УДК 681.516.52

Л. А. Баранов, докт. техн. наук
В. Г. Сидоренко, докт. техн. наук
Л. Н. Логинова, канд. техн. наук

*Кафедра «Управление и защита информации»,
Российский университет транспорта, Москва*

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В РАМКАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ РЕЛЬСОВЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

Появление большого числа транспортных пересадочных узлов, изменение конфигурации транспортной системы мегаполиса приводит к увеличению и изменению пассажиропотоков, использующих рельсовый транспорт, что влияет на его функционирование и требует учета при создании и организации работы интеллектуальной системы управления городскими рельсовыми транспортными системами. Анализ опыта исследования пассажиропотоков позволит создать новые алгоритмы прогнозирования пассажиропотоков с использованием современных технологий агентного моделирования и технического зрения. В статье рассмотрена модель стоянки транспортных средств, позволяющая учесть факторы, влияющие на длительность стоянки: пассажиропоток, время незанятости платформы, количество перевозимых пассажиров, количество вагонов в составе поезда. В статье разработаны структурная и математическая модели пассажиропотоков транспортно-пересадочного узла, предназначенные для исследования динамики интеллектуальной системы управления городскими рельсовыми транспортными системами. В качестве примера при построении математической модели рассмотрено взаимодействие пассажиропотоков транспортно-пересадочного узла «Дмитровская», в котором присутствует пересечение пассажиропотоков трех городских рельсовых транспортных систем: трамвайной оборотной станции, станции «Дмитровская», которая относится к Рижскому направлению Московской железной дороги и является остановочным пунктом линии МЦД-2 Московских центральных диаметров, станции «Дмитровская» Московского метрополитена.

Интеллектуальная система, управление транспортными системами, рельсовый транспорт, моделирование, модель стоянки, пассажиропоток, транспортно-пересадочный узел, матрица корреспонденций, агентное моделирование, техническое зрение

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-539-564

Введение

В связи с увеличением численности населения крупных городов и, как следствие, с расширением сети метрополитена и городского железнодорожного

транспорта исследование взаимодействия городских рельсовых транспортных систем (ГРТС) в части синхронизации организации перевозки пассажиров (согласования парности движения, внесения корректив в оперативный график движения поездов в случае возникновения нештатных ситуаций и др.) является актуальной задачей. К ГРТС относятся участки пригородного железнодорожного транспорта в черте городов (например, Московские центральные диаметры (МЦД) и Московское центральное кольцо (МЦК)), линии метрополитена, монорельса и трамвая.

Основой интеллектуальной системы управления (ИСУ) ГРТС [1], которая предназначена для повышения качества обслуживания пассажиров и безопасности движения транспортных средств (ТС), являются алгоритмы централизованного управления движением рельсового транспорта. Для исследования алгоритмов управления целесообразно использовать модели прогнозирования заполненности транспортных узлов. Они позволяют планировать управляющие воздействия для снижения влияния возмущений (задержек ТС пассажирами или по техническим причинам, приводящих к нарушению графика движения) при внедрении систем автоведения.

Целями управления в этом случае становятся минимизация рассогласования между плановым и исполненным графиками движения, уменьшение числа остановок ТС между остановочными пунктами из-за ограничений для команд системы обеспечения безопасности движения (СОБД), уменьшение расхода электроэнергии за счет реализации энергооптимальных режимов управления.

Для автоматического задания времен хода ТС и моментов отправления их из остановочных пунктов центр управления движением ТС ГРТС использует следующие данные, получаемые в результате работы этих моделей: прогноз величины отклонения от плановой длительности стоянки ТС в следующем остановочном пункте до того момента, как оно прибыло в него; прогноз величины отклонения времени хода ТС от заданного до момента окончания движения [2].

При детализации задач управления ГРТС можно выделить несколько контуров управления, объединяющих выявленные процессы развития, планирования, управления и сбора информации (рис. 1). Именно эти процессы подлежат автоматизации в рамках ИСУ ГРТС. Решение задач анализа пассажиропотоков входят в состав процессов изучения спроса на услуги ГРТС (процесс p_{d1}), управления сбором доходов (процесс p_{c6}) и планирования движения транспортных средств ГРТС (процесс p_{c1}). Традиционные для централизованных автоматизированных систем управления движением функции реализуются в рамках ИСУ ГРТС при автоматизации процесса управления движением отдельных транспортных средств (процесс p_{m4}), который осуществляется на основе команд управления, формируемых на выходе процесса исполнения графика движения ГРТС (процесс p_{m1}).

1. Состояние вопроса

В рамках ИСУ ГРТС используется модель стоянки ТС, которая позволяет учесть по возможности максимальное количество факторов, влияющих на время стоянки. К таким факторам относятся пассажиропоток, время незанятости платформы, количество перевозимых пассажиров, количество вагонов в составе поезда. В работе [3] рассмотрена модель стоянки на примере метрополитена, который является одним из основных видов ГРТС.

Как правило, время стоянки поезда на j -й станции T_{cj} складывается из времени выхода пассажиров из поезда T_{ej} , времени посадки пассажиров в поезд T_{nj} , времени задержки отправления T_{zoj} (времени, прошедшего с момента формирования команды на закрытие дверей до момента включения тяговых двигателей подвижного состава, включая потери на открытие и закрытие дверей), случайной величины T_{clj} , зависящей от недисциплинированных пассажиров, которые совершают посадку или высадку в момент закрытия дверей и т. д, и отклонения длительности стоянки в результате действия СОВД $T_{cбj}$:

$$T_{cj} = T_{ej} + T_{nj} + T_{zoj} + T_{clj} + T_{cбj} . \quad (1)$$

В работе [3] предложена гипотеза о существовании корреляционной зависимости между величинами $T_{cj}, T_{ej}, T_{nj}, T_{zoj}$ и временем незанятости платформы поездом $T_{нпj}$, в течение которого происходит скопление пассажиров на платформе.

Для получения наиболее достоверной информации о закономерностях высадки и посадки пассажиров в зависимости от конструктивных особенностей станций был собран статистический материал, разделенный на две группы [3]. К первой относились статистические данные, полученные на станциях, где отсутствуют эскалаторы, так называемые станции мелкого заложения; ко второй — данные о станциях глубокого заложения. Каждая из групп была поделена на две подгруппы. К первой относились данные со станций с незначительным пассажиропотоком в пиковое время, который не приводит к максимальному наполнению вагона. Ко второй подгруппе отнесены данные, собранные со станций, где значительный пассажиропоток приводит к наполнению вагона, близкому к предельному. Для станций первой группы и первой подгруппы характерны существенные изменения пассажиропотоков в утреннее время и вечернее пиковое время. Это объясняется тем, что пассажиропоток значительно увеличивается в моменты пересадки пассажиров с наземного городского транспорта в метрополитен для дальнейшей поездки.

При проведении исследований величины $T_{cj}, T_{ej}, T_{nj}, T_{zoj}$ и $T_{нпj}$ рассматривались как система из пяти случайных величин.

Результаты обработки статистики для станций глубокого и мелкого заложения показали отсутствие корреляции между случайными величинами $T_{ej}, T_{zoj}, T_{нпj}$ для всех исследуемых станций.

Близость к нулю коэффициента корреляции для случайных величин T_{nj} и T_{nj} характерна для станций:

- с большим пассажиропотоком в часы пик, когда в результате переполнения вагонов пассажирами после отправления поезда со станции на платформе остаются пассажиры;

- с небольшим пассажирооборотом в часы пик, когда не происходит переполнения вагонов пассажирами, но из-за опоздания поездов частично сокращается стоянка поезда, до наступления момента окончания посадки в поезд пассажиров, скопившихся на платформе.

Для оценки случайной величины T_{coj} (задержки поезда) по отправлению собран соответствующий статистический материал. Было замечено, что значения исследуемой величины зависят от условий, при которых происходит формирование и исполнение команды на закрытие дверей подвижного состава. Статистический материал был разбит на три характерные группы. Первая группа относится к случаю, когда закрытие дверей происходило после окончания посадки всех пассажиров, находившихся на платформе, вторая — к случаю, когда закрытие дверей осуществлялось при предельном наполнении вагона пассажирами. Третья группа относится к случаю, когда закрытие дверей происходит в режиме «отсечки» пассажиров.

Был проведен предварительный анализ статистического материала, сделаны гипотезы о том, что случайная величина T_{coj} распределена по усеченному нормальному закону.

Исследования совпадают с проведенным анализом и позволяют использовать в качестве модели стоянки ТС выражение (1). Время выхода пассажиров из поезда T_{ej} и время задержки отправления T_{coj} следует задавать постоянными величинами, равными математическим ожиданиям. При этом время посадки пассажиров в поезд является линейной функцией времени незанятости платформы, где неизвестный коэффициент при T_{nj} определяется экспериментально в результате обработки соответствующего статистического материала для каждой платформы линии метрополитена. Величина T_{coj} — случайная величина с математическим ожиданием, равным нулю, и усеченным нормальным законом распределения.

Анализ выполненных исследований в работе [3] показал возможность использования при анализе динамики системы централизованного управления движением поездов следующих моделей стоянок:

- детерминированной модели, в которой фактическое отклонение времени хода поезда от графикового на j -й станции постоянно;
- случайной модели, в которой фактическое отклонение времени хода поезда от графикового на j -й станции распределено по заданному закону распределения;
- комбинированной модели, в которой фактическое отклонение времени хода поезда от графикового на j -й станции является суммой случайной вели-

чины с заданным законом распределения и величины, линейно зависимой от времени незанятости платформы.

Использование разнообразных моделей стоянок дает возможность исследовать поведение ИСУ ГРТС при появлении возмущений на линии.

Модель стоянки, в которой отклонение поезда по отправлению является детерминированной величиной, описывается постоянной величиной на j -й станции T_{detj} [4–6]:

$$T_{cj}^{\phi}[n] = T_{cj}^{nl}[n] + T_{detj}, \quad (2)$$

где $T_{cj}^{\phi}[n]$ – фактическое время стоянки n -го поезда на j -й станции,

$T_{cj}^{nl}[n]$ – плановое время стоянки n -го поезда на j -й станции,

T_{detj} – детерминированное отклонение времен хода поездов от графикового на j -й станции.

Величина T_{detj} выбирается из условий наличия ресурса линии по времени хода, стоянке и интервалу отправления.

В модели стоянки, где задержка поезда T_{coj} будет случайной величиной, отклонение поезда по отправлению определяется по одному из трех законов распределения: усеченному нормальному, треугольному или равномерному [4, 6, 7]:

$$T_{cj}^{\phi}[n] = T_{cj}^{nl}[n] + T_{coj}, \quad (3)$$

где T_{coj} – случайная величина отклонения поездов по отправлению на j -й станции.

Комбинированная модель стоянки рассчитывает величину задержки поезда по формуле [7, 8]:

$$T_{cj}^{\phi}[n] = T_{cj}^{nl}[n] + T_{coj} + kT_{nnj}[n+1], \quad (4)$$

где k – коэффициент пропорциональности, изменяющийся в диапазоне 0,01–0,1.

В ИСУ ГРТС при использовании графиковых, интервальных и графиково-интервальных алгоритмов ограничением на управление является величина допустимого интервала по отправлению на j -й станции, по истечении которого может быть дана команда на отправление n -го поезда [6, 7]. Величина данного интервала зависит от фактической длительности стоянки $[n-1]$ -го поезда на $(j+1)$ -й станции $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$. Эта зависимость определяется по первой временной характеристике [4–6]. Вместе с тем в момент принятия решения об отправлении n -го поезда с j -й станции $[n-1]$ -й поезд может находиться на перегоне, следовательно, величина $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$ неизвестна.

Замена фактической длительности стоянки $[n-1]$ -го поезда на $(j+1)$ -й станции на графиковую при формировании управления может привести к допол-

нительным остановкам n -го поезда на перегоне по запрещающим сигналам СОБД. Последнее приводит к дополнительным энергетическим потерям, сбоем в движении поездов, т. к. остановка поезда на перегоне, как правило, приводит к невозможности реализации заданного времени хода. Кроме того, изменение режима движения по запрещающим показаниям СОБД потенциально ухудшает показатели безопасности движения поездов.

Для вычисления оценки величины фактической стоянки $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$ необходима математическая модель стоянки, обеспечивающая требуемую точность расчета. Для таких моделей нужно знать зависимость изменения длительности стоянки от времени незанятости платформы, а также закон распределения плотности вероятности случайной составляющей задержки поезда F_c [8]. В общем случае эта информация недоступна. Проведенные измерения величин F_c для разных станций с дальнейшей их статистической обработкой показали, что стохастические модели индивидуальны для каждой станции, их числовые характеристики нестационарны. В работе [8] предложена адаптивная модель стоянки, которая с заданной погрешностью автоматически определяет в любой момент величину $F_{c(j+1)}[n-1]$, которая будучи суммированной с длительностью стоянки $T_{c(j+1)}^e[n-1]$, заданной графиком движения, позволяет получить оценку величины $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$.

Рассмотренный в работе [8] способ прогнозирования величины отклонения длительности стоянки от плановой удобен, т. к. прогноз не зависит от изменения длительности графиковых стоянок, которые могут быть внесены центральным постом управления в связи с изменением размеров движения.

В работе [9] приведена математическая модель экстраполяторов, работающих в реальном масштабе времени, при аппроксимации отсчетов по методу наименьших квадратов, и рассмотрены экстраполяторы, использующие многочлены Чебышева и многочлены Кравчука. Показано, что использование многочленов Кравчука дает удобную возможность управлять работой экстраполятора путем изменения «весовых» коэффициентов. Проведенный анализ работы экстраполятора, функционирующего в реальном времени, позволяет оценить влияние порядка экстраполяции, числа отсчетов случайного процесса, их статистической связи, шага временной дискретизации, времени прогноза на среднеквадратическую оценку погрешности прогноза [9].

Модель стоянки ТС ГРТС должна учитывать многообразие факторов, на которые влияет пассажиропоток (см. рис. 2).

Зарубежный опыт в создании имитационных моделей рельсовых транспортных систем для исследования пассажиропотока, несомненно, велик. В работах [10–14] приводится описание моделей транспортных систем. Современные подходы с использованием нейронных сетей и других методов искусственного интеллекта для изучения сложных областей уязвимости трафика и устойчивости транспортной системы предложены в работе [13]. На примере городов Кано и Лагос (Нигерия) авторы разработали современный метод моделирования

Рис. 2. Вид пассажиропотоков и факторы влияния

городского движения и дискретного прогнозирования заторов [13]. Вопросам разработки модели пассажирского железнодорожного транспорта посвящен исследовательский проект «Принципы прогнозирования дорожного движения с учетом других видов транспорта», реализованный в рамках польского проекта *Rozwój Innowacji Drogowych* (Развитие дорожных инноваций) [14]. Изучению непосредственно пассажиропотока как средству исследования интеллектуальных транспортных систем посвящена работа [15], в которой авторы проводят моделирование пассажиропотока транспортных систем, используя метод мультиграфов.

2. Задачи моделирования пассажиропотока транспортных пересадочных узлов

Появление большого числа транспортных пересадочных узлов (ТПУ) приводит к увеличению и изменению направления пассажиропотоков, использующих рельсовый транспорт.

Под ТПУ ГРТС будем понимать пассажирский комплекс, выполняющий функции перераспределения пассажиропотоков между разными видами рельсового транспорта и направлениями движения пассажиропотока. В крупных

городах ТПУ возникают для того, чтобы наилучшим образом организовать перевозочный процесс и обеспечить удобство пассажиров.

Информация о пассажиропотоке должна формироваться как на основании статистических данных о «плановом» изменении числа пассажиров в течение дня в зависимости от дня недели и времени года, так и с учетом проведения массовых мероприятий.

Моделирование чрезвычайных происшествий позволяет заранее предвидеть проблемы, возникающие при эвакуации людей, и в конечном счете спасти человеческие жизни [16]. Известны работы [17, 18], в которых реализованы модели пассажиропотока при проведении крупномасштабных культурно-массовых мероприятий.

Для создания корректной модели ТПУ следует принимать во внимание такие особенности моделируемой системы, как [19, 20]:

- неравномерность распределения нагрузки на терминалы ТПУ;
- графики прибытия поездов пригородного железнодорожного транспорта в черте города (например, Московских центральных диаметров (МЦД) и Московского центрального кольца (МЦК)), метрополитена и трамваев (залповое распределение пассажиров во времени);
- неравномерность распределения пассажиров в составе электропоездов МЦК, МЦД и метрополитена (в вагонах ближе к выходу пассажиров больше);
- процентное соотношение пассажиров, имеющих и не имеющих проездных документов;
- процентное соотношение пассажиров, приобретающих билеты в кассах и автоматах;
- учет льготных категорий граждан, покупающих билеты только в кассах при предоставлении необходимых документов (что увеличивает время обслуживания в кассах).

При разработке модели пассажиропотоков ТПУ необходимо [17]:

- выбрать подход к моделированию ТПУ по источникам формирования;
- построить модель формирования входного пассажиропотока, учитывающую характер образования составляющих и различную скорость движения пассажиров.

ТПУ — сложная система, в которой каждый пассажир или посетитель может независимо от других принимать решение о том, что необходимо сделать на следующем этапе, исходя из анализа своего собственного поведения или состояния среды (ТПУ) в целом на данном этапе [19].

Математическая схема массового обслуживания является одним из самых распространенных подходов к исследованию сложных дискретных процессов со случайными переменными методом имитационного моделирования (ИМ). Такой подход широко распространен в исследованиях перевозочного и технологических процессов обеспечения движения поездов на железнодорожном транспорте и метрополитене [21, 22].

Для моделирования индивидуальных участников системы, которыми в нашем случае будут ТПУ, часто используется агентное моделирование [19, 20, 23–26]. Именно сосредоточение на индивидуальном участнике выгодно отличает агентное моделирование от абстрактного метода системной динамики и дискретно-событийного метода, ориентированного на процессы.

В агентном моделировании на первом этапе устанавливаются параметры активных объектов — агентов и определяется их поведение; на втором этапе устанавливаются связи между агентами, задается окружающая среда и запускается моделирование. Индивидуальные действия каждого из агентов образуют глобальное поведение моделируемой системы.

Рассмотрим в качестве примера взаимодействие пассажиропотоков ТПУ ГРТС Дмитровская, в которой присутствуют пересечение (см. рис. 3):

- пассажиропотока от трамвайной оборотной станции (ГРТС1);
- пассажиропотока станции Дмитровская, которая является не только станцией Рижского направления Московской железной дороги, но и остановочным пунктом линии МЦД-2 Московских центральных диаметров (ГРТС2);
- пассажиропотока станции «Дмитровская» Московского метрополитена (ГРТС3).

На рисунке 3 приведена схема ТПУ «Дмитровская», схематичное направление пассажиропотоков в этом ТПУ представлено на рисунке 4.

Рис. 3. Местоположение ТПУ «Дмитровская»

Рис. 4. Схематичное направление пассажиропотоков ТПУ ГРТС «Дмитровская»

3. Математическая модель ТПУ ГРТС

При построении математической модели ТПУ ГРТС следует учитывать, что в общем случае во взаимодействии принимают участие G элементов ГРТС, где $G \geq 2$. На схеме (рис. 4) можно выделить три основных типа движения пешеходных потоков:

- входной пассажиропоток ГРТС;
- выходной пассажиропоток ГРТС;
- пассажиропоток ГРТС, направляющийся на пересадку в иную ГРТС, входящую в ТПУ.

Прежде чем приступить к описанию модели, введем обозначения, представленные в таблице 1.

На рисунке 5 приведена структурная схема взаимодействия пешеходных потоков в ТПУ ГРТС для общего случая.

Построим математическую модель ТПУ. Плотность потока пассажиров, проходящих через сечение в пространстве, соответствующее выходу из m -го ГРТС, за единицу времени, $OPP_m(t)$ определяется по формуле 5. Буквенные обозначения расшифровываются согласно таблице 1.

$$OPP_m(t) = \sum_{n=1}^{N_T} \sum_{g=0}^{G} \alpha_{mg} ITP_{mn}(t - \theta_{mn}^{TP}), \quad m = 1 \dots G, \quad (5)$$

где α_{mg} — доля пассажиропотока,двигающаяся на пересадку из m -й ГРТС на g -ю ГРТС ($m \neq g, g \neq 0$), на выход на улицу ($g = 0$) или остающаяся внутри m -й ГРТС ($m = g$):

$$\sum_{g=0}^G \alpha_{mg} = 1, m = 0 \dots G. \quad (6)$$

N_T — количество рассматриваемых поездов, прибывших до момента времени t : $t_{N_T} \leq t$;

ITP_n — плотность потока на выходе из n -го ТС; она представлена в модели последовательностью прямоугольных импульсов [27] с периодом повторения, равным периоду прибытия ТС, и имеющих амплитуду, определяемую следующим выражением:

$$ITP_{mn}(t) = \begin{cases} \frac{dx_{mn}}{dt} \approx \frac{x_{mn}}{T_{mn}}, & \text{если } t_n \leq t \leq t_n + T_n \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (7)$$

Таблица 1. Обозначения, используемые в математической модели ТПУ ГРТС

Буквы, используемые в математической модели	Значения букв
I	Первая буква в обозначении пассажиропотоков на входе в ГРТС ТПУ
O	Первая буква в обозначении пассажиропотоков на выходе из ГРТС ТПУ
P	Вторая или третья буква в обозначении пассажиропотока, который направлен на пересадку из одной ГРТС ТПУ в другую или связан с движением пассажиров в (из) ГРТС
T	Вторая буква в обозначении пассажиропотока, который направлен из ТС на выход к платформе остановочного пункта ГРТС, или третья буква в обозначении пассажиропотока, который направлен с платформы остановочного пункта ГРТС в ТС
θ_{xx}^{xx}	Величина запаздывания пассажиропотока, движущегося внутри или между ГРТС, определяемыми значениями индексов
δ_{xx}^{xx}	Величина запаздывания, определяемая взаимодействием пассажиров, движущихся внутри или между ГРТС, определяемыми значениями индексов
n	Номер ТС ГРТС ТПУ
G	Число ГРТС ТПУ, в общем случае $G \geq 2$

Рис. 5. Схема взаимодействия пешеходных потоков в ТПУ ГТС для общего случая

$$\int_{t_{mn}}^{t_{mn}+T_{mn}} ITP_{mn}(t)dt = x_{mn}, \quad (8)$$

где x_{mn} — количество пассажиров, вышедших из n -го ТС;

t_{mn} — время прибытия n -го ТС;

T_{mn} — длительность стоянки n -го ТС.

Плотность пассажиропотока на выходе из ТС на платформу остановочного пункта ГРТС и на выходе после прохождения систем обслуживания примерно одинакова. Отличие заключается в величине запаздывания функции $ITP_{mn}(t)$ — интервале времени θ_{mn}^{TP} , которое затрачивается на прохождение всех элементов инфраструктуры и на потерю времени в очередях. Она имеет вид:

$$\theta_{mn}^{TP} = \sum_{i=1}^{N_{im}} (T_i + \tau_i) + \frac{S_m}{V} + \delta_{mn}^{TP}, \quad (9)$$

где S_m — сумма отрезков пути между системами обслуживания на пути к выходу m -й ГРТС;

N_{im} — количество систем обслуживания внутри m -й ГРТС;

V — скорость движения пешеходного потока;

i — номер системы обслуживания внутри m -й ГРТС;

T_i — интервал времени, затрачиваемый на прохождение i -й системы обслуживания;

τ_i — интервал времени, затрачиваемый на ожидание прохождения i -й системы обслуживания, является функцией величины

$$\sum_{n=0}^{N_T-1} \alpha_{mg} x_n. \quad (10)$$

Ограничениями на управление являются:

— максимальная плотность потока людей, которые могут пройти через выход m -й ГРТС в момент времени t :

$$OPP_m(t) - OPP_{m\max} \leq 0, m = 1 \dots G, \quad (11)$$

где $OPP_{m\max}$ — максимальное число людей, которые могут пройти через выход m -й ГРТС в момент времени t .

— максимальная плотность потока людей, которые могут пройти через i -ю систему обслуживания в момент времени t , $c_i(t)$:

$$c_i(t) - c_{\max}[n] \leq 0, i = 1 \dots N_{im}, \quad (12)$$

где $c_{\max}$ — максимальное число людей, которые могут пройти через i -ю систему обслуживания в момент времени t .

Плотность пешеходного потока, проходящего через сечение в пространстве за единицу времени, в g -ю ГРТС $IPP_g(t)$ определяется по формуле 13:

$$IPP_g(t) = \sum_{m=0}^G \alpha_{mg} OPP_m(t - \theta_{mg}^{PP}), \quad g=1 \dots G, \quad (13)$$

где θ_{mg}^{PP} — величина запаздывания функции OPP_m (время, затрачиваемое на прохождение всех элементов инфраструктуры и ожидание в очередях, при движении из m -й ГРТС в g -ю ГРТС). Она имеет вид:

$$\theta_{mg}^{PP} = \sum_{j=1}^{N_{jm}} (T_j + \tau_j) + \frac{S_{mg}}{V} + \delta_{mg}^{PP}, \quad (14)$$

где S_{mg} — сумма отрезков пути из m -й ГРТС в g -ю ГРТС;

j — номер системы обслуживания на пути из m -й ГРТС в g -ю ГРТС;

N_{jmg} — количество систем обслуживания на пути из m -й ГРТС в g -ю ГРТС.

Плотность потока людей, убывающих на ТС, $IPT_m(t)$ определяется по формуле (15). Буквенные обозначения расшифровываются согласно таблице 1.

$$IPT_m(t) = \frac{1}{T_n} \int_0^t \sum_{m=1}^{N_m} IPP_m(t - \theta_{mn}^{PT}) dt - \sum_{n=1}^{N_T | t_{S_e} \leq t_{N_T} \leq t} u_n, \quad (15)$$

где u_n — плотность потока людей на входе в n -е ТС.

В любой момент времени должно выполняться условие отсутствия переполнения платформы остановочного пункта ГРТС:

$$\int_0^t IPP_m(t - \theta_{mn}^{PT}) dt - \sum_{n=1}^{N_T | t_s \leq t_{N_T} \leq t} u_n \leq K_{\max}, \quad (16)$$

где $K_{\max}$ — максимальная вместимость платформы.

Разработанные математические модели позволяют решать задачи безопасного планирования и анализа функционирования объектов инфраструктуры ГРТС.

Один из принципов, на котором строятся матрицы корреспонденции ТПУ ГРТС, заключается в том, что пассажир, уехавший из пункта отправления, обязательно в него приедет. Этот факт нашел отражение на рисунке 5 в использовании элементов запаздывания ($e^{-p\tau_m}$).

Общее количество передвижений из одного района в другой (независимо от того, по каким путям совершается передвижение) называется межрайонной корреспонденцией (или просто корреспонденцией). Определим для ТПУ

ГРТС понятие матрицы корреспонденций: количество передвижений пассажиропотоков из одного ГРТС в другой будем называть матрицей корреспонденции/корреспонденцией. Это могут быть различные перемещения пассажиров между любыми парами ТПУ ГРТС с разными целями. Совокупность всех корреспонденций образует матрицу корреспонденций, размерность которой равна числу ГРТС ТПУ. Матричная форма взаимозависимости входных и выходных потоков ГРТС может быть представлена в формуле 17, если пренебречь запаздываниями:

$$\begin{bmatrix} IPP_0 \\ IPP_1 \\ IPP_2 \\ \dots \\ IPP_m \\ \dots \\ IPP_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{10} & \alpha_{20} & \dots & \alpha_{m0} & \dots & \alpha_{Gm} \\ \alpha_{01} & \alpha_{11} & \alpha_{21} & \dots & \alpha_{m1} & \dots & \alpha_{G1} \\ \alpha_{02} & \alpha_{12} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m} & \dots & \alpha_{Gm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{0m} & \alpha_{1m} & \alpha_{2m} & \dots & \alpha_{mm} & \dots & \alpha_{Gm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{0G} & \alpha_{1G} & \alpha_{2G} & \dots & \alpha_{mG} & \dots & \alpha_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OPP_0 \\ OPP_1 \\ OPP_2 \\ \dots \\ OPP_m \\ \dots \\ OPP_G \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Входной информацией к модели расчета матрицы корреспонденций являются общие объемы прибытия и отправления в каждом ТПУ ГРТС. Проблема оценки объема прибытий и отправок пассажиропотоков разных групп связана с пространственным размещением объектов посещения и подвижностью населения, т. е. средним количеством поездок, совершаемых с теми или иными целями. Эта оценка строится на основе имеющихся демографических и социально-экономических данных, а также результатов обследований. Расчет матриц корреспонденций осуществляется с применением гравитационных или энтропийных моделей, обследованием классическими методами с помощью натурных экспериментов (талонные, анкетирование и т. п.) и автоматизированными методами [26–31]. Так, например, работа [24] посвящена вопросам оценки и восстановления матрицы корреспонденций в загруженных транспортных сетях, выявлены наиболее эффективные методы оптимального расположения датчиков регистрации номерных знаков ТС на сети для получения максимального объема информации, необходимой при восстановлении матрицы корреспонденций.

4. Системы технического зрения как новые источники информации для заполнения матрицы корреспонденции

В настоящее время в России широко внедряются различные системы мониторинга пассажиропотока и распознавания лиц. Полученные подобными

системами данные могут быть использованы и для построения матриц корреспонденций внутри ТПУ.

За последнее десятилетие доля использования компьютерного/машинного/технического зрения при организации движения городского транспорта и при управлении транспортной безопасностью, например с целью пресечения правонарушений граждан, многократно возросла. Системы машинного зрения в современном комплексе управления локомотивом или электропоездом используются как [32–35]:

- система помощи машинисту, которая подсказывает показания светофора по ходу движения и определяет наличие препятствий;

- управляющая система, которая определяет препятствия, запрещающие показания светофора, и формирует команды на изменение скорости или торможение. Применение современных устройств компьютерного мониторинга на тяговом подвижном составе позволит осуществлять идентификацию объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта во время движения поезда [36].

Обобщенный функционал систем технического зрения применительно к ГРТС представлен на рисунке 6.

Система технического зрения также может использоваться для отслеживания направления взгляда и скорости реакции сотрудника в течение всего рабочего

Рис. 6. Применение систем технического зрения

дня. Благодаря набору данных о скорости движения глаз система рассчитывает рациональное время работы для каждого машиниста и рекомендует — завершать или продолжать его смену. Потенциальное направление в расширении функционала подобных программ — контроль прохода пассажиров на территорию метрополитена с возможностью взимания платы за проезд по результатам распознавания лица, идентификация преступников, находящихся в розыске, диагностика состояния здоровья человека для оказания оперативной медицинской помощи. В рамках ИСУ ГРТС системы технического зрения позволят определять загруженность остановочных пунктов и рассчитывать эффективное время для проследования ТС участка между двумя остановочными пунктами. Системы технического зрения также следует рассматривать в качестве новейшего способа получения данных о пассажиропотоке, как следствие — для формирования матрицы корреспонденций.

Заключение

В работе исследован отечественный и зарубежный опыт в области моделирования, анализа и прогнозирования пассажиропотоков транспортных систем, определено место модели пассажиропотока в структуре ИСУ ГРТС. Показано, что модель стоянки ТС ГРТС должна учитывать всё многообразие факторов, на которые влияет пассажиропоток.

В работе предложена структура модели пассажиропотока ТПУ ГРТС для исследования качества функционирования ИСУ ГРТС; построена математическая модель ТПУ ГРТС; представлена матричная форма взаимозависимости входных и выходных потоков ГРТС.

Входной информацией модели расчета матрицы корреспонденций являются объемы прибытия и отправления пассажиров в каждом ТПУ ГРТС. Проблема оценки объема прибытий и отправок пассажиров разных групп связана с пространственным размещением объектов посещения и подвижностью населения. В качестве способа получения данных о пассажиропотоке и формирования матрицы корреспонденций предложено использовать системы технического зрения. Представлен обобщенный функционал систем технического зрения применительно к ГРТС.

Следующий этап работы — построение имитационных моделей ТПУ на основе разработанных математических выражений с использованием технологий агентного моделирования.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова // Надежность. – 2021. – Т. 21. № 2. – С. 17–23. DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23.
2. Баранов Л. А. Энергооптимальное управление движением транспортных средств / Л. А. Баранов, Н. А. Кузнецов, В. М. Максимов // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 12–18.
3. Межох А. К. Модель стоянки поезда в системе автоматического управления движением поездов метрополитена / А. К. Межох // Тр. МИИТа. – 1978. – Вып. 619. – С. 25–28.
4. Баранов Л. А. Алгоритмы управления движением поездов метрополитена с помощью управляющего вычислительного комплекса / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, А. К. Межох // Тр. МИИТ. – 1978. – Вып. 612. – С. 40–46.
5. Баранов Л. А. Потенциальная оценка пропускной способности железнодорожных линий по системам безопасности. Сборник докладов 7-й международной научно-технической конференции ЮЖЕЛ – 2000 / Л. А. Баранов. – Югославия, 2000. – С. 43–48.
6. Баранов Л. А. Интервальные и временные характеристики перегонов линии метрополитена / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // Безопасность движения поездов: Труды VII научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2006. – С. VII-2–VII-3.
7. Баранов Л. А. Алгоритмы для поездов метрополитена / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // Мир транспорта. – 2007. – Т. 5. № 2 (18). – С. 104–113.
8. Баранов Л. А. Адаптивная модель длительности стоянки поезда метрополитена для формирования ограничений на управление / Л. А. Баранов, П. Воробьев // Труды XI-й международной научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», 21–22 октября 2010 г., МИИТ.
9. Баранов Л. А. Прогнозирование случайных процессов на базе многочленов, ортогональных на множестве равноотстоящих точек / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 39–46.
10. Dras M., Kavakli M., Richards D., Barles J., Tychsen A. An Overview of Training Simulation Research and Systems. In Richards D, Johnson L, Sklar E, Wilensky U, editors, Proceedings of Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems, Workshop1 Agent-Based Systems for Human Learning (ABSHL) 2005. The Netherlands: University Utrecht. 2005. pp. 3–10.
11. Balsys K., Valinevicius A., Eidukas D. Imitation Model of Traffic Flows//Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2011. – No. 6 (112). – P. 65–68. Available from: https://www.researchgate.net/publication/267793827_Imitation_Model_of_Traffic_Flows [accessed Jul 11 2021].
12. Silver D., Bagnell J. A., Stentz A. High Performance Outdoor Navigation from Overhead Data using Imitation Learning. Robotics: Science and Systems 2008 Zurich, CH, June 25–28, 2008. Available from: <http://www.roboticsproceedings.org/rss04/p34.pdf> [accessed Jul 11 2021].
13. Otuozie S. H.; Hunt D. V. L., Jefferson I. Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Study Lagos and Kano (Nigeria). Sustainability 2021, 13, 1371. <https://doi.org/10.3390/su13031371> (PDF) Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Studies of Lagos and Kano (Nigeria). Available from: https://www.researchgate.net/publication/348862589_Neural_Network_Approach_to_Modelling_Transport_System_Resilience_for_Major_Cities_Case_Studies_of_Lagos_and_Kano_Nigeria [accessed May 01 2021].

14. *Brzeziński A., Dybicz T., Waltz A.* Railway passenger traffic model. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 17 (4), 5–17. DOI: 10.22630/ASPA.2018.17.4.36 (PDF) Railway passenger traffic model. Available from: https://www.researchgate.net/publication/330389767_Railway_passenger_traffic_model [accessed Jul 11 2021].
15. *Navin A., Nima Jafari Navimipour, Mirnia M.* “Using Labeled Hyper Multi Digraph for Tabriz Traffic Modeling: Data-Oriented Approach”, *Journal of Applied Science*, vol. 9, no. 15, pp. 2808–2814, 2009, ISSN 1812–5654.
16. *Carrothers G. A. P.* An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // *Journal of the American Institute of Planners*. – 1956. – V. 22. – P. 94–102.
17. *Искаков Т. А.* Имитационное моделирование функционирования транспортного узла / Т. А. Искаков // Труды пятой научно-технической конференции с международным участием ИСУЖТ. – 2016. – С. 221–225.
18. *Арсланов М. А.* Математическая модель организации перевозок пассажиров в остановочно-пересадочных пунктах при многократном изменении пассажиропотоков / М. А. Арсланов, Ш. М. Минатуллаев, А. А. Филиппов // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». – 2018. – № 15 (3). – С. 362–371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>.
19. *Евреенова Н. Ю.* Моделирование функционирования транспортно-пересадочного узла / Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2014. – Т. 12. – № 5 (54). – С. 170–176.
20. *Пивень О. И.* Имитационная модель для выбора оптимальных параметров функционирования транспортно-пересадочных узлов / О. И. Пивень // Молодежный научный вестник. – 2018. – № 8 (33). – С. 53–57.
21. *Василенко М. Н.* Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов и др. // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. – СПб.: ПГУПС, 2003. – С. 17–25.
22. *Марков Д. С.* Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 1. – С. 23–28.
23. *Кузнецов Н. А.* Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем: монография / Н. А. Кузнецов, В. В. Кульба, С. С. Ковалевский, С. А. Косяченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 800 с.
24. *Морозов А. С.* Построение матрицы пассажирских корреспонденций по данным о валидациях билетов и навигационным отметкам / А. С. Морозов, А. А. Черников // Транспортное планирование и моделирование. Цифровое будущее управления транспортом: Сборник трудов III Международной научно-практической конференции, Москва, 24–25 мая 2018 года / Под редакцией С. В. Жанказиева. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2018. – С. 96–108.
25. *Раевская А. П.* Методы оценки матрицы корреспонденций в загруженных транспортных сетях / А. П. Раевская, А. Ю. Крылатов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2016. – № 1 (236). – С. 31–40. DOI 10.5862/JCSTCS.236.4.
26. *Копылова Е. В.* Алгоритм назначения остановок поездов Дальнего следования в пригородных зонах крупных железнодорожных узлов / Е. В. Копылова, О. Н. Мадяр // Транспортное дело России. – 2018. – № 2. – С. 114–117.
27. *Искаков Т. А.* Математическая модель взаимодействия клиентских групп пешеходов внутри транспортного узла / Т. А. Искаков, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 32–35.

28. Копылова Е. В. Адаптация метода организации пассажиропотоков для крупных агломераций / Е. В. Копылова // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 2. – С. 81–86.
29. Марков Д. С. Методика получения динамической матрицы корреспонденций пассажиропотоков на метрополитене / Д. С. Марков // Сб. тезисов 62-й научно-технической конференции с участием студентов, молодых специалистов и ученых, ПГУПС. – 2002.
30. Мадяр О. Н. Моделирование спроса на транспортное обслуживание в пригородной зоне тяготения пассажиропотоков для пассажирских поездов дальнего следования / О. Н. Мадяр // Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук сборник научных трудов по материалам X международной научной конференции. Международная Научно-Исследовательская Федерации «Общественная наука». Санкт-Петербург. – 2017. – С. 48–50.
31. Мадяр О. Н. Методология комплексного анализа пассажиропотока при назначении остановок поездам дальнего следования в их пригородной зоне / О. Н. Мадяр // Всероссийская научно-практической конференции «Неделя науки–2017». В 2 ч. Ч. 2. – М.: РУТ, 2017. – Т. X. – 60 с. – № IV66-IV67.
32. Машина всё видит и понимает [Режим доступа: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1541901>] (дата обращения: 01.06.2021).
33. Техническое зрение: новые форматы взаимодействия [Режим доступа: <http://www.vniias.ru/press-centre/325-tekhnicheskoe-zrenie-novye-formaty-tsifrovogo-vzaimodejstviya>] (дата обращения: 01.06.2021).
34. Охотников А. Л. Беспилотное управление локомотивом: вчера, сегодня и завтра / А. Л. Охотников, П. А. Попов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 8. – С. 12–17. DOI: 10.34649/AT.2019.8.8.002.
35. Попов П. А. Поезд без машиниста – российские перспективы / П. А. Попов, А. Л. Охотников // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 8. – С. 4–6. DOI: 10.34649/AT.2019.8.8.001.
36. Фоменко В. К. Применение технологии «Машинное зрение» на тяговом подвижном составе / В. К. Фоменко, В. А. Минаков // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 11. – С. 21–23.

**Leonid A. Baranov,
Valentina G. Sidorenko,
Ludmila N. Loginova**

*Department of Control and Information Security
Russian University of Transport, Moscow*

Passenger flows modeling approaches within the framework of the functioning of the Intelligent control system of urban rail transportation systems

The emergence of a large number of transport interchange hubs, changes in megalopolis transport system's configuration leads to increasing number of passengers and changing in passenger flows using rail transport, which affects its functioning and requires consideration when creating and organizing

the operation of an intelligent control system for urban rail transport systems. The analysis of the experience in the passenger flows study will make it possible to create new algorithms for forecasting passenger traffic using modern technologies of agent-based modelling and technical vision. The article discusses a parking vehicles model, which allows to consider the factors affecting the duration of parking: passenger traffic, platform unoccupied time, the number of passengers carried, the number of wagons in the train. The article develops structural and mathematical models of passenger flows of a transport interchange hub, designed to study the dynamics of an intelligent control system for urban rail transport systems. As an example, when constructing a mathematical model, the interaction of passenger flows within the Dmitrovskaya transport-interchange hub was considered, in which there is an intersection of passenger flows of three urban rail transport systems: a tramway station, Dmitrovskaya station, which is a station of the Riga direction of Moscow railway and a stopping point of the MCD-2 line of the Moscow Central Diameters, the Dmitrovskaya station of the Moscow Metro.

Intelligent system, management of transport systems, rail transport, modeling, parking model, passenger traffic, transport hub, correspondence matrix, agent-based modeling, technical vision

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success", project number 20-37-51001.

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-539-564

References

1. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P., Loginova L. N. (2021) Intellectual'noye tsentralizovannoye upravleniye dvizheniyem vneulichnogo gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh intensivnogo dvizheniya [Intelligent centralized traffic management of a rapid transit system under heavy traffic]. *Nadezhnost' [Dependability]*, vol. 21, no. 2, pp. 17–23. Available at: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23> (In Russian)
2. Baranov L. A., Maksimov V. M., Kuznetsov N. A. (2016) Energooptimal'noye upravleniye dvizheniyem transportnykh sredstv [Energy-optimal control of vehicle traffic]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, vol. 87, no. 9, pp. 498–504. (In Russian)
3. Mezhokh A. K. (1978) Model' stoyanki poyezda v sisteme avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena [The time-varying parameters of the dwell time in the system of automatic control of metro trains]. *The proceedings of The Russian University of Transport (RUT (MIIT))*, iss. 619, pp. 25–28. (In Russian)
4. Baranov L. A., Erofeev E. V., Mezhokh A. K. (1978) Algoritmy upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena s pomoshch'yu upravlyayushchego vychislitel'nogo kompleksa [The motion control algorithms of metro trains with the help of the computer controlled information complex]. *The proceedings of The Russian University of Transport (RUT (MIIT))*, iss. 612, pp. 40–46. (In Russian)
5. Baranov L. A. (2000) Potentsial'naya otsenka propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh liniy po sistemam bezopasnosti [Potential estimation of traffic capacity according to the automatic train control system]. *Sbornik dokladov 7-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii YUZHEL–2000 [Proceedings of the 7th international scientific and technical conference YUZHEL–2000]*, Yugoslavia, pp. 43–48.
6. Baranov L. A., Balakina E. P., Vorobyeva L. N. (2006) Interval'nyye i vremennyye kharakteristiki peregonov linii metropolitena [Interval and time characteristics of metro running lines]. *Bezopasnost' dvizheniya poyezdov. Trudy VII nauchno-prakticheskoy konferentsii [Railway traffic safety. Proceedings of the VIIth scientific-practical conference]*. Moscow, The Russian University of Transport (RUT (MIIT)) Publ., pp. VII-2–VII-3.

7. Baranov L. A., Balakina E. P., Vorobyeva L. N. (2007) Algoritmy dlya poyezdov metropolitena [Algorithms for Metro Trains]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation Journal], no. 2, pp. 104–113. (In Russian)
8. Baranov L. A., Vorobyev P. I. (2010) Adaptivnaia model' dlitel'nosti stoianki poezda [Adaptive Train Duration Model]. Proceedings of the interregional scientific-practical conference with international participation. *Habarovsk*, vol. 2, pp. 9–10. (In Russian)
9. Baranov L. A., Balakina E. P. (2020) Prognozirovaniye sluchaynykh protsessov na baze mnogo-chlenov, ortogonal'nykh na mnozhestve ravnootstoyashchikh toчек [The random processes prediction based on orthogonal polynomials on the set of equally spaced points]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], no. 9, pp. 39–46. (In Russian)
10. Dras M., Kavakli M., Richards D., Barles J., Tychsen A. (2005) An Overview of Training Simulation Research and Systems. *Proceedings of Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems*, Workshop1 Agent-Based Systems for Human Learning (ABSHL). The Netherlands, University Utrecht, pp. 3–10.
11. Balsys K., Valinevicius A., Eidukas D. (2011) Imitation Model of Traffic Flows. *Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas: Technologija, no. 6 (112), pp. 65–68. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267793827_Imitation_Model_of_Traffic_Flows (accessed July 11, 2021).
12. Silver D., Bagnell J. A., Stentz A. (2008) High Performance Outdoor Navigation from Overhead Data using Imitation Learning. *Robotics: Science and Systems 2008 Zurich*, CH, June 25–28, 2008. Available at: <http://www.roboticsproceedings.org/rss04/p34.pdf> (accessed: July 11, 2021).
13. Otuozse S. H.; Hunt D. V. L., Jefferson I. (2021) Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Study Lagos and Kano (Nigeria). *Sustainability*, 13, p. 1371. <https://doi.org/10.3390/su13031371> (PDF) Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Studies of Lagos and Kano (Nigeria). Available at: https://www.researchgate.net/publication/348862589_Neural_Network_Approach_to_Modelling_Transport_System_Resilience_for_Major_Cities_Case_Studies_of_Lagos_and_Kano_Nigeria (accessed: May 01, 2021).
14. Brzeziński A., Dybicz T., Waltz A. (2021) Railway passenger traffic model. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 17 (4), pp. 5–17. DOI: 10.22630/ASPA.2018.17.4.36 (PDF) Railway passenger traffic model. Available at: https://www.researchgate.net/publication/330389767_Railway_passenger_traffic_model (accessed: July 11, 2021).
15. Navin A., Nima Jafari Navimipour, Mirnia M. (2009) Using Labeled Hyper Multi Digraph for Tabriz Traffic Modeling: Data-Oriented Approach. *Journal of Applied Science*, vol. 9, no. 15, pp. 2808–2814. ISSN 1812-5654.
16. Carrothers G. A. P. (1956) An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 22, pp. 94–102.
17. Iskakov T. A. Simulation modeling of functioning of the transport node [Imitatsionnoe modelirovanie funktsionirovaniya transportnogo uzla]. *Trudy pyatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem intellektualnye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte kompyuternoe i matematicheskoe modelirovanie ISUZHT* [Proceedings of the fifth scientific and technical conference with international participation «Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZHT)»], pp. 221–225. (In Russian)
18. Arslanov M. A., Minatullaev S. M., Filippov A. A. (2018) Matematicheskaya model' organizatsii perevozok passazhirov v ostanovochno-peresadochnykh punktakh pri mnogokratnom izmene-nii passazhiropotokov [Mathematical model of the organization of passengers' transporta-

- tion in stopping-trans-relocation points with a multiple change of passenger traffic]. *Nauchnyy retsenziruyemyy zhurnal "Vestnik SibADI"* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], no.15 (3), pp. 362–371. (In Russian) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>.
19. Evreenova N. Yu. (2014) Modelirovaniye funktsionirovaniya transportno-peresadochnogo uzla [Simulation of transport interchange hub operation]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation Journal], vol. 12, no. 5 (54), pp. 170–176. (In Russian)
 20. Piven O. I. (2018) Imitatsionnaya model' dlya vybora optimal'nykh parametrov funktsionirovaniya transportno-peresadochnykh uzlov [Imitating model for the choice of optimum parameters of functioning of transport hubs]. *Molodezhnyy nauchnyy vestnik* [Youth Scientific Bulletin], no. 8 (33), pp. 53–57. (In Russian)
 21. Vasilenko M. N., Markov D. S., Sokolov V. B., Sorokin K. G. (2003) Imitatsionnaya model' obsluzhivaniya passazhiropotokov na metropolitene [Simulation model of passenger handling for subway]. *Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustroystv i sistem zh. d. avtomatiki i telemekhaniki: sbornik nauchnykh trudov PGUPS* [Engineering, certification and technical operation of railway automation and remote control devices and systems, collection of scientific papers of PTSU], St. Petersburg, pp. 17–25. (In Russian)
 22. Markov D. S., Lykov A. A. (2012) Metod formalizatsii imitatsionnykh modeley tekhnologicheskikh protsessov v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte [Method for formalization of simulation models of technological processes within railway transport automation and remote control facilities]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of PSTU], iss. 1, pp. 23–28. (In Russian)
 23. Kuznetsov N. A., Kulba V. V., Kovalevskiy S. S., Kosyachenko S. A. (2002) *Metody analiza i sinteza modul'nykh informatsionno-upravlyayushchikh system* [Methods for analysis and synthesis of modular information management systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 800 p. (In Russian)
 24. Morozov A. S., Chernikov A. A. (2018) Postroyeniye matritsy passazhirskikh korrespondentsiy po dannym o validatsiyakh biletov i navigatsionnym otmetkam [City transit origin-destination estimation using automated fare collection and vehicle location systems]. *Transportnoye planirovaniye i modelirovaniye. Tsifrovoye budushcheye upravleniya transportom: Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 24–25 maya 2018 goda* [Transport planning and modeling. The digital future of transport management: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 24–25, 2018.]. Ed. by S. V. Zhankaziev. Moscow, Moscow automobile and road construction state technical university Publ., pp. 96–108. (In Russian)
 25. Krylatov A. Yu., Rayevskaya A. P. (2016) Metody otsenki matritsy korrespondentsiy v zagruzhennykh transportnykh setyakh [OD-matrix estimation for urban traffic area control]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*. [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University scientific and technical reports. Computing, Telecommunications and Control], no. 1 (236), pp. 31–40. DOI 10.5862/JCSTCS.236.4. (In Russian)
 26. Kopylova E. V., Madyar O. N. (2018) Algoritn naznacheniya ostanovok poyezdov Dal'nego sledovaniya v prigorodnykh zonakh krupnykh zheleznodorozhnykh uzlov [Algorithm of destination of traffic stations in the suburban areas of large railroad nodes]. *Transportnoye delo Rossii* [Transport business of Russia], no. 2, pp. 114–117. (In Russian)
 27. Isakov T. A., Sidorenko V. G. (2016) Matematicheskaya model vzaimodeystviya klientskikh grupp peshekhodov vnuti transportnogo uzla [Mathematical model of interaction of client groups of pedestrians within the transport hub]. *Elektronika i elektrooborudovanie trans-*

- porta [Electronics and electrical equipment of the transport], no. 6, pp. 32–35. (In Russian)
28. Kopylova E. V. (2021) Adaptatsiya metoda organizatsii passazhiropotokov dlya krupnykh aglomeratsiy [Adaptation of passenger flow organization method for large agglomerations]. *Nauka i tekhnika transporta*. [Science and Technology in Transport], no. 2, pp. 81–86. (In Russian)
 29. Sokolov V. A., Sokolov V. B., Maksimenko O. Yu. (2002) Metodika polucheniya dinamicheskoy matritsy korrespondentsiy passazhiropotokov na metropolitene [The method for the dynamical matrix calculating of the mobility plan of the passenger traffic flow]. *Sbornik tezisov 62-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiyem studentov, molodykh spetsialistov i uchenykh, PGUPS* [Collection of abstracts of the 62nd scientific and technical conference with the participation of students, young specialists and scientists]. Saint Petersburg, Petersburg University of Railways Publ. (In Russian)
 30. Madyar O. N. (2017) Modelirovanie sprosa na transportnoe obsluzhivanie v prigorodnoy zone tyagoteniya passazhiropotokov dlya passazhirskih poezdov dal'nego sledovaniya [Demand evaluation for transport services in the suburban gravity zones of the passenger traffic flow for long-distance slow passenger trains]. *Nauchnye tendentsii: Voprosy tochnykh i tekhnicheskikh nauk sbornik nauchnykh trudov po materialam X mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Mezhdunarodnaya Nauchno-Issledovatel'skaya Federatsiya «Obshchestvennaya nauka»* [Scientific trends: Questions of exact and technical sciences. collection of scientific papers based on the materials of the X international scientific conference. International Research Federation "Social Science"], pp. 48–50. (In Russian)
 31. Madyar O. N. (2017) Metodologiya kompleksnogo analiza passazhiropotoka pri naznachenii ostanovok poyezdov dal'nego sledovaniya v ikh prigorodnoy zone [Complex analysis methodology of the passenger traffic flow when choosing stopping patterns at stations for long-distance slow passenger trains in the suburban zone, v 2 chastyakh, chast' 2]. *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskoy konferentsiya «Nedelya nauki–2017»* [All-Russian scientific and practical conference "Week of Science–2017", in 2 parts, part 2]. Moscow, The Russian University of Transport (RUT (MIIT)) Publ., vol. X, p. 60, no. IV66–IV67. (In Russian)
 32. Mashina vso vidit i ponimayet [The machine sees and understands everything]. <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1541901> (accessed: June 01, 2021). (In Russian)
 33. Tekhnicheskoye zreniye: novyye formaty vzaimodeystviya [Synthetic vision: new interaction modes]. <http://www.vniias.ru/press-centre/325-tekhnicheskoe-zrenie-novye-formaty-tsifrovogo-vzaimodeystviya> (accessed: June 01, 2021). (In Russian)
 34. Okhotnikov A. L., Popov P. A. (2019) Bepilotnoye upravleniye lokomotivom: vchera, segodnya i zavtra [Self-driving: yesterday, today and tomorrow]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 8, pp. 12–17. (In Russian) DOI: 10.34649/AT.2019.8.8.002.
 35. Okhotnikov A. L., Popov P. A. (2019) Poyezd bez mashinista – rossiyskiye perspektivy [Autonomous train – the Russian perspective]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 8, pp. 4–6. (In Russian)
 36. Fomenko V. K., Minakov V. A. Primeneniye tekhnologii "Mashinnoye zreniye" na tyagovom podvizhnom sostave [Application of technology of "machine vision" on railway transport]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 11, pp. 21–23. (In Russian)

Статья представлена к публикации членом редколлегии

доцентом Д. В. Ефановым

Поступила в редакцию 05.07.2021, принята к публикации 26.07.2021

БАРАНОВ Леонид Аврамович — доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта
baranov.miit@gmail.com

СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна — доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта
valenfalk@mail.ru

ЛОГИНОВА Людмила Николаевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта
ludmilanv@mail.ru

© Баранов Л. А., Сидоренко В. Г., Логинова Л. Н., 2021