

УДК 519.872.5:656.01

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОКЗАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИРКУТСК-ПАССАЖИРСКИЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

**Жарков Максим Леонидович**

к.т.н., научный сотрудник, e-mail: [zharkm@mail.ru](mailto:zharkm@mail.ru),

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,  
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134;

**Супруновский Антон Викторович**

старший преподаватель, e-mail: [as.irgups@gmail.com](mailto:as.irgups@gmail.com),

Иркутский государственный университет путей сообщения,  
664074 г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

**Аннотация.** В работе предлагается математическая модель работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский, построенная на основе теории массового обслуживания. Эта модель может быть использована для научного обоснования планируемых мер и мероприятий при реконструкции данного объекта и создании на его основе регионального транспортно-пересадочного узла. В модели для описания сложного входящего пассажиропотока применяются *ВМАР*-потоки, что позволяет учитывать наличие нескольких подпотоков с различными параметрами. Для описания процесса обслуживания пассажиров используется сеть массового обслуживания, благодаря чему возможно детально описать структуру и перемещение пассажиропотоков внутри системы.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, сети массового обслуживания, *ВМАР*-поток, железнодорожный вокзальный комплекс.

**Цитирование:** Жарков М. Л., Супруновский А.В. Моделирование работы вокзального комплекса Иркутск-пассажирский на основе сетей массового обслуживания // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 43-53. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.004

**Введение.** Железнодорожный вокзальный комплекс Иркутск-Пассажирский (ВК И-П) является пассажирской станцией 1 класса и одним из крупнейших транспортных узлов в Восточно-Сибирском регионе. Последние его значительные изменения были осуществлены в 1998 г. (проведена полная реконструкция вокзала) и в 2004 г. (был реконструирован пригородный павильон). К настоящему времени появился ряд проблем в работе ВК И-П. Первая – при текущем уровне посещаемости здание вокзала имеет недостаточную вместимость. Вторая – устаревшая планировка, в частности, наличие пересечений пассажиропотоков различных направлений. Так, поток пассажиров с электричек мешает движению пассажиров, направляющихся к пригородным кассам или поездам дальнего следования. Третья – отсутствие интеграции пригородного сообщения с городской транспортной средой города [1]. Для решения этих и других менее значимых проблем планируется реконструкция ВК И-П и создание на его основе регионального транспортно-пересадочного узла (ТПУ), который соединит межрегиональный, региональный и городской транспорт в единую систему [2]. Затем на этой основе ожидается организация мультимодальных перевозок [3, 4], которые являются одним из наиболее перспективных способов снижения высокой плотности транспортных потоков в черте города. Чтобы проанализировать предлагаемые мероприятия, не прибегая к проведению натурного эксперимента, целесообразно построить математическую модель действующего вокзального комплекса, а затем на ее основе оценить планируемые изменения.

Под вокзальным комплексом мы понимаем здание вокзала вместе с привокзальной площадью, пассажирскими платформами и переходами [5]. Реконструкция такого объекта, как правило, связана с большими финансовыми затратами, поэтому необходимо научное обоснование планируемых мер и мероприятий. С позиции теории систем ВК является сложной системой: в нем стыкуются несколько транспортных потоков с различными характери-

стиками (вид транспорта, его вместимость и интенсивность поступления); для каждого потока в системе присутствует станция или остановка, принимающая и отправляющая транспортные средства; также имеется терминал (здание), который соединяет эти станции и позволяет пассажирам пересаживаться с одного вида транспорта на другой [3, 5].

Для описания и исследования работы ВК и других ТПУ применяются различные модели и методы, которые можно разделить на две условные группы. Первая – детерминированные математические модели, в частности, клеточные автоматы [6, 7], модели на основе физических сил [7], а также аналитические формулы, используемые для определения пропускной способности различных элементов системы [5]. Основным их недостатком является сложность учета возмущений и искажений, связанных с наличием случайных второстепенных факторов, а преимуществом – они наиболее просты для аналитического исследования. Вторая – вероятностные модели, построенные с использованием аппарата теории вероятностей, теории случайных процессов, теории массового обслуживания (ТМО) [7, 8]. Они позволяют учитывать наличие фактора случайности, однако такие математические модели могут оказаться слишком сложными для аналитического изучения.

Для математического моделирования ВК И-П мы выбрали аппарат ТМО [9] по следующим причинам. Во-первых, он является эффективным и удобным средством для описания объектов, в которых регулярно повторяются однотипные действия (принятие транспорта, его обслуживания и т.д.) и процесс их работы подвержен влиянию большого числа случайных второстепенных факторов, т.е. таких систем, как ВК и ТПУ [7, 8]. Во-вторых, имеется возможность не учитывать расписание движения транспорта при прогнозировании работы системы, которое, как правило, неизвестно до входа системы в штатный режим работы после модернизации. В-третьих, авторы имеют положительный опыт применения ТМО для описания пассажирских транспортных систем. Так, в работах [10, 11] были построены и исследованы модели действующих типовых ТПУ в Москве. Эти модели имеют вид многофазных систем массового обслуживания (СМО) с *ВМАР*-потоками [9, 12]. Использование *ВМАР*-потоков позволяет составить единое математическое описание нескольких пассажиропотоков с различными характеристиками [11, 12], а многофазных СМО – учесть многоэтапное последовательное обслуживание пассажиров в системе [9, 10].

В данной работе предложена математическая модель работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский, построенная на основе аппарата ТМО. Она предназначена для определения текущей пропускной способности и «узких мест» в структуре ВК И-П и в дальнейшем может стать необходимым инструментом для оценки эффективности планируемых мер и мероприятий при реконструкции этого объекта.

Далее в статье представлено предметное описание ВК И-П, которое актуально на февраль 2021 года. Особенностью этого ВК является то, что он обладает нелинейной иерархической структурой. В этом случае многофазные СМО неэффективны, поэтому для построения модели мы использовали более общий их случай – сети массового обслуживания (С<sub>е</sub>МО) [9] – одно из современных направлений в ТМО. С их помощью нам удалось детально описать структуру ВК И-П и перемещение пассажиропотоков в нем.

**1. Предметное описание вокзала Иркутск-пассажирский.** ВК И-П относится к типу одноуровневых вокзалов с боковым расположением пассажирского здания по отношению к ж/д путям, т.е. перрон с платформами, полы первого этажа вокзала и привокзальная площадь находятся на одном уровне. Схема ж/д вокзала И-П и прилегающей к нему территории представлена на рис. 1.

На ж/д станцию при вокзале И-П прибывают поезда: пригородные и дальнего следования (далее – электрички и поезда), которые принимаются на путях 1, 3, 4, 5, 7. Также на вокзале имеется путь 15, на котором осуществляется прием/отправка туристических поездов.

На основе анализа расписания движения поездов установлено, что за сутки на вокзал прибывает 21 электричка и 19 поездов, а отправляется 16 электричек и 19 поездов. Средний интервал времени между поступлениями обеих категорий поездов составляет 27 мин., между отправлениями 30 мин.



Рис. 1. Схема вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский

Как правило, после реконструкции вокзала новое расписание движения транспорта неизвестно до момента его ввода в эксплуатацию. В этом случае в ТМО используется интенсивность поступления заявок – среднее число заявок, поступивших в систему в единицу времени [9]. Далее мы будем оперировать именно этой характеристикой. Тогда интенсивность поступления электричек и поездов на платформы составляет  $\lambda_{приб} = 1/27$ , отправления с платформ –  $\lambda_{отпр} = 1/30$ .

Вместимость пассажирских поездов найдем из следующих соображений: в среднем в составе имеются 6 плацкартных вагонов на 54 места каждый и 4 вагона-купе на 36 мест. Тогда вместимость составит – 468 мест. В составе электрички имеются 2 головных вагона, вместимость каждого 80 мест и несколько прицепных вагонов на 116 мест. Большая часть электричек имеет 4 вагона с номинальной вместимостью 392 места, реже – 6 вагонов (2 головных по 80 мест, 4 прицепных по 116 мест), вместимость которых 624 места. По анализу статистических данных установлено, что средний размер прибывающих групп пассажиров в сутки для поездов составляет 74 чел., для электричек 41 чел., а максимальный 140 и 110 соответственно.

В здание вокзала пассажиры попадают с ж/д транспорта двумя путями: 1) с платформ 2 и 3 через подземный туннель; 2) с перрона через западные и восточные ворота, которые находятся справа и слева от здания. На каждой платформе имеются по 4 двери, которые ведут в туннель. Площадь перрона составляет 6497,4 кв.м., платформы 2 – 3725,9 кв.м., платформы 3 – 4118,9 кв.м. и тоннеля – 262 кв.м. Их расчетная вместимость составляет 1732, 990, 1090 и 188 чел. соответственно [13].

Здание вокзала делится на 4 подъезда. Подъезд 3 двухэтажный, остальные – одноэтажные. В Подъезде 1 расположен операционный зал, вмещающий девять касс, которые продают билеты на поезда. В Подъезде 2 имеются административные помещения, медпункт, сервис по перевозке корреспонденции. На первом этаже Подъезда 3 расположены зал ожидания и справочное бюро, на втором – зал повышенного комфорта, комнаты отдыха и административные помещения. Подъезд 4 (пригородный павильон) включает распределительный вестибюль со входом в подземный переход (4 двери), пять пригородных касс, из которых работа-

ют две (натурные данные), торговые павильоны и пункты питания. Пригородный павильон предназначен для принятия/отправления пассажиров как в пригородном, так и в дальнем сообщении. Также в здании вокзала имеется цокольный этаж, в котором располагаются камера хранения и вспомогательные помещения.

Подъезды 1 и 2, 3 и 4 сообщаются между собой. Вход пассажиров и посетителей в здание вокзала из города возможен через Подъезды 1, 3 и 4. В подъездах 1 и 3 имеется по одной двери, в Подъезде 4 – 4 двери (по 2 на вход и выход), однако сразу за ними расположены всего 2 рамки металлоискателя, т.е. по одной на вход и выход. Общая площадь здания вокзала составляет 3626,5 кв.м., площадь пригородного павильона (Подъезд 4) – 316 кв.м., первого этажа Подъезда 3 – 547 кв.м. На основе этих параметров мы определили их вместимость [13], которая составляет 800, 226 и 304 чел. соответственно.

Привокзальная площадь (2839,3 кв.м.) обеспечивает связь железнодорожного вокзального комплекса с различными видами общественного транспорта и сетью автомобильных дорог города Иркутска. На ней имеются парковка на 250 машиномест, две автобусные и трамвайная остановки. Автобусная остановка 1 предназначена для городского сообщения, через нее проследуют 7 маршрутов. На Автобусной остановке 2 обслуживаются 6 междугородних маршрутов. Автобусы междугородних маршрутов и двух городских маршрутов имеют максимальную номинальную вместимость 110 чел. (далее – автобусы). Автобусы других маршрутов вмещают до 13 чел. (далее – микроавтобусы). Через трамвайную остановку проследуют три маршрута, на которых используются вагоны серии 71-619, 71-617, 71-608КМ и КТМ-5. Их максимальная номинальная вместимость составляет – 145 чел. (5 чел./м<sup>2</sup>).

На основе натурного наблюдения установлено, что интенсивность поступления (и отправления) для парковки составляет – 7,9 ед./час, для Автобусной остановки 1 – 15 ед./час, для Автобусной остановки 2 – 3 ед./час, и для остановки трамвая – 5,5 ед./час, т.е. средний интервал времени между поступлением (и отправлением) 7, 6, 4, 20 и 10,9 мин. соответственно. Среднее число пассажиров в автомобилях – 2 чел., в микроавтобусах – 7 чел., в автобусах – 80 чел., в трамваях – 70 чел.

За 2019 пассажиропоток на ж/д станции при ВК И-П составил 835,5 тыс. чел. на поездах и 597,3 тыс. чел. на электричках, за первые 7 месяцев 2020 года – 241 и 240,9 тыс. чел. соответственно. На основе полученных данных установлено, что среднесуточное сообщение составляет 1,82 тыс. чел. для поездов дальнего следования и 1,46 тыс. чел. для пригородных поездов, а максимальный пассажиропоток в сутки составил 2,8 тыс. чел. для поездов и 2,16 тыс. чел. для электричек.

Нам не удалось установить распределение размеров прибывающих на вокзал групп пассажиров. Примем, что оно подчиняется биномиальному распределению, которое является дискретным аналогом нормального распределения [9]. Параметры биномиального распределения  $B(n, p)$  находятся из следующих соображений:  $n$  – число «испытаний» – максимальный размер группы пассажиров, которую данный тип транспорта может перевезти;  $p$  – вероятность «успеха» – отношение значения среднего размера группы пассажиров к  $n$ . Распределения размеров групп пассажиров для различных видов транспорта представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики групп пассажиров, прибывающих различным транспортом

Тип транспорта	Интенсивность поступления в мин.	Распределение размеров групп
Электричка	1/54	$B(110, 0,37)$
Поезд	1/54	$B(140, 0,53)$
Автомобиль	7,9	$B(7, 0,29)$ .
Микроавтобус	10	$B(13, 0,54)$
Автобус	5	$B(110, 0,73)$
Трамвай	5,5	$B(145, 0,48)$

**2. Математический аппарат.** При построении модели работы вокзала мы выделяем два основных компонента: входящий пассажиропоток и процесс его обслуживания в системе, включая особенности ее структуры. Каждый из компонентов описывается отдельно. Далее представлен используемый для этого математический аппарат.

Общий поступающий на вокзал пассажиропоток складывается из пассажиров различных видов транспорта (электрички, поезда, автобусы, трамваи и личный транспорт). При этом для общественного транспорта характерно прибытие пассажиров группами, причем их размер, как правило, случаен. Таким образом, общий пассажиропоток состоит из нескольких групповых подпотоков с различными характеристиками: распределение размеров групп, интенсивность поступления и доля в общем потоке. Для его моделирования удобным инструментом является *ВМАР*-поток (Batch Markovian Arrival Process) [12], с помощью которого возможно описать несколько независимых групповых потоков с различными характеристиками как единую структуру.

*ВМАР*-поток задается в виде набора матриц  $D_k$ ,  $k = \overline{0,75}$ , размеры которых определяются по количеству подпотоков. Элементы матриц определяются следующим образом

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

где  $\lambda_v$  – интенсивность поступления подпотока  $v = \overline{0, W}$ ,  $p_k(v, v')$  – вероятность поступления группы заявок из подпотока  $v'$  притом, что последняя группа поступила из подпотока  $v$ .

Для описания процесса обслуживания пассажиров применяется сеть массового обслуживания – совокупность конечного числа  $S$  СМО (далее – узлов), в которой заявки переходят из одного узла в другой, в соответствии с некоторым маршрутом [9]. Если принять, что заявки поступают из внешнего источника и обозначить его, как новый узел с индексом 0, то маршрут заявки определяется стохастической матрицей  $P = \|P_{ij}\|$ , где  $P_{0j}$  – вероятность поступления в  $j$ -й узел заявки из источника;  $P_{j0}$  – вероятность покидания заявкой сети после обслуживания в  $j$ -м узле ( $j = \overline{1, S}$ );  $P_{ij}$  – вероятность переходящей заявки из узла  $i$  в узел  $j$  ( $i, j = \overline{0, S}$ ). Очевидно, что  $\sum_{j=0}^S P_{ij} = 1$  ( $i = \overline{0, S}$ ),  $P_{00} = 0$ . Каждый узел описывает отдельный структурный элемент, например, двери, кассы в терминале или станцию (платформу), с которой отправляется транспорт. Таким образом, с помощью СеМО возможно описание объектов с многоэтапным нелинейным обслуживанием заявок.

**3. Математическое описание.** Применим представленный подход для моделирования работы ВК И-П. Сперва опишем входящий пассажиропоток, затем его движение и обслуживание в системе.

Пассажиры поступают на вокзал И-П различными видами транспорта: железнодорожным и городским. Каждую группу мы будем описывать отдельным *ВМАР*-потоком. Так, во-первых, пассажиропотоки из этих групп являются встречными, т.е. пассажиры из города стремятся сесть на поезд и обратно. Во-вторых, транспорт из каждой группы имеет свое место прибытия (станцию) в системе.

*Модель входящего пассажиропотока с ж/д станции (ВМАР-а).* Пассажиры прибывают на вокзал в электричках и поездах, следовательно, мы имеем два подпотока № $a0$  и № $a1$ . Тогда матрицы  $D_k$  будут размера  $2 \times 2$ . Максимальное число пассажиров наблюдается в поездах дальнего следования и равно 140, поэтому *ВМАР-а* будет включать 141 матрицу  $D_k$ ,  $k = \overline{0,140}$ . Элементы матриц вычисляются по формулам (1) при  $\lambda_{a0} = \lambda_{a1} = \lambda_{приток} = 1/27$ , вероятности переходов  $p_k(v, v') = p_v f_v(k)$ ,  $v, v' = \overline{0,1}$ ,  $k = \overline{0,140}$ , где  $p_v$  – вероятности поступления поезда определенной категории:  $p_{a0} = 21 / 40 = 0,525$ ,  $p_{a1} = 19 / 40 = 0,475$ ,  $f_v(k)$  – вероятность

поступления группы пассажиров размера  $k$ , размеры групп подчинены биномиальному распределению (см. табл. 1).

Модель входящего пассажиропотока с городского транспорта (ВМАР-б) строится аналогично. Он имеет 4 подпотока: №b0 – автомобили, №b1 – микроавтобусы, №b2 – автобусы, №b3 – трамваи. Последние вмещают наибольшее число пассажиров – 145, поэтому ВМАР-б будет включать 146 матриц  $D_k$ ,  $k = \overline{0,145}$  размера  $4 \times 4$ . В табл. 1 представлены интенсивности и распределения размеров групп заявок из подпотоков, которые необходимы для вычисления элементов матриц  $D_k$ .

В модели работы ВК И-П мы учитываем следующие функциональные элементы: ж/д станция – платформы и поезда, прибывающие на ж/д пути; подземный переход; здание вокзала – первый этаж Павильона 3 и Павильон 4 с кассами; привокзальная площадь – Парковка, Автобусная остановка 1 и Остановка трамвая, а также их транспортные средства.

Следующие элементы мы не учитываем в модели: а) Павильон 1; б) Павильон 2, второй этаж Павильона 3 и цокольный этаж; в) Автобусную остановку 2; г) пути 15. Так, как правило, билеты на поезда дальнего следования в б) берут заранее или же онлайн, т.е. посетители не оказывают влияния на пассажиропотоки в здании вокзала, которые осуществляют непосредственную пересадку между различными типами транспорта. В б) оказываются второстепенные услуги и количество пассажиров, которые ими могут воспользоваться, незначительно. Прибывающие на поезде пассажиры в основном являются иногородними и направляются в город. Покидающие город пассажиры могут воспользоваться услугами ж/д транспорта или междугородних автобусов, которые обслуживаются на в). Следовательно, в последнем случае пассажиры не посещают ВК И-П. Пассажиры туристических поездов попадают на г) через восточные ворота, т.е. минуют здание вокзала и не оказывают влияние на основные пассажиропотоки. Также исключим из рассмотрения случаи движения пассажиров по типу «поезд – электричка» и «парковка – наземный общественный транспорт». Предполагаем, что пассажир нацелен пересесть на другой вид транспорта, воспользовавшись зданием вокзала.

В структуре вокзала мы выделяем три основных пассажиропотока, проходящие через здание вокзала (рис. 2): I) С ж/д станции в город (пунктирная линия); II) Из города на ж/д станцию (прямая линия); III) Провожающие – прибывают из города, затем возвращаются обратно (двойная пунктирная линия).

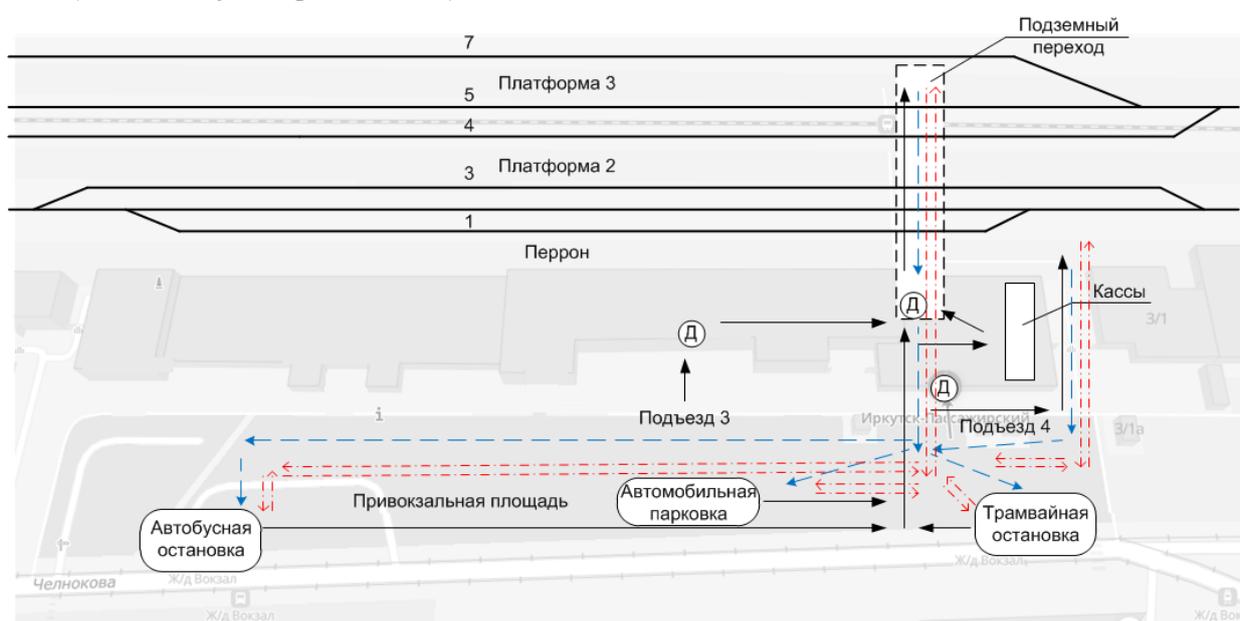


Рис. 2. Схема основных пассажиропотоков

Можно видеть, что эти пассажиропотоки проходят через функциональные элементы в двух направлениях: А) с транспортного средства на вокзал, Б) обратно. В первом случае транспортное средство – источник пассажиропотока, платформа, на которую высаживаются пассажиры – очередь, а двери в подземный переход (или вокзал) на платформе – обслуживающие устройства. Во втором случае транспортное средство – обслуживающее устройство, а платформа, с которой осуществляется посадка – очередь. Примем, что пассажиропотоки в обоих направлениях независимы. В этом случае работу функциональных элементов можно представить в виде двух СМО с конечными очередями.

Работу ж/д станции мы описываем двумя узлами (СМО): Узел-А обрабатывает пассажиров направления А, Узел-Б – направления Б. Каждой СМО отводится половина доступной вместимости двух платформ и перрона. Также половину от доступных на платформах дверей (ворот) мы отдаем для пассажиров направления А. Вторую половину – для выходящих из туннеля пассажиров.

- Ж/д станция: Узел-А1 и Узел-Б1 – пятиканальные СМО с очередью на 1906 мест.

Описание работы подземного перехода отличается только тем, что он сообщается со зданием вокзала через 4 двери, а с платформами через 8 дверей.

- Подземный переход: Узел-А2 – двухканальная СМО с очередью на 94 места, Узел-Б2 – четырехканальная СМО с очередью на 94 места.

В здании вокзала очередью мы считаем пригородный павильон и зал ожидания, а каналами – одну рамку металлоискателя, ведущую на остановки городского транспорта, и две двери в подземный туннель. Треть от вместимости пригородного павильона мы отводим следующим на автобусы пассажирам, треть – для очереди перед кассами, оставшуюся треть и вместимость зала ожидания – для пассажиров, которые направляются на ж/д станцию.

- Функционирование вокзала опишем тремя СМО: Узел-А3 (дверь к остановкам) – одноканальная СМО с очередью на 75 мест, Узел-Б3 (кассы) – двухканальная СМО с очередью на 76 мест, Узел-Б4 (двери в подземный переход) – двухканальная СМО с очередью на 379 мест.

На привокзальной площади имеется парковка, которая занимает две трети доступной территории. Поэтому пешеходам отводится 946,4 кв.м. Следовательно вместимость привокзальной площади составляет 946 чел. при расчете 1 кв.м / чел. Половину отведем для следующих в здание вокзала пассажиров, половину – для пассажиров, направляющихся на остановки городского транспорта.

- Функционирование остановок опишем одной трехканальной СМО с очередью 473 места – Узел-А4 (Парковка, Автобусная остановка 1 и Трамвайная остановка), а вход в здание вокзала (2 двери) – двухканальной СМО с очередью на 473 мест – Узел-Б5.

*Характеристики работы каналов в СМО.* Узлы А1, А2, А3, Б2, Б4 и Б5 описывают работу дверей (рамок металлоискателей), Узел-Б3 – касс. В них заявки обслуживаются по одной. Среднюю пропускную способность дверей и рамок металлоискателей положим равной 20 чел./мин, касс – 2 чел./мин.

Узлы Б1 и А4 моделируют работу транспортных средств, в которых пассажиры обслуживаются группами. Для большей части маршрутов остановка при ВК И-П является промежуточной. Поэтому мы считаем, что транспортные средства прибывают на остановки при ВК И-П, заполненными наполовину. Тогда максимальный размер обслуживаемой группы в каналах Узла Б1 равен 235 заявок, в первом канале Узла-А4 – 3 заявки (Парковка), во втором канале Узла-А4 – 55 заявок (Автобусная остановка 1), а в третьем канале Узла-А4 – 72 заявки (Трамвайная остановка). Интенсивность обслуживания в каналах Узла Б1 равна 1/30

групп/мин, в первом канате Узла-А4 – 7,9 групп/мин, во втором канале – 15 групп/мин, в третьем канале – 5,5 групп/мин (см. раздел Объект моделирования).

В терминах теории массового обслуживания модель работы ВК И-П будет иметь вид СеМО, состоящей из 11 узлов. Ее схема в виде графа представлена на рис. 3. Далее при описании узлов используется код Кендалла: первая и вторая позиции – символ или их комбинация, третья и четвертая – числа. Первая позиция обозначает входящий поток заявок, вторая – распределение времени обслуживания заявок ( $M$  – экспоненциальное) и размер обслуживаемой группы ( $X$  – групповое обслуживание), третья – число каналов, четвертая – максимальная длина очереди.

1. Узел-А0 – источник  $ВМАР-а$ ;
2. Узел-А1 –  $ВМАР- / M / 5 / 1906$ ;
3. Узел-А2 –  $* / M / 2 / 94$ ;
4. Узел-А3 –  $* / M / 1 / 75$ ;
5. Узел-А4 –  $* / M^X / 3 / 473$ ;
6. Узел-Б0 – источник  $ВМАР-б$ ;
7. Узел-Б1 –  $* / M^X / 5 / 1906$ ;
8. Узел-Б2 –  $* / M / 4 / 94$ ;
9. Узел-Б3 –  $* / M / 2 / 76$ ;
10. Узел-Б4 –  $* / M / 2 / 379$ ;
11. Узел-Б5 –  $ВМАР-б / M / 2 / 473$ .

Маршрутная матрица  $P$  строится на основе движения пассажиропотоков I, II и III. Опустим ее представление, так как, во-первых, она сильно разрежена и имеет большой размер, во-вторых, неинформативна. Вероятности переходов заявок между узлами представлены в виде весов на рис. 3.

Прямые стрелки на нем обозначены направления движения заявок, пунктирными – обратная связь. Последняя представляет собой временную блокировку каналов узла в случае, когда в следующем узле нет места для принятия заявок с текущего.

В полученной СеМО заявки поступают группами случайного размера, имеется большое число узлов, которые соединены между собой как прямыми, так и обратными связями, при этом часть узлов обслуживает заявки группами. Поэтому аналитически найти показатели ее эффективности в общем случае не удалось. В такой ситуации, как правило, используются численные методы, в частности, в настоящее время для исследования математических моделей пассажирских транспортных систем популярным является имитационное моделирование [14, 15]. Это требует разработки и программной реализации имитационной модели, что выходит за рамки данной статьи, но предполагается в дальнейшем.

**Заключение.** В настоящее время планируется реконструкция вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский и создание на его основе крупного транспортного узла, поэтому в статье предложена математическая модель его работы в виде сети массового обслуживания с  $ВМАР$ -потоками. Такого рода модели описывают систему укрупненно, т.е. элементы учитываются обобщенно. Тем не менее на основе данного математического аппарата нам удалось построить модель, детализации которой достаточно для решения различных инженерных задач, в частности определения «узких мест» в структуре выбранного объекта.

Дальнейшая работа предполагает разработку и программную реализацию численных методов исследования СеМО с двумя и более  $ВМАР$ -потоками, проведение вычислительных

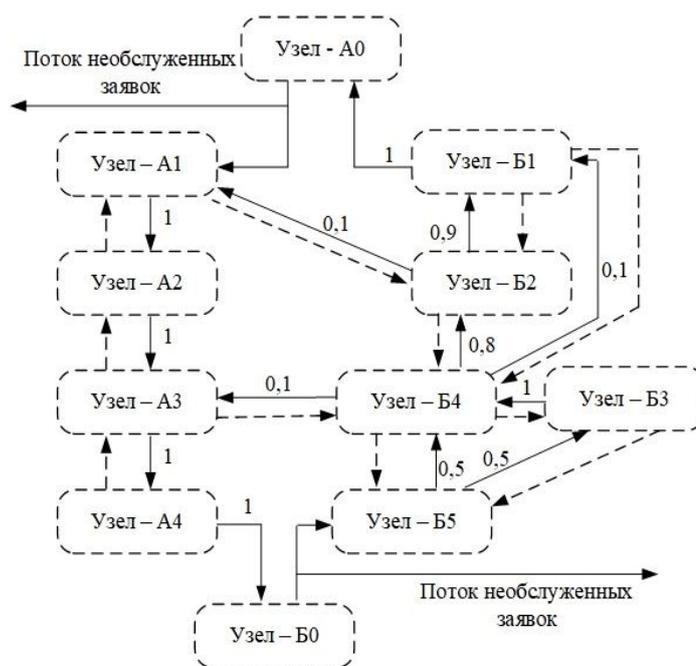


Рис. 3. Схема СеМО

экспериментов по исследованию предложенной модели ВК И-П и выработку рекомендаций по улучшению работы этого вокзального комплекса. Затем в модели планируется учет конкретных мер и мероприятий, которые связаны с будущей реконструкцией данного вокзала. Это позволит определить их эффективность перед внедрением.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 20-010-00724, РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 20-47-383002.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 19 марта 2019 года №466-р «Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 г.» URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 29.01.2021).
2. Журавская М.А., Казаков А.Л., Парсюрова П.А. О размещении остановочных пунктов при осуществлении мультимодальных пассажирских перевозок // Транспорт Урала. 2012. № 4 (35). С. 50-53.
3. Брусянин Д.А., Казаков А.Л., Маслов А.М. Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов // Транспорт Урала. 2012. № 1(32). С. 106-109.
4. Программа комплексного развития транспортной инфраструктуры города Иркутска на 2016 - 2025 годы / Дума г. Иркутска, решение от 30 сентября 2016 года № 006-20-250396/6.
5. Шубко В.Г. [и др.] Железнодорожные станции и узлы. М.: УМК МПС России. 2002. 368 с.
6. Михайловская Т.В., Михалев А.И., Гуда А.И., Новикова Е.Ю. Моделирование движения пассажиропотока с использованием клеточно-автоматного подхода // Автомобильный транспорт. 2009. № 25. С. 250–253.
7. Козлов П.И., Власов Д.Н. Оценка параметров качества обслуживания пассажиров в транспортно-пересадочных узлах // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5 (104). С. 529–536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536.
8. Аршинский Л.В., Бутырина Ю.О., Тирских В.В. Проблемы и моделирование пригородного железнодорожного сообщения на основе теории систем массового обслуживания // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2016. № 17. С. 28–33.
9. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. М.: Физматлит. 2005. 295 с.
10. Жарков М.Л., Казаков А.Л., Лемперт А.А. Определение критических показателей работы транспортно-пересадочного узла на основе многофазной системы массового обслуживания // Вестник УрГУПС. 2017. № 3 (35). С. 40-52. DOI:10.20291/2079-0392-2017-3-40-52.
11. Жарков М.Л. Математическая модель и программный комплекс для определения статистических параметров пассажиропотоков в транспортных системах // Вестник ИрГТУ. 2018. Т. 22. № 2 (133). С. 45-56. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-45-56.
12. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ. 2000. 176 с.

13. Об утверждении Типовых требований к размещению, эксплуатации, обслуживанию и ремонту пассажирских обустройств на железнодорожных линиях/ Распоряжение ОАО РЖД от 04.06.2013 г. № 1252 р.
14. Евреенова Н.Ю. Применение имитационного моделирования при управлении работой транспортно-пересадочного узла // Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 8–12.
15. Ерофеев А.А., Рибиченок А.Ю. Моделирование пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. 2019. № 2 (39). С. 61–64.

**UDK 519.872.5:656.01**

## **SIMULATION OF THE OPERATION OF THE IRKUTSK-PASSENGER RAILWAY STATION COMPLEX BASED ON QUEUING NETWORKS**

**Maksim L. Zharkov,**

PhD, Researcher, e-mail: [zharkm@mail.ru](mailto:zharkm@mail.ru),

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory  
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
134, Lermontova st., 664033, Irkutsk, Russia;

**Anton V. Suprunovsky,**

S. Lecturer, e-mail: [as.irgups@gmail.com](mailto:as.irgups@gmail.com),

Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky st., 664074, Irkutsk, Russia.

**Annotation.** The paper proposes a mathematical model of the operation of the station complex Irkutsk-Passazhirsky on the basis of the queuing theory. This model can be used to scientifically substantiate the planned measures during the reconstruction of this facility and to create of a regional transport interchange hub on its basis. We are used a *BMAP* model to describe a complex incoming passenger flow. *BMAP* makes it possible to take into account the presence of several substreams with different parameters. To describe the passenger service process a queuing network is used. It makes it possible to describe in detail the structure and movement of passenger flows within the system.

**Keywords.** mathematical modeling, queuing networks, *BMAP* flow, railway station complex.

**Acknowledgements.** The reported study was funded by RFBR project number 20-010-00724, by RFBR and the Government of the Irkutsk Region, project number 20-47-383002.

### REFERENCES

1. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 19 marta 2019 goda №466-r «Ob utverzhdenii programmy razvitiya OAO «RZHD» do 2025 g.» [Order of the Government of the Russian Federation of March 19, 2019 No. 466-r "On approval of the development program of JSC Russian Railways until 2025"] URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (29.01.2021).
2. Zhuravskaya M.A., Kazakov A.L., Parsyurova P.A. O razmeshchenii ostanovochnykh punktov pri osushchestvlenii mul'timodal'nykh passazhirskikh perevozok [On the placement of stopping points in the implementation of multimodal passenger transportation] //Transport of the Urals = Transport of the Urals. 2012. № 4 (35). P. 50-53.
3. Brusyanin D.A., Kazakov A.L., Maslov A.M. Optimizatsiya regional'noy marshrutnoy seti mezhdugorodnykh i prigorodnykh passazhirskikh perevozok s ispol'zovaniyem logisticheskikh printsiptov [Optimization of the regional route network of intercity and suburban passenger transportation using logistic principles] // Transport of the Urals = Transport of the Urals. 2012. № 1 (32). P. 106-109.

4. Programma kompleksnogo razvitiya transportnoy infrastruktury goroda Irkutsk na 2016 - 2025 gody [Program for the integrated development of the transport infrastructure of the city of Irkutsk for 2016 – 2025] / Duma of Irkutsk, decision of September 30, 2016 № 006-20-250396 / 6.
5. Shubko V.G. [and others] Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly. [Railway stations and junctions]. Moscow: UMK MPS of Russia = UMK Ministry of Railways of Russia. 2002. 368 p.
6. Mikhailovskaya T.V., Mikhalev A.I., Guda A.I., Novikova E.Yu. Modelirovaniye dvizheniya passazhiropotoka s ispol'zovaniyem kletочно-автоматного podkhoda [Modeling of passenger traffic using the cellular automata approach] // Avtomobil'nyy transport = Automobile transport. 2009. № 25. P. 250–253.
7. Kozlov P.I., Vlasov D.N. Otsenka parametrov kachestva obsluzhivaniya passazhirov v transportno-peresadochnykh uzlakh [Assessment of the parameters of the quality of passenger service in transport interchange hubs] // Vestnik MGSU = Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12. № 5 (104). P. 529-536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536.
8. Arshinsky L.V., Butyrina Yu.O., Tirskikh V.V. Problemy i modelirovaniye prigorodnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya na osnove teorii sistem massovogo obsluzhivaniya [Problems and modeling of suburban railway traffic based on the theory of queuing systems] // Informatsionnyye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh system = Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems. 2016. № 17. P. 28–33.
9. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing theory]. Moscow: Fizmatlit = Fizmatlit. 2005. 295 p.
10. Zharkov M.L., Kazakov A.L., Lempert A.A. Opredeleniye kriticheskikh pokazateley raboty transportno-peresadochnogo uzla na osnove mnogofaznoy sistemy massovogo obsluzhivaniya [Determination of critical indicators of the operation of a transport interchange hub based on a multiphase mass service system] // Vestnik UrGUPS = Bulletin of UrGUPS. 2017. № 3 (35). P. 40-52. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-3-40-52.
11. Zharkov M.L. Matematicheskaya model' i programmnyy kompleks dlya opredeleniya statisticheskikh parametrov passazhiropotokov v transportnykh sistemakh [Mathematical model and software package for determining the statistical parameters of passenger traffic in transport systems] // Vestnik IrGTU = Bulletin of ISTU. 2018. Vol. 22. № 2 (133). P. 45-56. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-45-56.
12. Dudin A.N., Klimenok V.I. Istemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami [Queuing systems with correlated flows] Minsk: BGU = Minsk: BSU, 2000. 176 p.
13. Ob utverzhdenii Tipovykh trebovaniy k razmeshcheniyu, ekspluatatsii, obsluzhivaniyu i remontu passazhirskikh obustroystv na zheleznodorozhnykh liniyakh [On approval of Standard requirements for the placement, operation, maintenance and repair of passenger facilities on railway lines] // Rasporyazheniye OAO RZHD ot 04.06.2013 g. = Order of JSC Russian Railways dated 04.06.2013. № 1252.
14. Evreenova N.Yu. Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya pri upravlenii rabotoy transportno-peresadochnogo uzla [The use of simulation modeling in managing the operation of a transport interchange hub] // Nauka i tekhnika transporta = Science and technology of transport. 2020. № 2. P. 8-12.
15. Erofeev A.A., Ribichenok A.Yu. Modelirovaniye passazhiropotokov v transportno-peresadochnykh uzlakh [Modeling of passenger traffic in transport interchange hubs] // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta = Bulletin of the Belarusian State University of Transport. 2019. № 2 (39). P. 61–64.