота. С другой стороны, незавершенное производство — это объем работы, который обеспечивает производительную загрузку объектов транспорта. Такое двойное отношение к грузовой базе железнодорожного транспорта приводит к необходимости выполнения сверхнормативных планов по погрузке, т. е. формированию незавершенного производства для дополнительного грузопотока. Стремление улучшить объемные показатели работы железнодорожного транспорта приводит к завышению рабочего парка вагонов на станции, что снижает их маневренность, требует дополнительных мероприятий по усилению пропускной способности участков и направлений. Данный негативный контекст к выполнению «планов погрузки» ни в коей мере не требует отказа от данного показателя, а подчеркивает необходимость более взвешенного подхода к планам отгрузки с учетом производственной (транспортной) ситуации [3, 4].

Управление железнодорожной инфраструктурой и перевозочным процессом на современном этапе носит характер «управление по состоянию» в силу следующих причин [5–8]:

- используемая инфраструктура и резервы на транспорте не могут быть усилены за короткий промежуток времени в силу их высокой капиталоемкости;

- сезонные и эпизодически проявляющиеся внешние факторы вносят достаточные возмущения в систему планирования и нормирования перевозочного процесса, что предопределяет высокую значимость операционных управленческих решений;

- системообразующий характер железнодорожного транспорта для экономики и отечественной транспортной системы привел сегодня к высокой загрузке основных направлений, а колебания объемов перевозок на этих участках приводят к существенным потерям компании ОАО «РЖД» в виде эксплуатационных расходов, претензионных выплат за просрочки в доставке порожних и грузовых отправок;

- существенные изменения в структуре грузопотоков в направлении к крупным потребителям, морским портам приводят к формированию грузонапряженных участков, требующих высоких компетенций операционного менеджмента (диспетчерского персонала) компании по управлению и регулированию перевозочным процессом.

Эти и другие факторы повышают зависимость эффективности управления от компетенций диспетчерского персонала. Современные концепции перехода к цифровым платформам управления предусматривают создание интеллектуальных помощников диспетчерского аппарата, полностью или частично замещающих определенные функции или операции. В этой области находятся технологии формирования цифровых двойников объектов железнодорожной инфраструктуры и нейросетевых алгоритмов управления перевозочным процессом [9–14].

При всей концептуальной простоте постановки таких задач перевод их в систему управления железнодорожным транспортом представляет большую сложность, связанные с процессами формализации состояния объектов, перехода их из одного состояния в другое, оценки эффективности состояния и (или) решения, их результативности и другими факторами. В исследовании



Рис. 1. Иерархия индикаторов для оценки пропускной способности железнодорожного участка

представлена формализация иерархии идентификационных параметров участка железнодорожной сети и объектов, находящихся на ней для формирования цифрового двойника и нейросетевых процедур управления [15–19].

Постановка задачи

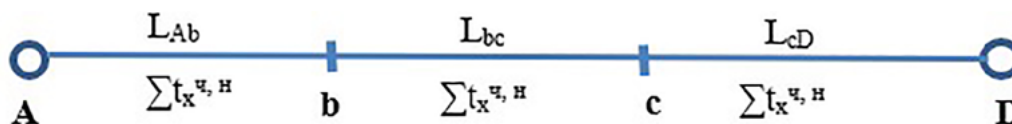
Формализация процедур оценки пропускной способности участка железнодорожной сети опирается на следующие ключевые положения:

- пропускная способность зависит от параметров инфраструктуры и технико-эксплуатационной характеристики железнодорожного участка, активно влияющих на систему организации перевозочного процесса (число главных путей, количество станционных и приемоотправочных путей; вид тяги, серии локомотивов, весовые нормы и длина составов; средства связи по движению поездов, профиль железнодорожного пути и его

элементов; надежность работы устройств и др.). К параметрам инфраструктуры, которые не влияют непосредственно на пропускную способность участка, можно отнести объекты обслуживания подвижного состава, технологические процессы, не связанные с поездной работой (погрузка, выгрузка, отцепочный ремонт, экипировка и др.), а также надежность их функционирования;

- пропускная способность зависит от типа графика и от значений его исходных и расчетных элементов (перегонных времен хода, станционных интервалов и интервалов между поездами), технологии организации движения (применение технологии подталкивания, виртуальной сцепки, организация соединенных поездов и др.);

- пропускная способность зависит от структуры поездопотока (грузовое, пассажирское, пригородное, скоростное), их долей в объеме движения и направлений, парности размеров движения и др.;

Рис. 2. Схема участка $A - D$

– пропускная способность зависит от принятых способов усиления пропускной способности, причем принимается вариант организации поездопотоков с «максимально» возможным графиковым пропуском;

– пропускная способность учитывает необходимость резервирования времени на выполнение технологических операций по текущему содержанию объектов инфраструктуры, а также резерва времени для пропуска поездов специального назначения;

– пропускная способность рассчитывается с учетом перерабатывающих способностей станций, входящих в участок.

Иерархия индикаторов для оценки пропускной способности железнодорожного участка в соответствии с Методикой [1] имеет вид, представленный на рис. 1.

В соответствии с Методикой [1] в общем виде пропускная способность перегона будет определяться по обобщенной формуле:

$$N = \frac{T_{\text{пол}}}{T_{\text{пер}}},$$

где $T_{\text{пол}}$ — «полезное время» в сутках, используемое для движения поездов по участку;

$T_{\text{пер}}$ — период графика.

Под периодом графика понимается время занятия перегона характерной для данного графика группой поездов, периодически чередующихся в течение суток, т. е. пропускная способность обратно пропорциональна периоду графика.

Алгоритм определения пропускной способности на однопутных и двухпутных участках имеет отличия. Так, на однопутном участке определяется максимальный или ограничивающий перегон (имеющей максимальное суммарное время движения поездов с учетом схемы движения (графика), для которого выбирается схема прокладки поездов, обеспечивающая наименьший период графика. Например, для однопутного участка $A - D$ с промежуточными пунктами b, c определение пропускной способности участка производится по ограничивающему перегону, определенному с учетом наибольшего суммарного времени движения пары поездов из всех перегонов ($A - b, b - c, c - D$), рис. 2.

На двухпутном участке пропускная способность будет зависеть от межпоездного интервала и других определенных параметров [1].

Время $T_{\text{пол}}$ определяется с учетом параметров участка, продолжительности «окон», надежности объектов инфраструктуры, табл. 1 [1].

На время пропуска поезда в графике движения влияют еще потери времени, связанные с дополни-

Таблица 1. Параметры железнодорожного участка, влияющие на $T_{\text{пол}}$

Путность участка	Тип тяги	Выполнение плановых работ, $t_{\text{тех}}$	Коэффициент надежности технических средств $\alpha_{\text{н}}$
Однопутный	Электрифицированный	75	0,93
	Неэлектрифицированный		0,92
Однопутный с двухпутными вставками	Электрифицированный	90	0,95
	Неэлектрифицированный		0,94
Двухпутный	Электрифицированный	150	0,94
	Неэлектрифицированный		0,95

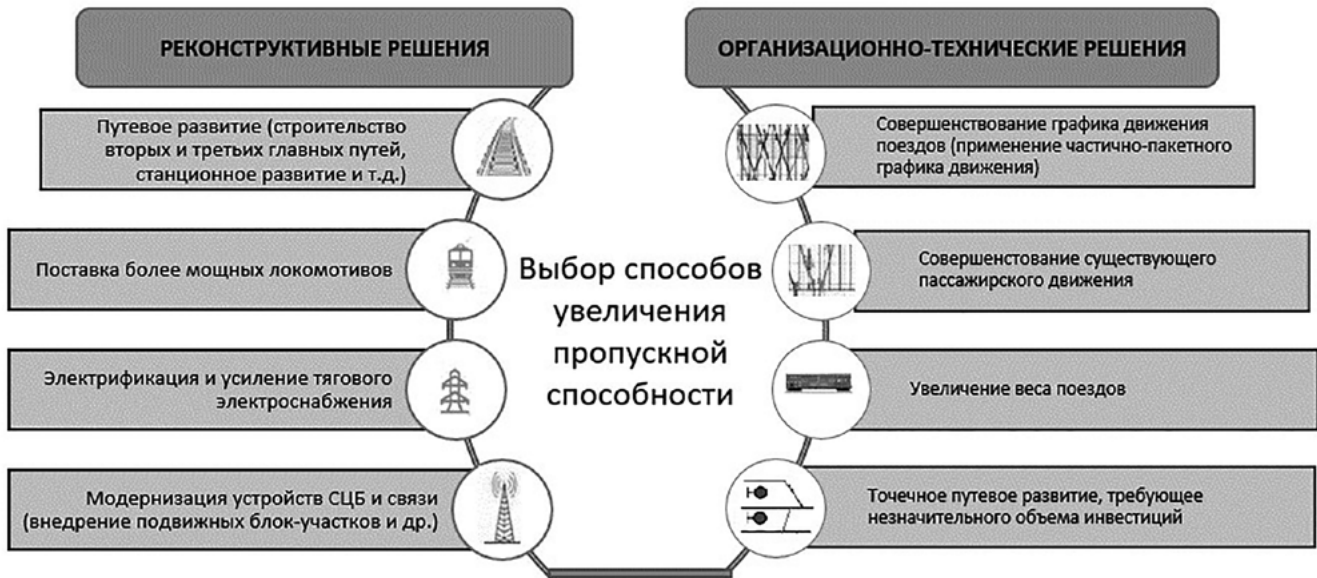


Рис. 3. Способы увеличения пропускной способности участков [20]

тельными операциями, обусловленные требованиями безопасности (станционными интервалами), предусмотренные схемой пропуска поездов.

Эти и другие факторы формируют параметрическое пространство организации движения поездов на участке и станции, которые позволяют рассчитать аналитически параметры пропускной способности участка при условии соблюдения всех регламентов и нормативов, имеющих отношение не только к перевозочному процессу, но и технологии взаимодействия с контрагентами перевозочной компании.

На железных дорогах для усиления пропускной способности направлений применяют реконструктивные и организационно-технические мероприятия (рис. 3). Организационно-технические решения являются основным фактором повышения пропускной способности, не требуют значительных инвестиций. Такие мероприятия могут быть применимы для оперативного повышения пропускной способности до момента реализации проектов по комплексному развитию железнодорожной инфраструктуры, которая требует значительного объема инвестиций и реализации в долгосрочном периоде.

Отметим, что формирование многопараметрической задачи оптимального управления динамическими процессами для оперативного повышения пропускной способности сводятся к поиску локальных оптимальных решений по ускорению пропуска поездопотока по участку за счет управляющего воздействия на параметры пропуска поездопотока, который соответствует принципу оптимальности динамического программирования: оптимальное решение (траектория движения) включает только оптимальные решения каждого этапа или интервала принятия решения (оптимальные траектории между любыми двумя «точками»).

Элементы (сущности) формализованной модели организации движения поездов на железнодорожном участке

Учитывая этот принцип, рассмотрим формализованную модель организации движения поездов на участке без предварительной привязки к индикаторам и параметрам железнодорожного участка, представленную на рис. 1 и в табл. 1.

В организации перевозочного процесса участвуют три стороны:

1. Железнодорожная инфраструктура (ЖИ), на которой обеспечивается движение «поездной группы».

2. Объект управления — «поездная группа» (ПГ), которая находится в состоянии покоя или движения.

3. Руководящее, регулирующее решение в лице «поездного диспетчера» (ДНЦ), который может разрешить/запретить конкретные изменения — переходы системы из одного состояния в другое исходя из набора определенных регулировочных мероприятий ($R_1 \dots R_n$).

Множество состояний элементов «инфраструктуры» участка обозначим множеством:

$$S(t) = \{S_l^{-1}(t), S_l^0(t), S_l^1(t)\},$$

где t — момент времени (наблюдения, управления);

$l = 1, 2, 3, \dots, L$ — элементарные участки (блоки) инфраструктуры, которые влияют на организацию перевозочного процесса;

$S_l^{-1}(t)$ — находится в процессе восстановления в результате отказа технических устройств или иной причины;

$S_l^0(t)$ — находится в состоянии готовности к работе (ожидания);

$S_l^1(t)$ — находится в состоянии активной загрузки (пропуска «поездной группы»).

Множество состояний ПГ на участке обозначим множеством:

$$P(t) = \{P_{l_1 l_2}^1(t, l), P_{l_1 l_2}^0(t, l)\},$$

где $l_1(l_2)$ — начальная (конечная) станция ПГ;

$P_{l_1 l_2}^1(t, l)$ — находится в состоянии движения (изменения состояния) на блоке l ;

$P_{l_1 l_2}^0(t, l)$ — находится в состоянии ожидания команды и (или) изменения состояния в смежном участке.

Модель активного управления поездной работой на участке задается множеством решений «диспетчера»:

$$D(t) = \{D_l(t), D_{l_1 l_2}(t), d_{l_1 l_2}(t)\},$$

где $D_l(t)$ — переключатель состояния блока участка в режиме включено/выключено;

$D_{l_1 l_2}(t)$ — переключатель состояния «поездной группы» в режиме включено/выключено;

$d_{l_1 l_2}(t)$ — переключатель «скорости» изменения состояния «поездной группы» (изменение времени запаздывания смены состояний «поездной группы»).

«Генерация ПГ» может происходить по заданному графику поездообразования на границах участка, а именно:

– для каждой станции (участка) $a \in [1, L]$ и момента времени определены $P_{a,j}^1(t, a)$ — поезд, отправляемый со станции (блока) a назначением на станцию (блок) j в соответствии с утвержденным графиком движения.

Совокупность решений по генерации поездных групп обозначим $\xi(t)$.

Динамическая поездная модель на железнодорожном участке описывается множествами

$$\{S(t), P(t), D(t), \xi(t)\}.$$

Все параметры принимают значения 0 (свободен, в ожидании) или 1 (занят, в работе) в зависимости от состояния объекта или процесса.

Цель моделирования — оценить (достичь) максимальную пропускную способность участка железной дороги для реализации формируемых поездопотоков $\xi(t)$ на основе выбора управленческих решений $D(t)$, для реализации поездопотоков $P(t)$ с использованием возможностей (состояний) объектов инфраструктуры $S(t)$.

Указанные элементы (сущности) формализованной модели организации движения поездов на участке сведем в табл. 2.

Формализованная модель управления перевозочным процессом

Изменение состояний сущностей за единицу тактового времени Δt определяет регламентированный перевозочный процесс. Моменты

Таблица 2. Элементы (сущности) формализованной модели организации движения поездов на участке

Представление	Состояния	Описание состояния	Множество состояний
Железнодорожная инфраструктура (ЖИ)			
Последовательные блоки (участки) $l = 1, 2, \dots, L$	$S_l^{-1}(t)$	Находится в процессе восстановления в результате отказа технических устройств или иной причины	$S(t) = \left\{ \begin{matrix} S_l^{-1}(t), S_l^0(t), \\ S_l^1(t) \end{matrix} \right\}$
	$S_l^0(t)$	Находится в состоянии готовности к работе (ожидания)	
	$S_l^1(t)$	Находится в состоянии активной загрузки (пропуска «поездной группы»)	
«Поездная группа» (ПГ)			
Поезд, локомотив с совокупностью признаков (вес, длина, категория и др.)	$P_{l/l_2}^1(t, l)$	Находится в состоянии движения (изменения состояния) на блоке l	$P(t) = \left\{ \begin{matrix} P_{l/l_2}^1(t, l), \\ P_{l/l_2}^0(t, l) \end{matrix} \right\}$
	$P_{l/l_2}^0(t, l)$	Находится в состоянии ожидания команды и (или) изменения состояния на данном или смежном участке	
«Поездной диспетчер» (ДНЦ)			
ДНЦ данного или смежного участка	$D_l(t)$	Ввод состояния «инфраструктуры» в режим включено/выключено	$D(t) = \left\{ \begin{matrix} D_l(t), \\ D_{l/l_2}(t), d_{l/l_2}(t) \end{matrix} \right\}$
	$D_{l/l_2}(t)$	Ввод состояния «поездной группы» в режим остановка/движение	
	$d_{l/l_2}(t)$	Корректировка «скорости» изменения состояния «поездной группы» в соответствии с принятым регулировочным мероприятием ($R_1 \dots R_n$)	

времени, в которых может происходить смена состояний, определим через t_i , $i = 0, 1, 2, \dots, I$ для периода планирования $[0; T]$, где $T = \Delta t I$. Смена состояний сущностей может определяться следующими соотношениями.

Состояния «инфраструктуры». Участок открывается для работы после «переключения» его «диспетчером», т. е.

$$S_l^{-1}(t_i) = 1 - S_l^{-1}(t_{i-1})D_i(t_i). \quad (1)$$

В общем виде с позиций динамического программирования (без учета конкретных средств связи по движению поездов) участок (элемент участка) остается в состоянии ожидания работы, если не было ПГ в предшествующем участке (элементе) или при нахождении в предшествующем участке (элементе) «диспетчер» не открыл движения, т. е.

$$S_l^0(t_i) = (1 - P_{l/l_2}^{-1}(t_{i-1}, l-1))D_{l/l_2}(t_i) + P_{l/l_2}^0(t_{i-1}, l-1)(1 - D_{l/l_2}(t_i)). \quad (2)$$

На предшествующем участке находится ПГ, и «диспетчер» не остановил движение или ожидающему движению на предыдущем участке поезду «диспетчер» разрешил движение, т. е.

$$S_l^1(t_i) = P_{l/l_2}^1(t_{i-1}, l-1)(1 - D_{l/l_2}(t_i)) + P_{l/l_2}^0(t_{i-1}, l-1)D_{l/l_2}(t_i). \quad (3)$$

Состояния ПГ. ПГ находится в состоянии движения, если следующий участок свободен, не было «команды» диспетчера на ее остановку и следующий участок «свободен», т. е.

$$P_{l/l_2}^1(t_i, l) = P_{l/l_2}^1(t_{i-1}, l-1) \times (1 - D_{l/l_2}(t_i))(1 - S_l^0(t_i)). \quad (4)$$

ПГ находится в состоянии ожидания движения, если следующий участок свободен, не было «команды» диспетчера на ее движение или следующая по участку *ПГ* была остановлена «диспетчером», т. е.

$$P_{l_1 l_2}^0(t_i, l) = P_{l_1 l_2}^0(t_i, l-1)(1 - D_{l_1 l_2}(t_i)) + P_{l_1 l_2}^0(t_i, l-1)D_{l_1 l_2}(t_i). \quad (5)$$

Состояния «инфраструктуры» и «устройств». Известно, что действия диспетчера связаны с анализом поездной ситуации, состояния инфраструктуры и железнодорожных устройств на соответствующих «участках» и «поездных группах». Диспетчер изменит характер движения, если обнаруживается определенный «отказ», приводящий к технологическому нарушению в организации движения поездов.

Рассмотрим поток отказов такого рода как случайные параметры внешних воздействий на движение:

$$f_l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{на участке } l \text{ возник отказ;} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{l_1 l_2}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{в } ПГ(l_1 l_2) \text{ возник отказ;} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (7)$$

Процесс восстановления после отказа инфраструктуры и *ПГ* будем считать случайным. Определим для инфраструктуры:

$$h_l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{устранен отказ на } l; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (8)$$

Аналогичная функция для *ПГ* имеет вид:

$$h_{l_1 l_2}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{устранен отказ в } ПГ(l_1 l_2); \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (9)$$

Не останавливаясь на вероятностных характеристиках случайных процессов возникновения отказов и их восстановления, перейдем к решениям диспетчера по управлению движением на участке. Изменение состояния инфраструктуры (участка) при отказе по команде диспетчера, т. е.

$$D_l(t_i) = (1 - f_l(t_i)). \quad (10)$$

Изменение состояния *ПГ* при отказе по команде диспетчера, т. е.

$$D_{l_1 l_2}(t) = (1 - f_{l_1 l_2}(t)). \quad (11)$$

Изменение состояния инфраструктуры (участка) при восстановлении его работоспособности по команде диспетчера:

$$D_l(t) = h_l(t). \quad (12)$$

Изменение состояния *ПГ* при восстановлении его работоспособности по команде диспетчера:

$$D_{l_1 l_2}(t) = h_{l_1 l_2}(t). \quad (13)$$

Для каждой *ПГ* определена $k_{l_1 l_2}$ (длина *ПГ* в участках). Для каждой *ПГ* существует $b_{l_1 l_2}$ такой, что

$$\prod_{b=b_{l_1 l_2}}^{b_{l_1 l_2} + k_{l_1 l_2}} P_{l_1 l_2}^1(t_i, b) = 1, \quad (14)$$

для любого $t_i \in [0; T]$

и

$$P_{l_1 l_2}^1(t_i, b) = 0, \text{ для } b \notin [b_{l_1 l_2}; b_{l_1 l_2} + k_{l_1 l_2}]. \quad (15)$$

Условия (14)–(15) определяют непрерывность *ПГ*.

Решения по обеспечению непрерывности $ПП$ достигаются проверкой изменений на каждом временном интервале Δt . Если изменения не нарушают условий (1)–(15), то соответствующие изменения состояния инфраструктуры и $ПП$ могут реализовываться, т. е. изменения состояния подтверждаются.

Цифровая модель и нейросетевое управление

Формализованное представление сложных систем является базисом для построения имитационных, цифровых моделей с целью повышения эффективности управления ими. В вышеприведенной формализации железнодорожного участка цифровая модель представляется вышеприведенными множествами $\{S(t), P(t), D(t), \xi(t)\}$ состояний сущностей и переходов между ними во времени по регламентированным правилам. Модель состояния объекта управления представляется множествами $\{S(t), P(t)\}$ и соотношениями (1)–(5). Модель управления — $\{S(t), P(t), D(t), \xi(t)\}$ и соотношения (1)–(15).

Для нейросетевого программирования ключевыми элементами являются эталонные состояния динамически изменяющегося объекта — поездная ситуация на участке. В рамках представленной формализации модели железнодорожного участка следует указать «нормативные» интервалы изменения параметров поездной работы.

Процесс нейросетевого управления будет заключаться в выработке последовательности действий (решений) диспетчера по «улучшению» параметров поездной работы, которые могут двух видов:

1. Приведение параметров работы участка к экономически эффективному, т. е. выполнение нормативных эксплуатационных параметров работы участка. При этом объем выполненной работы не может достигать наибольшего значения в ущерб качеству «движения».

2. Обеспечение пропуска по участку максимального числа $ПП$ за единицу времени. При этом достигается максимальная «заполняемость» участка $ПП$, которая снижает показатели качества эксплуатационной работы. Снижение показателей эксплуатационной работы участка — увеличение эксплуатационных расходов является, вообще говоря, негативным решением.

Вопросы, связанные со сложными схемами организации движения $ПП$ на участке, также решаются заданием определенных правил изменения состояний, установленных в модели блоков и генерированными $ПП$, по сути, линеаризацией участков на всем протяжении маршрута следования $ПП$.

Существенным для дальнейших исследований остаются вопросы отказов устройств инфраструктуры и $ПП$, которые должны иметь расчлененный по типам отказов и восстановления характер, а также вопросы, связанные с организационно-технологической надежностью (ОН) элементов модели.

В качестве базы для проведения экспериментальных исследований предложено использование разработанной в Ростовском государственном университете путей сообщения цифровой модели участка железной дороги Высочино — Тимашевская в рамках действующего учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога». Предлагается архитектура системы управления железнодорожным участком, функциональная схема которой изображена на рис. 4.

Система управления имеет в своем составе детерминированные логические блоки, предназначенные для подготовки данных для искусственной нейронной сети (ИНС) — логический блок формирования признаков, а также для формирования команд на основании принятого ИНС решения.

Формирование многопараметрической задачи оптимального управления динамиче-

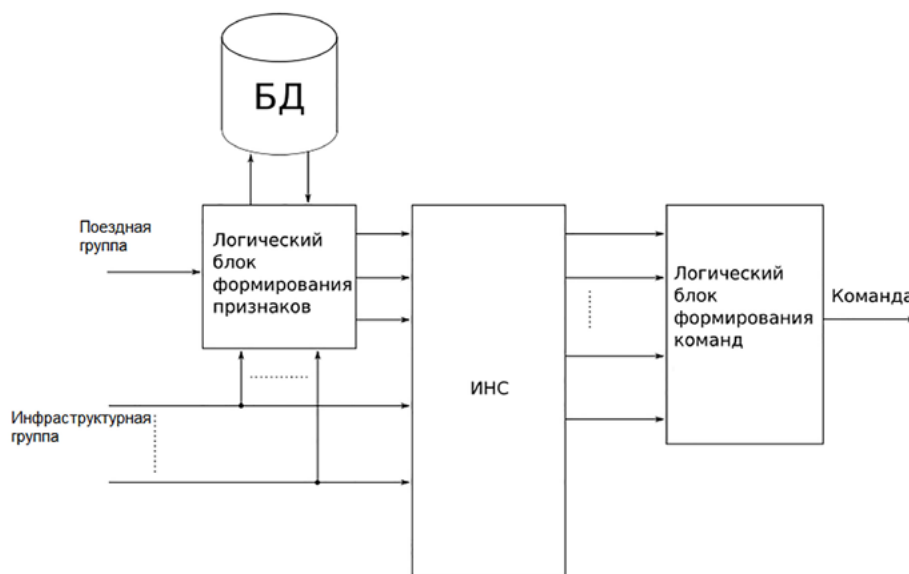


Рис. 4. Функциональная схема системы нейросетевого управления железнодорожным участком в режиме приема/пропуска поездов

скими процессами для оперативного повышения пропускной способности сводится к поиску локальных оптимальных решений по ускорению пропуска поездопотока по участку за счет управляющего воздействия на параметры пропуска поездопотока. Критичными в представленной формализованной модели остаются вопросы «привязки» сущностей к конкретному участку железной дороги, определения «особых» правил изменения состояний сущностей в зависимости от параметров эксплуатационной работы, приведенных в [1], определения критериев оценки («эталонных») состояний железнодорожного участка с позиций цифрового («нейросетевого») управления, а также допустимого множества управленческих решений со стороны «диспетчера». Эти и другие особенности формализации модели железнодорожного участка требуют конкретики в выборе участка и его характеристик.

Выводы

Разработка и интеграция технологий искусственного интеллекта становится одним из ключевых факторов развития в целом отраслей

и индустрий отечественной экономики. Отрасль железнодорожного транспорта и логистики является особенно значимой, так как она связана практически со всеми другими отраслями экономики. Железнодорожный транспорт обеспечивает лучшие возможности с точки зрения качества, стоимости, эффективности и безопасности по сравнению с другими видами транспорта. Поэтому внедрение эффективных решений на железнодорожном транспорте и в логистике может дать мультипликативный эффект для всей экономики в целом. Однако любые проекты по развитию технологий искусственного интеллекта непросто встраиваются в традиционные процессы и проекты цифровой трансформации, в том числе из-за сложности формализации процессов управления, в силу специфики их развития и использования. Данное исследование направлено на формализацию работы железнодорожного участка для представления в имитационных и цифровых моделях управления в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка. Предложен подход к выработке организационно-технологических решений, направленных на эффективное заполнение пропускных способностей

участков и направлений полигона сети с использованием технологий цифровых двойников и технологий искусственного интеллекта.

Список источников

1. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования. — Утверждена приказом Минтранса России от 18 июля 2018 года № 266.

2. Мамаев Э. А. Логистика и транспорт в цифровой экономике / Э. А. Мамаев // Сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление». — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2018. — С. 8–12.

3. Багинова В. В. Цифровые технологии транспортного холдинга / В. В. Багинова, Б. А. Левин, Э. А. Мамаев // Логистика и управление цепями поставок. — 2021. — № 6(105). — С. 16–19.

4. Мамаев Э. А. Модели согласованного развития элементов логистических цепей / Э. А. Мамаев // Сб.: науч. Трудов «Современное развитие науки и техники» («Наука-2017»). — Т. 2. Технические, экономические и юридические науки. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2017. — С. 160–162.

5. Мамаев Э. А. Цифровая логистика в смешанных перевозках в международном сообщении / Э. А. Мамаев // Сб. науч. тр. III междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике». — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения. — 2019. — С. 243–248.

6. Белых А. А. Оценка влияния искусственного интеллекта на оперативное управление участковой железнодорожной станции / А. А. Белых, В. В. Широкова // Национальная Ассоциация Ученых. — 2020. — № 56-1(56). — С. 36–41. — DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.56.229.

7. Мамаев Э. А. Цифровизация транспортного бизнеса и развитие логистического сервиса для транспортного

холдинга с применением технологии BIGDATA / Э. А. Мамаев, М. В. Колесников // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021): материалы XIV мультиконференции (Дивноморское, Геленджик, 27 сентября — 2 октября 2021 г.): в 4 т. Южный федеральный университет [редкол.: И. А. Каляев, В. Г. Пешехонов и др.]. — Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета. — 2021. — Т. 4. — С. 134–136.

8. Кузнецов В. Г. Формирование интегрированной технологии организации вагонопотоков и движения грузовых поездов в цифровой модели железной дороги / В. Г. Кузнецов, Е. А. Федоров, В. Г. Козлов // Интеллектуальные транспортные системы: мат-лы Междунар. научно-практ. конф. — М., 2022. — С. 204–214.

9. Рахмангулов А. Н. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных станций / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурин, Д. В. Александрин // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды междунар. научно-практ. конф., посвященной 125-летию университета. — М., 2021. — С. 574–582. — DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.76.

10. Москвичева Е. Е. К вопросу практической реализации цифровизации грузовых станций / Е. Е. Москвичева // Наука и образование транспорту. — 2022. — № 1. — С. 159–161.

11. Шабельников А. Н. Перспективы совершенствования КСАУ СП в рамках концепции цифровой железнодорожной станции / А. Н. Шабельников, Н. Н. Лябах // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018). Труды седьмой научно-технической конф. — 2018. — С. 117–119.

12. Шилин А. О. Внедрение КСАУ СП в рамках концепции цифровой железнодорожной станции / А. О. Шилин // Вопросы науки. — 2022. — № 3. — С. 73–77.

13. Козлов П. А. О технологии расчета железнодорожных станций / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, А. О. Шмидт // Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом: мат-лы Междунар. юбилейной научно-технической конф.,

посвященной 95-летию кафедр «Железнодорожные станции и транспортные узлы», «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте». — М., 2020. — С. 41–47.

14. Чеботарева Е. А. Моделирование элементов профессиональной интуиции в человеко-машинных системах для решения задач оперативного управления железнодорожным транспортом / Е. А. Чеботарева // Мир транспорта и технологических машин. — 2023. — № 3-4(82). — С. 61–69. — DOI: 10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-61-69.

15. Шевченко Д. В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д. В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2021. — Т. 80. — № 2. — С. 91–99. — DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

16. Лычкина Н. Н. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. — Казань, 2023. — С. 139–149.

17. Куртикова Э. Р. Применение нейронных сетей для классификации железнодорожных станций / Э. Р. Куртикова, Д. А. Шевченко, В. А. Карзаков // В сборнике: Кочневские чтения — 2023: современная теория

и практика эксплуатационной работы железных дорог. Труды II-й Междунар. научно-практ. конф. М., 2023. — С. 359–362.

18. Мишкuroв П. Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции / П. Н. Мишкuroв, А. Н. Рахмангулов // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2021. — Т. 11. — № 1. — С. 29–40. — DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40.

19. Ерофеев А. А. Технологии искусственного интеллекта при решении эксплуатационных задач в системе сменно-учетного планирования грузовой работы железнодорожных станций / А. А. Ерофеев // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. — 2022. — № 1(4). — С. 102–108.

20. Чеботарева Е. А. Анализ мероприятий по повышению пропускной способности участков Северо-Кавказской железной дороги / Е. А. Чеботарева. // Транспорт: наука, техника, управление. — 2022. — № 1. — С. 29–34. — DOI: 10.36535/0236-1914-2022-01-5.

Дата поступления: 20.10.2024

Решение о публикации: 05.12.2024

Контактная информация:

МАМАЕВ Энвер Агапашаевич — д-р техн. наук, проф.; mamaev_enver@mail.ru

ЧЕБОТАРЕВА Евгения Андреевна — канд. техн. наук, доц.; abrosimova@yandex.ru

Mathematical Model of the Railway Operation Optimization to Increase a Railway Section Capacity

E. A. Mamaev, E. A. Chebotareva

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Mamaev E. A., Chebotareva E. A. Mathematical Model of the Railway Operation Optimization to Increase a Railway Section Capacity // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 60–74. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-60-74

Summary

Purpose: Formalization of a railway section operation for simulation and digital operation models to improve a railway section capacity. **Methods:** The methodological basis of the research is a system approach in which the research object is considered as a complex system consisting of interacting subsystems and elements. Dynamic and neural network programming methods as well as tools for structural analysis, algorithmization and modeling of complex control systems are used. **Results:** The study presents the main entities related to the management of the railway section operation, their conditions, algorithms of mutual influence, as well as parameters for evaluating the management effectiveness. The formalization of the identification parameter hierarchy of a railway section and its infrastructure to create a digital double and neural network control procedures has been carried out. An approach to the development of operational and technological solutions aimed at the effective use of railway section capacities and network routes using digital doubles and artificial intelligence technologies is proposed. **Practical significance:** Indicators of different levels of railway section management, transport infrastructure and train operation on the section affecting the rail capacity are presented. Formalization of railway transport objects and processes will be important for further research in the field of artificial intelligence technologies as well as for the development and implementation of intelligent technologies in transportation management. Approbation of the proposed model has been carried out based on the ‘Virtual railway’ training laboratory complex in order to improve practical skills in applying artificial intelligence in the transportation management.

Keywords: Railway section, throughput, mathematical model, digital model, neural network control.

References

1. *Metodika opredeleniya propusknoy i provoznoy sposobnostey infrastruktury zhelezнодорожного транспорта obshchego pol'zovaniya. Uтверждена приказом Минтранса России от 18 июля 2018 года № 266* [Methodology for determining the throughput and carrying capacity of public rail transport infrastructure. Approved by the order of the Ministry of Transport of Russia dated July 18, 2018 № 266]. (In Russian)
2. Mamaev E. A. Logistika i transport v tsifrovoy ekonomike [Logistics and transport in the digital economy]. *Sb. nauch. tr. II mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Transport i logistika: innovatsionnaya infrastruktura, intellektual'nye i resursosberegayushchie tekhnologii, ekonomika i upravlenie"* [Coll. sci. t. of the II int. scientific-practical. conf. "Transport and logistics: innovative infrastructure, intelligent and resource-saving technologies, economics and management"]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2018, pp. 8–12. (In Russian)
3. Baginova V. V., Levin B. A., Mamaev E. A. Tsifrovye tekhnologii transportnogo kholdinga [Digital technologies of the transport holding]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. 2021, Iss. 6(105), pp. 16–19. (In Russian)
4. Mamaev E. A. Modeli soglasovannogo razvitiya elementov logisticheskikh tsepy [Models of coordinated development of elements of logistics chains]. *Sb.: nauch. Trudov "Sovremennoe razvitie nauki i tekhniki" ("Nauka-2017"). T. 2. Tekhnicheskie, ekonomicheskie i yuridicheskie nauki Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya* [Coll.: scientific. Works "Modern development of science and technology ("Science-2017"). Vol. 2. Technical, economic and legal sciences]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2017, pp. 160–162. (In Russian)
5. Mamaev E. A. Tsifrovaya logistika v smeshannykh perevozkakh v mezhdunarodnom soobshchenii [Digital logistics in multimodal transportation in international traffic]. *Sb. nauch. tr. III mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Transport i logistika: strategicheskie priority, tekhnologicheskies platformy i resheniya v globalizovannoy tsifrovoy ekonomike"* [Coll. of scientific. works of the III international. scientific and practical. conf. "Transport and logistics: strategic priorities, technological platforms and solutions in the

globalized digital economy”]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2019, pp. 243–248. (In Russian)

6. Belykh A. A., Shirokova V. V. Otsenka vliyaniya iskusstvennogo intellekta na operativnoe upravlenie uchastkovoy zhelezнодороzhnoy stantsii [Assessment of the impact of artificial intelligence on the operational management of a district railway station]. *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists]. 2020, Iss. 56-1 (56), pp. 36–41. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.56.229. (In Russian)

7. Mamaev E. A., Kolesnikov M. V. Tsifrovizatsiya transportnogo biznesa i razvitie logisticheskogo servisa dlya transportnogo kholdinga s primeneniem tekhnologii BIGDATA [Digitalization of the transport business and development of logistics services for a transport holding using BIGDATA technology]. *XIV Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2021): materialy XIV mul'tikonferentsii (Divnomorskoe, Gelendzhik, 27 sentyabrya — 2 oktyabrya 2021 g.): v 4 t. Yuzhnyy federal'nyy universitet (redkol.: I. A. Kalyaev, V. G. Peshekhonov i dr.)* [XIV All-Russian Multi-Conference on Management Problems (MKPU-2021): Proceedings of the XIV Multi-Conference (Divnomorskoye, Gelendzhik, September 27 — October 2, 2021): in 4 volumes. Southern Federal University (editorial board: I. A. Kalyaev, V. G. Peshekhonov et al.)]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta Publ., 2021, vol. 4, pp. 134–136. (In Russian)

8. Kuznetsov V. G., Fedorov E. A., Kozlov V. G. Formirovanie integrirovannoy tekhnologii organizatsii vagonopotokov i dvizheniya gruzovykh poezdov v tsifrovoy modeli zheleznoy dorogi [Formation of an integrated technology for organizing car flows and freight train traffic in a digital railway model]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: matly Mezhdunar. nauchno-prakt. konf.* [Intelligent transport systems: proc. Int. scientific-practical. conf.]. Moscow, 2022, pp. 204–214. (In Russian)

9. Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N., Alexandrin D. V. Imitatsionnye modeli v tsifrovyykh dvoynikakh zhelezнодороzhnykh stantsiy [Simulation models in digital twins of railway stations]. *Akademik Vladimir Nikolaevich*

Obraztsov — osnovopolozhnik transportnoy nauki: trudy mezhdunar. nauchno-prakt. konf., posvyashchennoy 125-letiyu universiteta [Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov — the founder of transport science: proc. Int. scientific-practical. conf., dedicated to the 125th anniversary of the university]. Moscow, 2021, pp. 574–582. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.76. (In Russian)

10. Moskvicheva E. E. K voprosu prakticheskoy realizatsii tsifrovizatsii gruzovykh stantsiy [On the issue of practical implementation of digitalization of freight stations]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education in transport]. 2022, Iss. 1, pp. 159–161. (In Russian)

11. Shabelnikov A. N., Lyabakh N. N. Perspektivy sovershenstvovaniya KSAU SP v ramkakh kontseptsii tsifrovoy zhelezнодороzhnoy stantsii [Prospects for improving the KSAU SP within the framework of the concept of a digital railway station]. *Intellektual'nye sistemy upravleniya na zhelezнодороzhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2018). Trudy sed'moy nauchno-tekhnicheskoy konf.* [Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2018). Proceedings of the seventh scientific and technical conf.]. 2018, pp. 117–119. (In Russian)

12. Shilin A. O. Vnedrenie KSAU SP v ramkakh kontseptsii tsifrovoy zhelezнодороzhnoy stantsii [Implementation of the DSAU SP within the framework of the concept of a digital railway station]. *Voprosy nauki* [Questions of Science]. 2022, Iss. 3, pp. 73–77. (In Russian)

13. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Schmidt A. O. O tekhnologii rascheta zhelezнодороzhnykh stantsiy [On the technology of calculating railway stations]. *Tendentsii razvitiya zhelezнодороzhnogo transporta i upravleniya perevozochnym protsessom: matly Mezhdunar. yubileynoy nauchno-tekhnicheskoy konf., posvyashchennoy 95-letiyu kafedr “Zhelezнодороzhnye stantsii i transportnye uzly”, “Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy i bezopasnost'yu na transporte”* [Trends in the development of railway transport and transportation process management: materials of the International. jubilee scientific and technical conf. dedicated to the 95th anniversary of the departments “Railway Stations

and Transport Hubs”, “Management of Operational Work and Safety in Transport”]. Moscow, 2020, pp. 41–47. (In Russian)

14. Chebotareva E. A. Modelirovanie elementov professional'noy intuitsii v cheloveko-mashinnykh sistemakh dlya resheniya zadach operativnogo upravleniya zheleznodorozhnym transportom [Modeling elements of professional intuition in human-machine systems for solving problems of operational management of railway transport]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [The world of transport and technological machines]. 2023, Iss. 3-4 (82), pp. 61–69. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-61-69. (In Russian)

15. Shevchenko D. V. Metodologiya postroeniya tsifrovyykh dvoynikov na zheleznodorozhnom transporte [Methodology for constructing digital twins in railway transport]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport]. 2021, vol. 80, Iss. 2, pp. 91–99. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99. (In Russian)

16. Lychkina N. N., Pavlov V. V. Kontsepsiya tsifrovogo dvoynika i rol' imitatsionnykh modeley v arkhitekture tsifrovogo dvoynika [The concept of a digital twin and the role of simulation models in the architecture of a digital twin]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2023): sbornik trudov odinnadsatoy vserossiyskoy nauchno-prakt. konf. po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti* [Simulation modeling. Theory and practice (IMMOD-2023): collection of works of the eleventh all-Russian scientific and practical. conf. on simulation modeling and its application in science and industry]. Kazan, 2023, pp 139–149. (In Russian)

17. Kurtikova E. R., Shevchenko D. A., Karzakov V. A. Primenenie neyronnykh setey dlya klassifikatsii zheleznodorozhnykh stantsiy [Application of neural networks for classification of railway stations]. *V sbornike: Kochnevskie chteniya — 2023: sovremennaya teoriya i praktika ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog. Trudy II-y Mezhdunar. nauchno-prakt. konf.* [In the collection:

Kochnevsky readings — 2023: modern theory and practice of operational work of railways. Proceedings of the II-nd Int. scientific-practical. conf.]. M., 2023, pp. 359–362. (In Russian)

18. Mishkurov P. N., Rakhmangulov A. N. Osobennosti postroeniya agentnoy imitatsionnoy modeli zheleznodorozhnoy stantsii [Features of constructing an agent-based simulation model of a railway station]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of the transport complex of Russia]. 2021, vol. 11, Iss. 1, pp. 29–40. DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40. (In Russian)

19. Erofeev A. A. Ekhnologii iskusstvennogo intellekta pri reshenii ekspluatatsionnykh zadach v sisteme smenno-uchetnogo planirovaniya gruzovoy raboty zheleznodorozhnykh stantsiy [Artificial intelligence technologies in solving operational problems in the system of shift-accounting planning of freight operations at railway stations]. *Problemy perspektivnogo razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov* [Problems of prospective development of railway stations and junctions]. 2022, Iss. 1 (4), pp. 102–108. (In Russian)

20. Chebotareva E. A. Analiz meropriyatiy po povysheniyu propusknoy sposobnosti uchastkov Severo-Kavkazskoy zheleznoy dorogi [Analysis of measures to increase the throughput capacity of sections of the North Caucasian Railway]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. 2022, Iss. 1, pp. 29–34. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-01-5. (In Russian)

Received: October 20, 2024

Accepted: December 05, 2024

Author's information:

Enver A. MAMAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; mamaev_enver@mail.ru

Evgenia A. CHEBOTAREVA — PhD in Engineering, Associate Professor; abrosimova@yandex.ru