

# Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания

Маким Л. Жарков<sup>1\*</sup>, Михаил М. Павидис<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

\*zharkm@mail.ru



Маким Л. Жарков



Михаил М.  
Павидис

**Резюме. Цель.** Основной целью статьи является моделирование работы транспортных систем на железнодорожном транспорте с использованием теории массового обслуживания на примере сортировочных станций. Целями также являются развитие методов и инструментальных средств математического моделирования и теории массового обслуживания. **Методы.** Одной из актуальных проблем современной науки является разработка методов математического моделирования транспортных систем с целью анализа эффективности, устойчивости и надежности их работы при учете случайных факторов. Проведенные исследования показали, что применение наиболее разработанного класса такого рода моделей – однофазных Марковских систем массового обслуживания – не позволяет адекватно описать транспортные объекты и системы вообще, и на железнодорожном транспорте – в частности. По этой причине в настоящей статье предлагаются к использованию более сложные математические модели, которые имеют вид сетей массового обслуживания, т.е. множеств взаимосвязанных систем массового обслуживания, где обслуживаются заявки. Граф сети массового обслуживания не обязан быть связным и ациклическим (деревом), что обеспечивает возможность для моделирования транспортных систем с произвольной структурой, которая задается таблично в виде так называемой «маршрутной матрицы». Для описания входящих транспортных потоков нами предлагается использовать модель ВМАР: Branch Markovian Arrival Process, иначе говоря, групповой марковский входящий поток, который представляет собой пуассоновский процесс с групповым поступлением заявок. Это позволяет соединить несколько различных потоков заявок в единую структуру, что, в свою очередь, существенно повышает адекватность моделирования. Сложная структура построенной модели не позволяет проводить ее исследование аналитическими методами. Поэтому на основе математического описания разработана и программно реализована имитационная модель. **Результаты.** Проведена апробация разработанного модельно-алгоритмического аппарата на примере крупнейшей российской сортировочной станции. Выполнен вычислительный эксперимент, по результатам которого сформированы содержательные рекомендации. Помимо этого, важным результатом проведенного исследования является то, что удалось существенно продвинуться в создании единой методики математического и компьютерного моделирования транспортных хабов с использованием теории массового обслуживания. Это является стратегической целью проводимых исследований и должно будет повысить точность и адекватность моделирования по сравнению с известными методами, а также позволит расширить возможности и раздвинуть границы применимости модельного подхода. **Выводы.** Предложенный модельный подход показал себя достаточно эффективным инструментом, позволяющим изучать работу железнодорожных сортировочных станций при различных параметрах входящих потоков и различной перерабатывающей способности станции. Он вряд ли сможет полностью вытеснить традиционные методы исследования работы железнодорожных станций, основанные на построении их детального описания. Однако проведенное исследование показывает, что он вполне пригоден в качестве инструмента первичного анализа, для применения которого не требуется больших трудозатрат и подробных статистических данных.

**Ключевые слова:** транспорт, железнодорожная сортировочная станция, математическое моделирование, теория массового обслуживания, сеть массового обслуживания, имитационное моделирование, вычислительный эксперимент, надежность.

**Для цитирования:** Жарков М.Л., Павидис М.М. Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания // Надежность. 2021. №3. С. 27-34. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34>

Поступила 27.01.2021 г. / После доработки 09.02.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

## Введение

Применение теории массового обслуживания [1] для моделирования транспортных систем различного уровня в последние годы является одним из важных и актуальных научных направлений, поскольку позволяет оценивать эффективность, устойчивость и надежность работы транспорта при учете случайных факторов. При этом традиционный подобный рода инструментарий однофазных Марковских систем массового обслуживания (СМО) оказался неудовлетворительным, поскольку а) в транспортных системах обслуживание, за редким исключением, производится в несколько этапов (фаз); б) поступающие транспортные единицы нельзя считать отдельными заявками, поскольку они могут иметь сложную структуру и различную мощность. Например, таковы железнодорожные составы, поступающие на грузовую или сортировочную станцию (СС) – вагонов в поезде может быть разное количество и типы их также, как правило, различны [2]. Таким образом, возникает необходимость применения более сложного модельного подхода с использованием немарковских и/или многофазных СМО, а также сетей массового обслуживания (СеМО). При этом, поскольку подобные математические объекты с трудом поддаются аналитическому исследованию, требуется также разработка алгоритмического и программного инструментария, позволяющего проводить компьютерное моделирование.

## Обзор источников

О возможности применения двухфазных СМО для моделирования железнодорожных станций упоминается еще в монографии [2], однако в то время каких-либо систематических исследований в указанном направлении не было проведено; возможно, причиной стала недостаточная разработанность математического аппарата. Ситуация изменилась в XXI веке. Так, в иркутской научной школе под руководством ак. И.В. Бычкова и проф. РАН А.Л. Казакова, к которой принадлежат авторы статьи, более 10 лет развивается [3] научное направление, связанное с применением многофазных СМО в качестве модели обработки входящего потока в транспортном узле. При этом последние могут иметь совершенно различную природу: от транспортно-пересадочного узла (ТПУ) мегаполиса [4] до грузовой железнодорожной станции общего пользования [3]. Такого рода работы встречаются также и за рубежом [5–7]. В [5] теория массового обслуживания (ТМО) используется для определения пропускной способности железнодорожных линий, в работах [6] – для математического описания работы железнодорожных станций и других элементов железнодорожной инфраструктуры, в статье [7] – для моделирования работы железнодорожных узлов. Тем не менее, гораздо чаще ТМО используется в сфере информационно-телекоммуникационных технологий.

Существует большое количество научных школ и коллективов, проводящих исследования в данном направлении. Упомянем три из них, которые, по мнению авторов, занимают ведущие позиции на территории бывшего СССР: московская, под руководством проф. В.В. Рыкова (см., например, [8–10]), томская, под руководством проф. А.А. Назарова (см., например, [11–13]) и белорусская, под руководством проф. А.Н. Дудина (см., например, [14–16]). Разумеется, данный перечень можно было бы продолжить, однако обзор научных результатов в области применения ТМО для моделирования информационных систем и технологий не может быть дан в рамках настоящей статьи и не входит в ее цели.

Возвращаясь к работам иркутских ученых, отметим, что, как показывают результаты моделирования, общие черты, присущие всем транспортным системам, в данном случае преобладают над различиями и позволяют рассматривать их с единых позиций. Хотя, разумеется, любой модельный подход требует настройки под изучаемый объект, что позволяет учесть структуру и направление движения внутренних транспортных потоков.

Отдельного обсуждения заслуживают транспортные потоки, поступающие извне [17]. В качестве модели, позволяющей передать их сложную и неоднородную структуру, нами предложено использовать модель *BMAP* (Branch Markovian Arrival Process, т.е. групповой марковский входящий поток), который позволяет соединить несколько различных потоков заявок в один [14]. Фактически, речь идет об обобщенном случае пуассоновского потока, в котором заявки прибывают группами. Данная модель была впервые предложена итальянским математиком Д. Лукантони еще в 1991 году [18], однако ранее применялась только для моделирования информационных систем [16].

На базе трехфазных СМО авторами, помимо упомянутых уже ТПУ (в Москве и Екатеринбурге), и грузовых станций общего пользования [3], были построены математические модели работы СС [19–21]. Результаты были апробированы на примере конкретных транспортных объектов, расположенных как в России, так и за рубежом, и вызвали интерес специалистов-транспортников. Однако проявилась и слабая сторона предложенного подхода, связанная с тем, что аппарат многофазных СМО пригоден только для описания систем с линейной структурой. В них невозможна организация кольцевых маршрутов движения заявок, что, в частности, характерно для некоторых СС.

## Методы

Для решения указанных выше проблем и расширения возможностей модельного подхода мы предлагаем использовать новый класс объектов – сети массового обслуживания [21, 22]. Под СеМО понимают множество взаимосвязанных СМО, в которых циркулируют (обслуживаются) заявки [22, 23]. В отличие от многофазных СМО, граф СеМО не обязан являться связным и ацикли-

ческим (деревом), что обеспечивает значительно больше возможностей для моделирования транспортных систем со сложной структурой, которая задается «маршрутной матрицей». К сожалению, расширение возможностей модельного аппарата в данном случае имеет и оборотную сторону: происходит принципиальное усложнение изучаемого объекта. Если для многофазных СМО удастся в некоторых случаях получить аналитические результаты, то для СеМО доступно только численное исследование с использованием методов имитационного моделирования [24], основанных на разыгрывании единичного жребия (методы Монте-Карло).

Настоящая статья является прямым продолжением работы [21]. Основываясь на предложенной ранее концепции моделирования железнодорожных транспортных систем, авторы предлагают методику моделирования СС на основе СеМО, тем самым развивая полученные ранее результаты по моделированию указанных транспортных объектов на базе СМО [19]. В частности, нами разработаны соответствующие численные алгоритмы, которые реализованы в виде программной системы, позволяющей выполнять исследование свойств и оценку параметров многофазных систем и сетей массового обслуживания за счет специально организованного компьютерного эксперимента, основанного на методах статистического моделирования. В порядке апробации предложенного подхода рассмотрена модельная станция. Проведен вычислительный эксперимент, сделаны содержательные выводы об особенностях функционирования станции.

## Математическая модель

Как известно, сортировочный комплекс представляет собой сложную структуру. Он нацелен на массовое расформирование грузовых поездов на отдельные группы вагонов, их обработку и накопление, а также формирование новых поездов из них. СС выполняют стандартные операции и состоят из схожих элементов. Выделим наиболее существенные из них, которые будут учтены в математической модели. Типовые СС выполняют следующие действия: прием поездов в парк прибытия (ПП) и отцепка от них локомотива; расформирование состава на сортировочной горке (СГ); накопление вагонов в сортировочном парке (СП), согласно плану формирования поездов; выставление состава в парк отправления (ПО), подключение к нему локомотива и отправление готового поезда из системы. В каждом парке и на СГ имеются обслуживающие устройства с различными перерабатывающими способностями и вместимостями. Входящий на станцию поездопоток в своем составе имеет транзитные, местные и другие категории поездов, параметры которых могут существенно различаться. При этом поезда прибывают с нескольких направлений (от двух и более). Поступающий состав необходимо рассматривать как группу заявок на обслуживание, так как вагоны обслуживаются независимо

друг от друга и занимают определенное место на путях в парках. Следовательно, общий входящий поездопоток состоит, как минимум, из четырех подпотоков, каждый из которых является групповым. Пассажирские поезда обычно следуют мимо СС и в модели не учитываются.

Значительную часть входящего поездопотока составляют транзитные поезда, которые следуют по всей территории РФ. Эта группа подвержена большому влиянию случайных факторов из-за огромной дальности следования, поэтому диспетчерское управление не может эффективно планировать расписание для всех категорий поездов на отдельном участке железнодорожной сети. Следствием этого является появление существенных отклонений движения поездов от расписания [25]. По этой причине можно принять, что время поступления поездов является случайной величиной.

Построение математической модели СС происходит в два этапа. На первом описывается входящий поток заявок. Для этого применяется модель *ВМАР*-потока, позволяющая объединить несколько различных потоков заявок в единую структуру. На втором описывается обслуживание заявок в системе. Для учета сложной иерархической структуры системы предлагается использовать СеМО.

**ВМАР-поток** (Batch Markovian Arrival Process) отличается от простейшего потока с групповым поступлением заявок тем, что: а) интенсивность поступления групп заявок  $\lambda_v$  зависит от номера состояния управляющей цепи Маркова  $v$  с непрерывным временем и конечным пространством состояний  $\{0, 1, \dots, W\}$ ; б) время пребывания цепи Маркова  $v$  в состоянии  $v$  имеет показательное распределение с параметром  $\lambda_v$ ; в) после того как время пребывания цепи в состоянии  $v$  закончится, она с заданной вероятностью  $p_k(v, v')$  переходит в другое состояние  $v'$ , и при этом генерируется группа размера  $k \geq 0$ ; г) вероятности переходов  $p_k(v, v')$  удовлетворяют условию нормировки  $\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{v=0}^W p_k(v, v') = 1$ . Интенсивности переходов цепи Маркова удобно хранить в матрицах

$$(D_0)_{v,v'} = -\lambda_v, v = \overline{0, W}; (D_0)_{v,v'} = \lambda_v p_0(v, v'), v, v' = \overline{0, W}; (D_k)_{v,v'} = \lambda_v p_k(v, v'), v, v' = \overline{0, W}, k \geq 1. \quad (1)$$

**СеМО** представляют собой совокупность конечного числа  $S$  СМО (далее – узлов), в которой заявки переходят из одного узла в другой, в соответствии с маршрутной матрицей  $P$  [22, 23]. Примем, что заявки поступают в СеМО из внешнего источника. Если принять его за дополнительный узел с индексом 0, то маршрут заявки определяется стохастической матрицей  $P = \|P_{ij}\|$  размера  $(S+1) \times (S+1)$ . Ее элементы  $P_{ij}$  – вероятности перехода заявки из узла  $i$  в узел  $j$  ( $i, j = \overline{1, S}$ ),  $P_{0j}$  и  $P_{j0}$  – соответственно, вероятность поступления в  $j$ -й узел заявки из источника и вероятность покидания заявкой сети после обслуживания в  $j$ -м узле ( $j = \overline{1, S}$ ). Очевидно, что  $\sum_{j=0}^S P_{ij} = 1$  ( $i = \overline{0, S}$ ),  $P_{00} = 0$  [22, 23].



## Моделирование сортировочной станции

Рассмотрим модельную сортировочную станцию (МСС). Ее характеристики соответствуют СС Екатеринбург-Сортировочный (Е-С), которая располагается на Свердловской железной дороге и является крупнейшей СС в России. Е-С является двухсистемной СС с последовательным расположением парков и обрабатывает поезда с пяти направлений: 1) Тагильское, 2) Кунгурское, 3) Казанское, со станций 4) Екатеринбург-Товарный и 5) Екатеринбург-Пассажирский. Нечетная система обслуживает направления 4) и 5), четная – 1), 2), 3). Обе системы практически идентичны по выполнению операций. Четная система в настоящее время проходит модернизацию и параметры ее работы нам неизвестны. Поэтому в МСС используем характеристики нечетной системы (см. рис. 1): в ПП располагается 11 специализированных путей для приема грузовых поездов с общей вместимостью 716 условных вагонов (усл. ваг.) и работает два локомотива надвига, которые переставляют поезда на СГ по двум путям вместимостью около 100 усл. ваг.; СГ обладает большой мощностью и способна переработать до 5500 усл. ваг. в сутки; СП имеет 35 путей с общей вместимостью 2535 усл. ваг., в формировании участвует три локомотива, которые переставляют поезда в ПО; он имеет 15 путей с общей вместимостью 980 усл. ваг, поезда из него отправляются на три направления. Длины путей в парках разные, наиболее протяженные из них вмещают от 80

и более усл. ваг. На станцию Е-С поступает вагонопоток, включающий три категории поездов: а) транзит с переработкой; б) транзит без переработки; в) местный. Поезда категорий а) и в) поступают в парк прибытия и после проходят все оставшиеся этапы обслуживания. Поезда категории б) на станции обслуживаются в ПП или в ПО, затем покидают систему.

При подготовке статьи [25] нами были собраны статистические данные о поездах на Свердловской железной дороге, в частности, для грузовых поездов: фактическое и плановое время прибытия на станцию, число вагонов в поездах и их номера. Возможно, они отчасти устарели, однако нам не удалось получить более свежие данные, поэтому далее при моделировании станции мы будем опираться на имеющиеся сведения. Они свидетельствуют о том, что в половине случаев отклонение от графика у грузовых поездов превышает 30 минут и более двух часов в 28% случаев. Следовательно, можно принять, что время между поступлением поездов на станцию является случайной величиной. Число вагонов в транзитных и большей части местных грузовых поездах подчиняется биномиальному распределению  $B(80, 0,9)$ , среднее их число – 70, а максимальное – 80 для всех категорий.

На СС основным устройством, от которого зависит производительность системы, считается СГ. От ее мощности рассчитывается объем вагонопотока, который станция может обработать. Мы не смогли получить статистические данные о входящем поездопотоке, поэтому подберем объем прибывающих в расформирование поез-

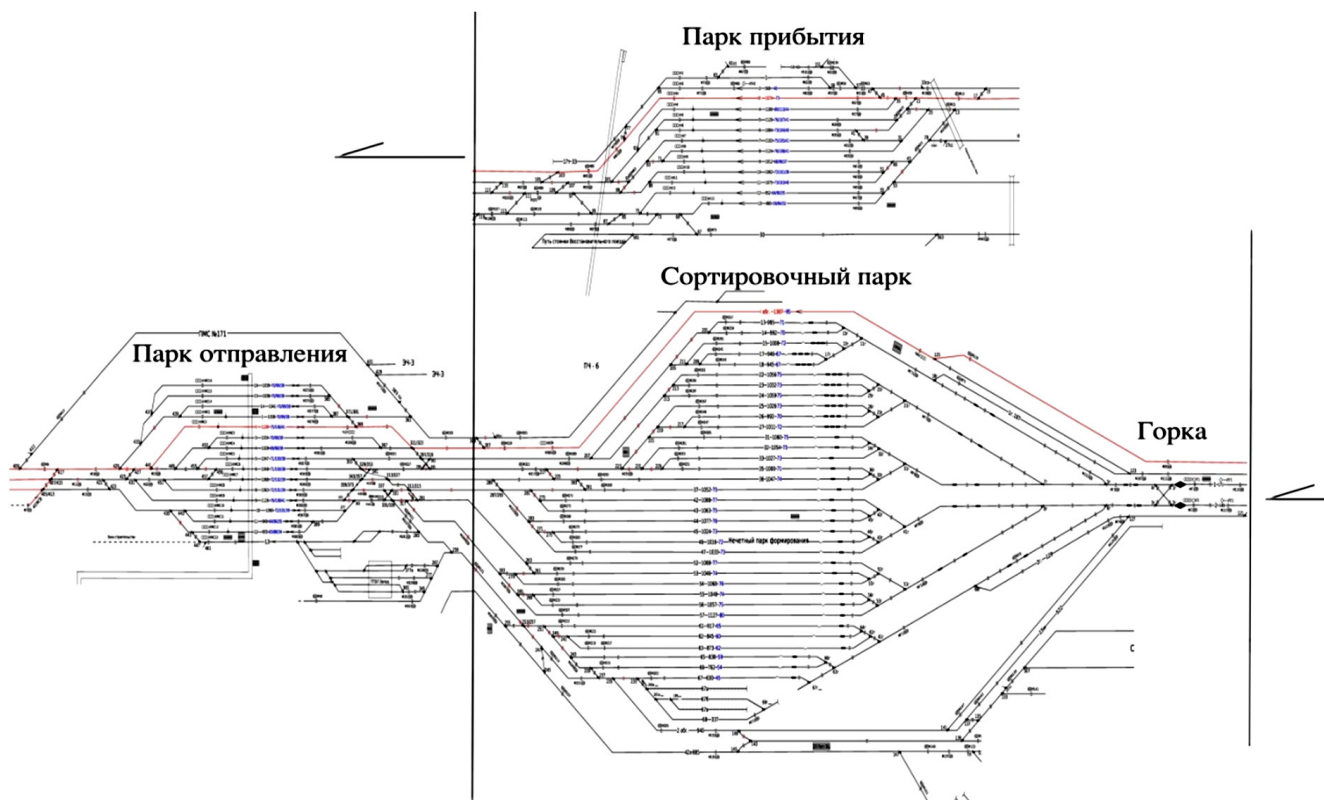


Рис. 1. Нечетная система сортировочной станции Е-С

дов так, чтобы загрузка СГ составила 70% от максимальной возможной. Этот показатель соответствует средней плановой загрузке для таких объектов. Тогда в систему должно поступать 3850 вагонов в сутки или 55 поездов. Количество поездов без расформирования примем равным четверти от числа в расформирование, т.е. 14 в сутки. Получаем, что в МСС прибывает по 69 грузовых поездов с двух направлений в сутки, т.е. 35 поездов с направления 4) и 34 с 5). В модели мы разделяем поезда по технологии обработки на станции: в расформирование (поезда А) и без расформирования (поезда Б) и по направлению. Таким образом, входящий вагонопоток будет состоять из четырех групповых подпотоков. Для математического описания такого вагонопотока применим модель *ВМАР*-потока. Она будет включать 81 матрицу  $D_k$ ,  $k = \overline{0,80}$ , размера  $4 \times 4$ . Их элементы вычисляются по формулам (1), где  $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda = 69 / 24 = 2,875$ ,  $p_0 = 28 / 69 = 0,41$ ,  $p_2 = 27 / 69 = 0,39$ ,  $p_1 = p_3 = 7 / 69 = 0,1$ ,  $p_k(v, v') = p_{v'} f(k)$ ,  $v, v' = \overline{0,3}$ ,  $k = \overline{0,80}$ , здесь  $f(k)$  – вероятность поступления группы вагонов размера  $k$ , их размеры подчиняются закону  $B(80, 0,9)$ .

Модель МСС в виде СеМО следующая. Система имеет четыре узла обслуживания: 1) в ПП каналами мы примем два локомотива надвига, очередь – пути парка, тогда Узел 1 – СМО с двумя каналами и очередью на 716 мест; 2) на СГ мы примем, что один путь надвига и сортирующее устройство являются одним каналом, второй путь – очередью, тогда Узел 2 – СМО с одним каналом и очередью на 100 мест; 3) в СП каналами являются три локомотива, очередь – пути парка, тогда Узел 3 – трехканальная СМО с очередью на 2535 мест; 4) в ПО каналами мы считаем три пути отправления (три направления), очередь – пути парка, тогда Узел 4 – трехканальная СМО с очередью на 980 мест. Время обслуживания в каналах узлов мы примем случайной величиной, которая подчиняется нормальному закону распределения. Выбор объясняется тем, что персонал станции стремится приблизить продолжительность технических операций к нормативным значениям. Отклонения возникают из-за влияния случайных факторов. Примером может служить поезд, который имеет вагоны только с двумя или тремя направлениями (станциями назначений). Тогда он может быть расформирован на горке за 12 минут вместо стандартных 20. Параметры работы МСС представлены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры работы каналов в подсистемах МСС

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4
F	$N(20, 2)$	$N(20, 3)$	$N(40, 5)$	$N(40, 3)$
X	$B(80, 0,9)$	$B(80, 0,9)$	$B(80, 0,9)$	$B(80, 0,9)$

Параметры работы каналов (см. табл. 1) определены на основе типового технологического процесса работы СС с учетом специфики станции Е-С. Временем обслуживания в Узле 1 мы считаем время надвига поездов на СГ из парка отправления и возвращение локомотива обратно. Интервал времени обслуживания составляет  $[12,0; 28,0]$  минут, среднее – 20 минут. Перерабатывающая способность СГ (Узел 2) составляет 5500 усл. ваг. в сутки или 4 усл. ваг. в мин. Интервал времени обслуживания примем  $[11,0; 29,0]$  минут. В Узле 3 (СП) временем обслуживания мы считаем время на прицепку локомотива к поезду, окончание формирования и перестановку его в ПП, а также возвращение локомотива в СП. Интервал времени обслуживания  $[25,0; 55,0]$  минут, среднее – 40 минут. В ПО (Узел 4) учитываем времена прицепки локомотива к составу, сокращенного опробования тормозов и отправления поезда из системы. Среднее время обслуживания примем 40 минут, а интервал  $[31,0; 49,0]$  минут.

В систему прибывают поезда А и Б. Первые поступают в Узел 1 и далее следуют по всей системе. Вторые принимаются в Узле 1 или Узле 4, затем обслуживаются и покидают систему. Для учета разного обслуживания поездов мы используем маршрутную матрицу. Примем, что поезда Б могут попасть в Узел 1 или Узел 4 с равной вероятностью  $p_b = 0,5$ . Тогда поезда из общего входящего потока поступают в Узел 4 с вероятностью  $p_{0,4} = (2 \cdot 7 / 69)p_b = 0,1$ , а в Узел 1 с вероятностью  $p_{0,1} = 1 - p_{0,4} = 0,9$ . После обслуживания в Узле 1 поезда Б покидают систему, вероятность этого равна  $p_{1,0} = 7 / 62 = 0,11$ . Поезда А переходят в Узел 2 с вероятностью  $p_{1,2} = 1 - p_{1,0} = 0,89$ , и далее следуют по Узлам 3 и 4. В терминах ТМО модель МСС будет иметь вид СеМО с маршрутной матрицей  $P$ , образованной указанными выше вероятностями, и следующими узлами: 0 – источник входящего потока; 1 –  $ВМАР / G^B / 2 / 716$ ; 2 –  $*/ G^B / 1 / 100$ ; 3 –  $*/ G^B / 3 / 2535$ ; 4 –  $*/ G^B / 3 / 980$ , где  $B$  – биномиальное распределение,  $G$  – произвольный закон распределения времени обслуживания. Схема описанной СеМО представлена на рис. 2.

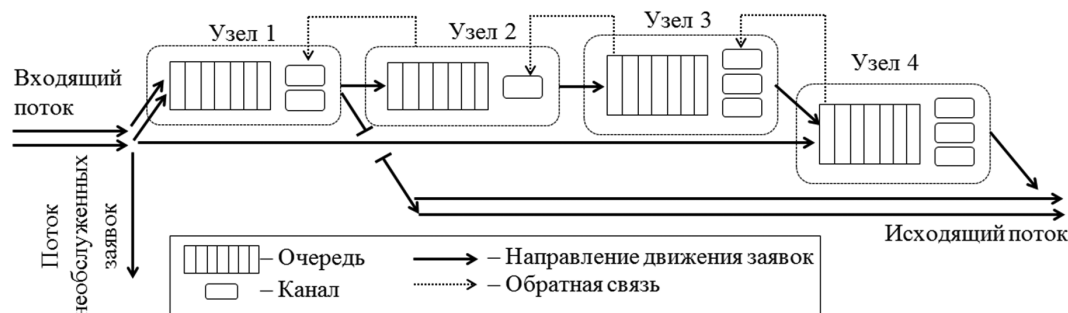


Рис. 2. Схема СеМО

Полученную СеМО исследуем численно с использованием имитационной модели [24]. Искомые характеристики – показателями эффективности – являются [1, 22, 23]:  $P_R$  и  $P_G$  – вероятности обслуживания заявки и группы заявок,  $T_{\text{сyst}}$  – среднее время пребывания заявки в системе,  $l$  – средняя длина очереди,  $K$  – среднее число занятых каналов,  $t_{ph}$  – среднее время пребывания заявки в узле,  $t_{lock}$  – суммарное время блокировки всех каналов узла,  $P_{lock}$  – вероятность блокировки одного канала узла.

**Вычислительный эксперимент.** Далее в таблицах 2–4 представлены результаты сценарного моделирования работы, описанной выше СеМО (см. рис. 2), при различных параметрах входящего вагонопотока. В каждой таблице приведены средние результаты, которые получены за 10 пусков программы. Модельное время – пять недель для всех экспериментов – это минимальное время, за которое имитационная модель позволяет вычислить стационарные характеристики СеМО. Главным показателем того, что СеМО справляется с нагрузкой, является  $P_R = 0$ , что для крупных производственных и транспортных систем означает отсутствие риска появления нештатных ситуаций. Так, в частности, это указывает на то, что станция обслуживает все поезда и работа осуществляется в штатном режиме.

**Эксперимент 1.** В табл. 2 представлены результаты имитационного моделирования при интенсивности поступления вагонопотока  $\lambda = 2,875$  групп в час.

Табл. 2. Результаты эксперимента 1

	Поступило	Потеряно	$T_{\text{сyst}}(м)$	$P_G$	$P_R$
Групп заявок	2431,80	0	161,76	0	0
Заявок	175199,20	0			
	$K$	$l$	$t_{ph}(м)$	$t_{lock}(м)$	$P_{lock}$
Узел 1	1,00	41,46	35,68	2897,00	0,05
Узел 2	0,74	24,77	32,61	0,00	0,00
Узел 3	1,43	0,00	42,43	0,00	0,00
Узел 4	1,59	26,55	51,05	-	-

**Эксперимент 2.** В табл. 3 представлены результаты имитационного моделирования при общем вагонопотоке 5880 вагонов или почти 84 поезда в сутки, из которых 17 без расформирования ( $\lambda = 3,5$ ).

Табл. 3. Результаты эксперимента 2

	Поступило	Потеряно	$T_{\text{сyst}}(м)$	$P_G$	$P_R$
Групп заявок	2903,50	0	166,13	0	0
Заявок	209049,50	0			
	$K$	$l$	$t_{ph}(м)$	$t_{lock}(м)$	$P_{lock}$
Узел 1	1,23	61,10	39,20	4681,25	0,08
Узел 2	0,83	32,65	34,48	0,00	0,00
Узел 3	1,60	0,00	42,44	0,00	0,00
Узел 4	1,79	26,64	50,02	-	-

**Эксперимент 3.** В табл. 4 представлены результаты имитационного моделирования при интенсивности поступления групп заявок  $\lambda = 4$  в час.

Табл. 4. Результаты эксперимента 3

	Поступило	Потеряно	$T_{\text{сyst}}(м)$	$P_G$	$P_R$
Групп заявок	3453,50	1,00	178,23	0,0003	0,0003
Заявок	248605,50	72,82			
	$K$	$l$	$t_{ph}(м)$	$t_{lock}(м)$	$P_{lock}$
Узел 1	1,50	111,15	48,60	7216,50	0,12
Узел 2	0,90	42,58	36,96	0,00	0,00
Узел 3	1,74	0,00	42,45	0,00	0,00
Узел 4	1,97	29,85	50,23	-	-

## Обсуждение результатов моделирования

По результатам эксперимента 1 можно видеть, что среднее время пребывания заявки (вагона) в системе составляет 2,7 часа. Вероятность отказа равна нулю, т.е. вагонопоток принимается на станцию бесперебойно, что является важным показателем надежности железнодорожных перевозок. Таким образом, МСС успешно справляется с переработкой вагонопотока, обеспечена надежная и безотказная работа станции.

**Эксперимент 2.** Наиболее загруженным является Узел 1, поскольку среднее время блокировки его каналов составляет 2,2 часа в сутки, что не критично, но отрицательно сказывается на работе станции. В такой ситуации диспетчерский аппарат расставляет грузовые поезда на соседних железнодорожных станциях, где они ожидают освобождения пути в парке приема. Сортировочная станция работает в штатном режиме и справляется с нагрузкой, однако из-за увеличения времени блокировки каналов Узла 1 увеличивается срок доставки грузов, устойчивость работы транспортной системы обеспечена не в полной мере.

**Эксперимент 3.** По результатам моделирования видно, что каналы Узла 1 в среднем блокируются на 3,4 часа за сутки, что является критическим для системы, так как происходит переполнение очереди Узла 1 и вероятность отказа становится ненулевой, надежная и безотказная работа МСС не обеспечена.

По результатам всех экспериментов можно сделать следующий общий вывод. Система работает в штатном режиме при максимальной интенсивности входящего поездопотока  $\lambda = 3,5$  поездов в час. Предельным значением работы станции является интенсивность входящего поездопотока  $\lambda = 4$  поездов в час. Узким местом в системе является недостаточная вместимость парка прибытия (Узел 1). Для того чтобы его разгрузить, целесообразно перенаправить все поезда без переработки в Узел 4 (ПО). Для дальнейшего повышения производительности системы необходимо увеличить перерабатывающую спо-



способность СГ. Однако это потребует ее реконструкции, связанной с существенными материальными затратами.

## Заключение

Подводя итог проведенного исследования, отметим, что оно является лишь первым серьезным шагом на, как надеются авторы, длинном пути, финалом которого должно стать создание единой методики математического и компьютерного моделирования транспортных хабов с использованием СеМО. Это позволит повысить точность и адекватность моделирования, направленного на оценку эффективности, устойчивости и надежности работы транспортных систем, а также расширить возможности модельного подхода. Еще одной важной проблемой, которую необходимо решать при моделировании работы транспортных систем, является отчуждаемость программных продуктов от разработчиков. Наиболее естественным путем здесь является применение инструментов интеллектуализации в рамках создания интеллектуальной системы управления развитием транспортно-логистической инфраструктуры региона [26], которое проводится под руководством ак. И.В. Бычкова.

В заключение отметим, что предложенный модельный подход вряд ли сможет полностью вытеснить традиционные методы исследования работы железнодорожных станций, основанные на построении их детального описания. Однако в качестве инструмента первичного анализа, для применения которого не требуется больших трудозатрат и подробных статистических данных, он, как показывают наши результаты, вполне пригоден.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору А.Л. Казакову за полезные советы при подготовке материала и помощь в написании статьи. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00724; РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-47-383002.

## Библиографический список

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: ЛКИ, 2007. 107 с.
2. Акулиничев В.М., Кудрявцев В.А., Корешков А.Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М.: Транспорт, 1981. 223 с.
3. Казаков А.Л., Маслов А.М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3. С. 27–32.
4. Журавская М.А., Казаков А.Л., Жарков М.Л. и др. Моделирование работы транспортно-пересадочного узла мегаполиса как трехфазной системы массового обслуживания // Транспорт Урала. 2015. № 3. С. 17–22.

5. Weik N., Niebel N. Capacity analysis of railway lines in Germany – a rigorous discussion of the queueing based approach // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2016. № 6 (2), P. 99–115.
6. Dorda M., Teichmann D. Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns // Mathematical Problems in Engineering. 2013. № 2013, 11 p.
7. Nießen N. Waiting and loss probabilities for route nodes // In Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. 2013; Copenhagen, Denmark.
8. Бронштейн О.И., Райкин А.А., Рыков В.В. Об одной системе массового обслуживания с потерями // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1964. № 4. С. 39–47.
9. Kitaev M.Yu., Rykov V.V. Controlled queueing system. N.Y.: CC Press, 1995.
10. Rykov V.V. Controllable queueing systems from the very beginning up to nowadays // Materials of Information Technologies and Mathematical Modelling named after A.F. Terpugov. 2017. № 1. P. 25–26.
11. Грачев В.В., Моисеев А.Н., Назаров А.А. и др. Многофазная модель массового обслуживания системы распределенной обработки данных // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-2 (26). С. 248–251.
12. Shklennik M., Moiseeva S., Moiseev A. Optimization of two-level discount values using Queueing tandem model with feedback // Communications in Computer and Information Science. 2018. № 912. P. 321–332.
13. Галилейская А.А., Лисовская Е.Ю., Моисеева С.П. и др. Моделирование процесса последовательной обработки данных, реализующей хранение резервной копии // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. № 3. С. 579–587.
14. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ, 2000.
15. Kim C., Dudin A., Dudina O. et al. Tandem queueing system with infinite and finite intermediate buffers and generalized phase-type service time distribution // European Journal of Operational Research. 2014. № 23. P. 170–179.
16. Вишневецкий В.М., Дудин А.Н. Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 3–59.
17. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / под ред. А.В. Гасникова. М.: МФТИ. 2010.
18. Lucantoni D.M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Commun. Statist. Stochastic Models. 1991. № 7. P. 1–46.
19. Казаков А.Л., Павидис М.М., Жарков М.Л. Применение многофазных систем массового обслуживания для моделирования сортировочной станции // Вестник

Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2. С. 4–14.

20. Казаков А.Л., Павидис М.М. Об одном подходе к моделированию работы сортировочных станций // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 29–35.

21. Жарков М.Л., Павидис М.М. Моделирование железнодорожных станций на основе сетей массового обслуживания // Актуальные проблемы науки Прибайкалья № 3. Иркутск: ИГУ, 2020. С. 79–84.

22. Уолрэнд Д. Введение в теорию сетей массового обслуживания. М.: Мир, 1993. 336 с.

23. Ивницкий В.А. Теория сетей массового обслуживания. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 772 с.

24. Кельтон В.Д., Лоу А.М. Имитационное моделирование. СПб.: Питер, 2004.

25. Жарков М.Л., Парсюрова П.А., Казаков А.Л. Моделирование работы станций и участков железнодорожной сети на основе изучения отклонений от графика движения // Вестник ИргТУ. 2014. № 6 (89). С. 23–31.

26. Бычков И.В., Казаков А.Л., Лемперт А.А. и др. Интеллектуальная система управления развитием транспортно-логистической инфраструктурой региона // Проблемы управления. 2014. № 1. С. 27–35.

## Сведения об авторах

**Максим Леонидович Жарков** – кандидат технических наук, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Шелехов, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: zharkm@mail.ru

**Михаил Максимович Павидис** – аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация, e-mail: pavidismiha1994@mail.ru

## Вклад авторов в статью

**Жаркову М.Л.** принадлежит постановка задачи и разработка модельного подхода.

**Павидисом М.М.** были выполнены обзор источников, идентификация модели и вычислительный эксперимент, также сделаны содержательные выводы по результатам моделирования.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.