

О моделировании железнодорожных узлов на основе теории массового обслуживания

Жарков Максим Леонидович¹, Супруновский Антон Викторович²

¹ Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Россия, Иркутск, zharkm@mail.ru

² Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск, as.irgups@gmail.com

Аннотация. В работе предложена методика математического моделирования движения поездов по железнодорожным узлам, основанная на применении сетей массового обслуживания специального вида. Моделирование железнодорожных узлов является актуальной задачей из-за их важности для обеспечения грузо- и пассажироперевозок, а также межрегионального экономического взаимодействия. Применение сетей массового обслуживания позволяет учесть влияние случайных факторов на работу узлов и отобразить в модели структурные особенности конкретного объекта. Для апробации методики выбран один из крупнейших узлов Транссибирской магистрали. В статье построена модель его работы в виде сети массового обслуживания с двумя входящими потоками заявок, выполнено ее численное исследование, по результатам которого определены максимальная допустимая нагрузка и «узкие места» в структуре транспортно-перевозочной системы, и выработаны рекомендации по увеличению ее пропускной способности.

Ключевые слова: железнодорожный узел, транспортный поток, математическая модель, теория массового обслуживания, вычислительный эксперимент

Цитирование: Жарков М.Л., Супруновский А.В. О моделировании железнодорожных узлов на основе теории массового обслуживания // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 1 (25). – С. 120-132. – DOI:10.38028/ESI.2022.25.1.010.

Введение. Под железнодорожным узлом понимается совокупность нескольких взаимодействующих между собой железнодорожных станций на относительно небольшой территории [1]. При их исследовании обычно применяют методы математического моделирования, так как а) они обладают высокой сложностью из-за большого числа составных элементов и связей между ними, которые необходимо учитывать; б) проведение натуральных экспериментов связано с большими трудностями, либо попросту невозможно.

Наиболее распространенными математическими моделями на железнодорожном транспорте и в транспортной логистике являются оптимизационные [2, 3], которые применяются как на грузовом, так и на пассажирском [4] транспорте. Используются также и стохастические модели [5], которые позволяют учесть влияние случайных факторов. Особенно существенное влияние они оказывают на входящий транспортный поток [6]. Обычно из-за сложности железнодорожных транспортных систем их математические модели приходится исследовать численно, в частности, с применением методов имитационного моделирования [7–9].

В настоящее время для исследования железнодорожных узлов чаще всего применяются система имитационного моделирования ИМЕТРА [7,8] и различные библиотеки AnyLogic, в частности, «железнодорожные перевозки» или Enterprise Library [9]. При очевидном удобстве, использование данных инструментов сопряжено и с определенными сложностями. Во-

первых, они не обладают достаточной гибкостью. В частности, в структуре железнодорожного узла возможно присутствие нетиповых элементов: специализированных станций или станций с особенностями структуры. Во-вторых, нам не удалось найти исчерпывающего описания математического аппарата, поэтому остается открытым вопрос о точности моделирования. Так, в [9], по-видимому, используются модели теории массового обслуживания, однако адекватность описания транспортных потоков, на наш взгляд, недостаточна.

Ранее с участием авторов был разработан новый подход к моделированию работы сортировочных и пассажирских железнодорожных станций с использованием сетей массового обслуживания (СМО) с входящим ВМАР-поток [10, 11]. Для анализа получаемых моделей используется имитационное моделирование. Это позволило избежать проблем, описанных выше. В данной работе указанный подход адаптирован для более крупных систем – железнодорожных узлов, что потребовало его значительного усовершенствования. Во-первых, мы используем несколько независимых МАР-потоков (частный случай ВМАР-потока) для описания поступления поездов с различных направлений. Это позволяет учесть параметры поездопотоков, зависящие от категории поездов и направления их движения. Во-вторых, работа станций и участков железной дороги между ними моделируется одним или более узлами СМО. Благодаря этому в модели удастся отобразить при минимальных трудозатратах: а) сложную иерархическую структуру системы, в которой отдельные категории поездов имеют разные маршруты; б) различные параметры и особенности работы станций, а также пропускную способность участков железной дороги.

Объектом для апробации подхода выбран Иркутский железнодорожный узел (далее – ИЖУ) – один из крупнейших на Транссибирской магистрали.

1. Объект исследования. ИЖУ имеет протяженность порядка 60 км и включает восемь станций: Суховская, Мегет, Батарейная, Иркутск-Сортировочный, Военный городок, Иркутск-Пассажирский, Кая и Гончарово. Помимо главного хода Транссибирской магистрали, имеется и обходной путь от станции Иркутск-Сортировочный до станции Гончарово, который предназначен для пропуска транзитных поездов в обход станции Иркутск-Пассажирский. Схема Иркутского узла представлена на рис. 1.

Рассмотрим станции ИЖУ:

- Суховская является крупной грузовой станцией, в составе которой имеется парк приема на 6 путей, сортировочный парк на 18 путей с сортировочной горкой, и грузовой двор, в котором могут загружаться до четырех поездов за сутки. Также в ее структуру включены два приемоотправочных парка (ПОП) по 7 и 13 путей для отправки обработанных на этой станции поездов и остановки транзитного сообщения без переработки.

Остальные грузовые станции имеют меньший размер. Они состоят из одного ПОП и нескольких путей необщего пользования, где ведется грузовая работа (далее – грузовой фронт). С учетом главного хода:

- станция Батарейная имеет – 9 путей;
- станция Гончарово также – 9 путей;
- станция Военный городок – 4 пути;

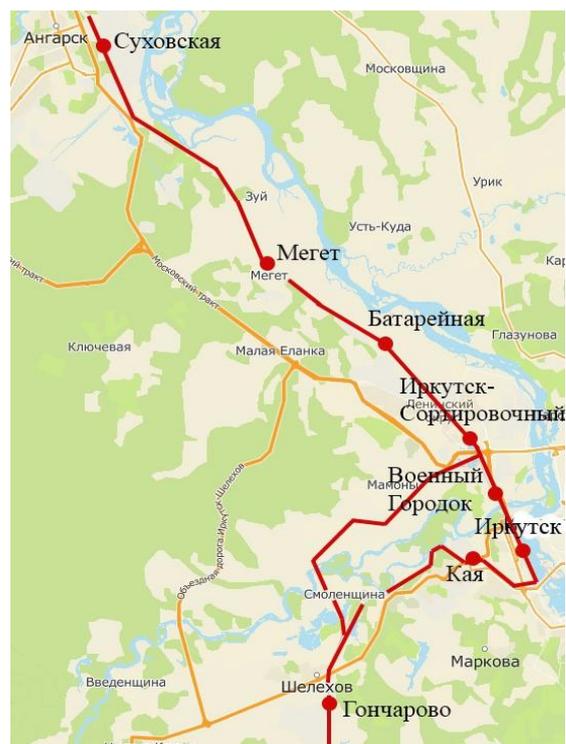


Рис. 1. Схема Иркутского узла

- станция Кая – 10 путей;
- станция Мегет имеет один парк на 9 путей, включая главный ход; она предназначена для пропуска или кратковременной остановки поездов;
- Иркутск-Сортировочный состоит из двух систем, каждая из которых включает три последовательно расположенных парка: парки приема и парки отправления имеют по 8 путей, четный сортировочный парк – 24 пути, а нечетный – 18; в этих системах работают по 4 бригады отправления, обрабатывающие как местные, так и транзитные поезда;
- станция Иркутск-Пассажирский включает две части: пассажирская состоит из 8 путей: 2 – главный ход, 5 путей с платформами, на которых ведутся работы с пассажирскими поездами, и один технический путь без платформы; грузовая часть – грузовой фронт, на котором можно разместить до четырех поездов; грузовой поездопоток в основной массе проходит транзитом по станции.

Участки железной дороги между станциями (далее – участки) имеют различное число путей: с запада до Суховской, станции Мегет и Батарейной – 3; Батарейная – Иркутск-Сортировочный – 4; Иркутск-Сортировочный – Гончарово – 2, от Гончарово и на восток – 3, на обходном пути – 2.

По плану среднесуточный поездопоток, который проходит через Иркутский железнодорожный узел, в восточном направлении составляет 76 транзитных, 25 местных и 18 пассажирских поездов, в западном – 71, 30 и 18 поездов соответственно. Также курсируют 14 электричек, которые имеют минимальные время стоянки на станциях и значение занятости пути. Поэтому далее данная категория поездов не рассматривается при моделировании. Среднесуточное количество формируемых грузовых поездов по станциям: Суховская – 4 поезда; Батарейная и Иркутск-Пассажирский – по 3; Военный городок и Кая – по 0,5; Гончарово – 1; Иркутск-Сортировочный – по 25 в западной и восточной системах.

2. Методика моделирования работы железнодорожных узлов. При построении модели мы выделяем две группы элементов, для описания которых необходимо использовать различный математический аппарат: входящие поездопотоки и инфраструктурные элементы узла. Они моделируются в три этапа: 1) описание входящих поездопотоков; 2) моделирование работы инфраструктурных элементов; 3) учет в модели маршрутов движения поездов в системе и других ее особенностей.

Математическое описание входящий поездопотоков. Как правило, поезда поступают с двух и более направлений. При этом имеется несколько категорий поездов с различной интенсивностью поступления составов. Для моделирования входящего поездопотока с каждого направления используется отдельный МАР-поток [10–12]. Под заявкой понимается весь поезд целиком.

Математическое описание функционирования элементов железнодорожных узлов. К элементам железнодорожного узла относятся участки между станциями и, собственно, сами станции. В них выполняются, соответственно, два класса операций над поездами: а) пропуск по путям; б) обработка на станциях. Операции обоих классов являются однотипными и регулярно повторяются, а их продолжительность подвержена воздействию случайных факторов, что позволяет использовать модельный аппарат ТМО. Каждый элемент железнодорожных узлов, в зависимости от типа, описывается одной или более системами массового обслуживания (далее СМО или узлы). В каждой СМО каналы моделируют работу путей главного хода на участке или обслуживающих устройств на станции. Длина очереди определяется количеством поездов, которые могут остановиться на участке или станции в ожидании обслужи-

вания. Распределение времени обслуживания в каналах СМО подбирается в соответствии с пропускной способностью рассматриваемого участка или станции.

Описание маршрутов движения поездов и других его особенностей. Участки и станции образуют нелинейную иерархическую структуру, в которой может быть несколько маршрутов движения поездов. При этом поезд вынужден остановиться и ожидать освобождения участка на пути его следования или места на станции. Это означает, что между структурными элементами железнодорожного узла имеются обратные связи. Математическое описание маршрутов движения строится в виде маршрутной матрицы. Ее элементы – вероятности переходов между узлами СеМО [10] – определяются, как относительная частота (отношение числа поездов, поступающих в конкретный узел, к общему числу поездов для одного направления). Обратная связь задается в виде временной блокировки каналов предыдущей СМО до тех пор, пока в следующей не освободится достаточно места для принятия заявок. Построенные на предыдущих шагах МАР-потоки и СМО, а также маршрутная матрица составляют СеМО.

Исследование СеМО из-за большого количества узлов и их взаимосвязей, как правило, выполняется с помощью численных методов, наиболее распространённым из которых является имитационное моделирование [10, 11]. С его помощью возможно определить показатели эффективности СеМО: вероятность отказа, абсолютную пропускную способность, время пребывания заявки в системе и отдельно в узле, число занятых каналов и длину очереди, время блокировки каналов в узлах. На их основе затем делается вывод об эффективности работы выбранного объекта и определяются «узкие места» в его структуре.

3. Построение модели работы Иркутского железнодорожного узла. *Первый этап* – построение модели общего поездопотока. По плану в сутки через ИЖУ проходит 119 поездов трех категорий в восточном и столько же в западном направлениях. Поездопоток каждого из них мы описываем отдельным МАР-потоком: *МАР-В* – восточное и *МАР-З* – западное. Суммарная интенсивность поступления заявок составляет $\lambda_B = \lambda_3 = 4,96$ в час для каждого потока (направления). В качестве вероятностей поступления заявок из отдельного подпотока берутся относительные частоты. Тогда матрицы МАР-потоков будут иметь вид [11, 12]:

$$D_{B0} = \begin{pmatrix} -4,96 & 0 & 0 \\ 0 & -4,96 & 0 \\ 0 & 0 & -4,96 \end{pmatrix}, D_{B1} = \begin{pmatrix} 3,17 & 1,04 & 0,75 \\ 3,17 & 1,04 & 0,75 \\ 3,17 & 1,04 & 0,75 \end{pmatrix},$$

$$D_{30} = \begin{pmatrix} -4,96 & 0 & 0 \\ 0 & -4,96 & 0 \\ 0 & 0 & -4,96 \end{pmatrix}, D_{31} = \begin{pmatrix} 2,96 & 1,25 & 0,75 \\ 2,96 & 1,25 & 0,75 \\ 2,96 & 1,25 & 0,75 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Второй этап – описание структурных элементов ИЖУ в виде СМО. Сперва моделируется функционирование главного хода, затем – станций.

На ИЖУ мы выделяем восемь участков (по числу станций) и обходной путь. Последний имеет достаточную протяженность, чтобы одновременно пропускать три поезда в одном направлении. Поэтому условно разделим его на три участка. По этим 11 участкам поезда следуют в двух направлениях, их работу моделируем двумя СМО: узлы 1–11 описывают движение поездов в восточном направлении, узлы 12–22 – в западном. узлы 5–10, 13, 14, и 18 моделируют работу обходного пути.

При описании участка в виде СМО путь, по которому движутся поезда, считается каналом, а число путей в приемоотправочных парках на станции этого участка определяет максимальную вместимость очереди (узлы 1, 2, 11, 12 и 20–22). Если приемоотправочного парка нет на станции, или поезда могут произвести остановку в нем только для дальнейшей пере-

работки на этой же станции, то в СМО, которые описывают выбранный участок, не будет очереди (узлы 3–10 и 13–19). Каждому узлу отводится половина доступных путей главного хода. Время прохода поезда по участку было получено на основе натуральных наблюдений и составляет 6–10 минут. Это время мы считаем случайной величиной, распределенной по нормальному закону [10]. Тогда время обслуживания поездов в узлах 3 и 4–17 описывается нормальным распределением $N(8; 0,67)$, где первый параметр – математическое ожидание – равно среднему времени прохода поезда по участку $6+(10-6)/2=8$ (в мин.), второй – ср. квадратическое отклонение, который подобран по «правилу трех сигм» и равен $(10-8)/3=0,67$ мин. В случае если путей на участке нечетное количество, то один из них не учитывается, а его пропускная способность поровну добавляется к пропускной способности остальных путей (узлы 1, 2, 11 и 20–22). Следовательно, время обслуживания поездов в узлах 1, 2, 11 и 18–22 подчиняется $N(5,2; 0,67)$, т.е. математическое ожидание уменьшено на 35%.

Таким образом работу главного хода ИЖУ моделируем с помощью 22-х узлов. В терминах ТМО они будут иметь следующий вид [12]: узел 1 – $MAP-B/G/1/12$; узлы 2 и 21 – $*/G/1/3$; узлы 3, 4 и 5 – $*/G/2/0$; узлы 6–10 – $*/G/1/0$; узел 11 – $*/G/1/3$; узел 12 – $MAP-3/G/2/4$; узлы 13–17 – $*/G/1/0$; узлы 18 и 19 – $*/G/2/0$; узел 20 – $*/G/1/1$; узел 22 – $*/G/1/6$.

Работа станций, в зависимости от типа, описывается в виде одной или нескольких СМО. Грузовые станции Суховская, Батарейная, Военный городок, Кая, Гончарово и грузовой фронт на станции Иркутск-Пассажи́рский моделируются с помощью одноканальных СМО (узлы 23, 24, 27, и 29–31). Модель сортировочной станции Иркутск-Сортировочный строится в виде двух четырехканальных СМО, которые описывают работу ее восточной и западной систем (узлы 25 и 26). Максимальная длина очереди в СМО определяется суммарным числом путей на соответствующих станциях (см. раздел «Объект исследования»). Пассажи́рская станция Иркутск-Пассажи́рский имеет 8 путей, из которых мы не учитываем два пути главного хода и технический путь. Тогда модель ее работы будет иметь вид пятиканальной СМО без очереди (узел 28). В терминах ТМО модели описанных станций имеют следующий вид: узел 23 – $*/G/1/24$; узел 24 – $*/G/1/7$; узел 25 – $*/G/4/38$; узел 26 – $*/G/4/40$; узел 27 – $*/G/1/6$; узел 28 – $*/G/5/0$; узел 29 – $*/G/1/3$; узел 30 – $*/G/1/8$; узел 31 – $*/G/1/6$. Распределения времени обслуживания заявок в каналах следующие, все параметры указаны в минутах: узел 23 – $N(288; 20)$; узел 24 – $N(360; 24)$; узлы 25 и 26 – $N(91; 15)$; узлы 27 и 30 – $N(720; 60)$; узел 28 – $N(40; 6)$; узел 29 – $N(206; 15)$; узел 31 – $N(480; 30)$.

Выше был описан 31 узел. К ним необходимо добавить еще два фиктивных, которые выступают в качестве источников потоков заявок [10, 11]: узел 0 для $MAP-B$ и узел 32 для $MAP-3$. Таким образом, модель работы ИЖУ включает 33 узла и два MAP -потока. Схема полученной СеМО представлена на рис. 2. На нем круги обозначают узлы, которые описывают работу участков, а эллипсы – работу станций, жирными стрелками отмечен главный ход и обходной путь.

Третий этап – описание маршрутов движения поездов строится в виде маршрутной матрицы. Она будет разреженной, из-за того, что поезда могут передвигаться между станциями только по главному ходу, и, следовательно, неинформативной. Поэтому маршрутную матрицу мы не приводим, а вероятности переходов между узлами представлены на рис. 2 в виде весов.

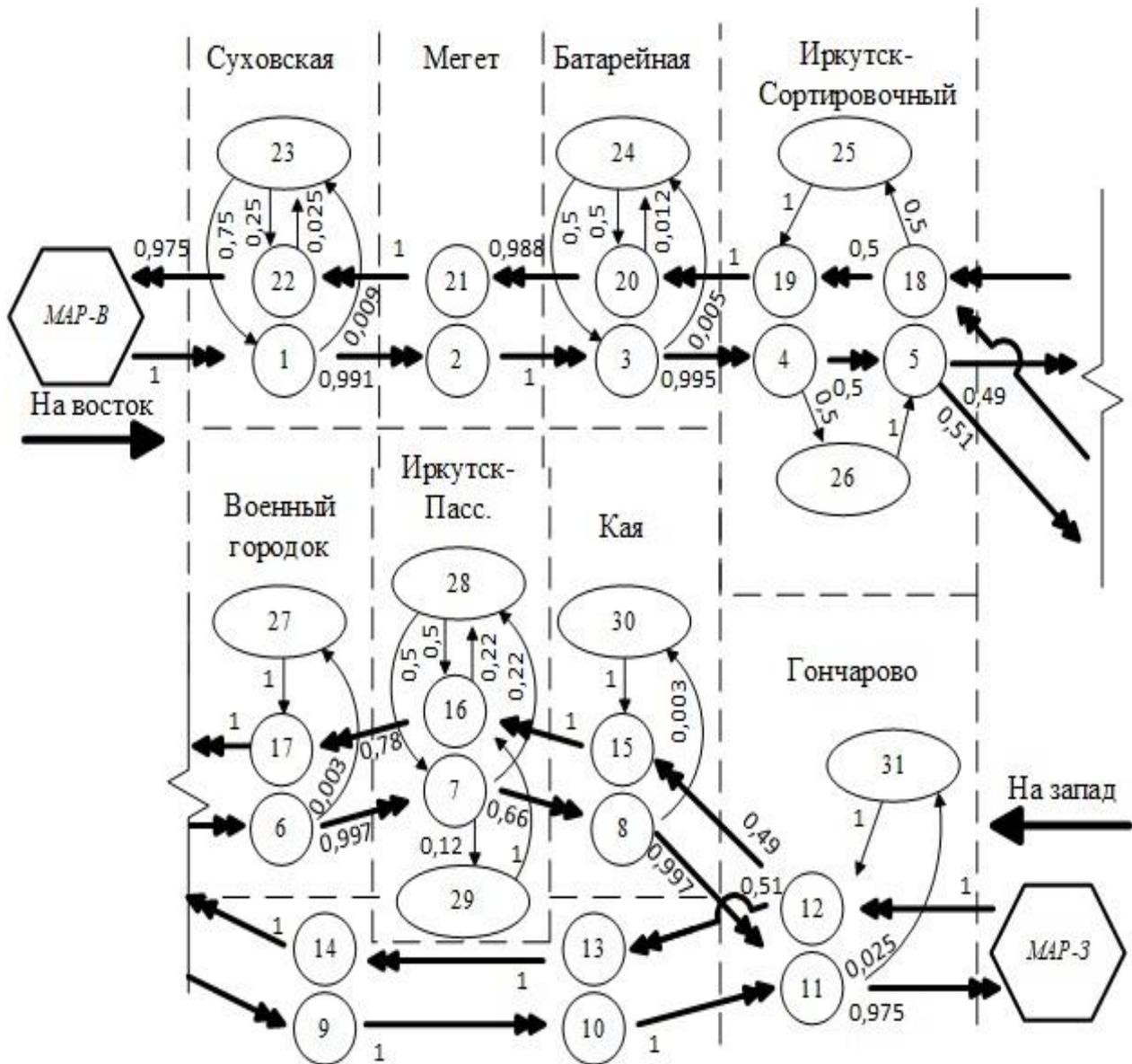


Рис. 2. Схема СеМО, описывающей работу Иркутского железнодорожного узла

Далее приведено исследование полученной СеМО с помощью имитационной модели, которая позволяет найти показатели эффективности. Она входит в состав интеллектуальной системы [13], краткое описание которой представлено в конце статьи.

4. Вычислительный эксперимент. Далее в табл. 1 и 2 представлены результаты двух экспериментов, в которых моделируется работа вышеописанной СеМО при разных параметрах. В каждой таблице приведены средние результаты за десять пусков имитационной модели. Виртуальное время моделирования для каждого пуска составило 30 дней. Это минимальное значение, за которое имитационная модель может получить показатели эффективности данной СеМО.

Эксперимент 1. В табл. 1 представлены результаты моделирования при текущем поездопотоке, т.е. 119 поездов в сутки или $\lambda_{\text{в}} = \lambda_{\text{з}} = 4,96$ поезда в час для каждого направления. Они описываются матрицами (1).

Таблица 1. Результаты эксперимента 1

Общие показатели эффективности СеМО								
Поступило заявок	7101,0	P_{loss}	0,0008	T_{B1}	2,21	T_{B2}	2,05	
Отклонено заявок	5,3	T_{lock}	8,35	T_{31}	1,66	T_{32}	1,49	
Показатели эффективности отдельных узлов (время измеряется в минутах)								
	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8
K	0,47	0,47	0,68	0,55	0,65	0,39	0,46	0,31
L	0,21	0,02	-	-	-	-	-	-
T_y	7,91	5,77	21,28	40,86	23,66	9,47	8,59	8,52
T_l	0	32,4	84,8	941,4	2746,4	1669,6	186,6	16,5
	Узел 9	Узел 10	Узел 11	Узел 12	Узел 13	Узел 14	Узел 15	Узел 16
K	0,37	0,37	0,44	0,75	0,38	0,38	0,40	0,49
L	-	-	0,07	0,08	-	-	-	-
T_y	8,55	8,51	6,39	9,98	8,57	8,54	9,85	8,58
T_l	66,6	33,0	9,0	3539,8	107,6	64,3	2360,8	166,0
	Узел 17	Узел 18	Узел 19	Узел 20	Узел 21	Узел 22	Узел 23	Узел 24
K	0,38	0,58	0,61	0,48	0,49	0,48	0,88	0,43
L	-	-	-	0,08	0,03	0,02	3,08	0,14
T_y	8,55	22,45	21,83	6,46	6,02	5,62	1295,00	498,74
T_l	83,5	869,8	234,2	0,0	1817,5	0	21,0	6,0
	Узел 25	Узел 26	Узел 27	Узел 28	Узел 29	Узел 30	Узел 31	
K	3,99	3,99	0,21	1,16	0,97	0,09	0,88	
L	32,73	34,46	0,04	-	2,00	-	1,97	
T_y	920,28	961,76	917,68	3270,82	664,82	1047,79	1538,68	
T_l	450,0	495,2	13,8	1768,8	497,8	23,0	9,0	

Здесь и далее: K – среднее число работающих каналов; L – средняя длина очереди; T_y – среднее время пребывания заявки в узле; T_l – продолжительность (в мин.) блокировки работы каналов за все время моделирования; P_{loss} – вероятность отказа; T_{lock} – среднее суммарное время (в часах) блокировки в течение суток каналов узлов с 1-го по 22-й; T_{B1} и T_{31} – среднее время (в часах) прохождения поезда по главному ходу ИЖУ в восточном (узлы 1–8 и 11) и западном (узлы 12, 15–22) направлениях; T_{B2} и T_{32} – среднее время (в часах) прохождения поезда по ИЖУ через обходной путь в восточном (узлы 1–5 и 9–11) и западном (узлы 12–14 и 18–22) направлениях.

Наиболее загруженными являются узлы 25 и 26 (станция Иркутск-Сортировочный), среднее число работающих каналов которых близко к максимальному значению (4 шт.), а средняя длина очереди превышает 85% от максимальной ее вместимости. Из-за этого наблюдается продолжительная блокировка работы каналов в узлах 4 и 18. Также и в узлах 4 и 15 имеется значительная блокировка, но уже из-за загрузки узлов 6–8 и 15–17 (главный ход). Это подтверждается параметрами T_{B1} и T_{31} , которые в среднем на 36% больше, чем T_{B2} и T_{32} . Переноса результаты на объект исследования получаем, что ИЖУ имеет достаточную пропускную способность. Среднее суммарное время «простоя» (T_{lock}) в сутки для всех поездов (238 шт.) составляет менее 9 часов, т.е. в среднем 2 минуты на поезд. Этот «простой» образуется в основном из-за большой загрузки станции Иркутск-Сортировочный, а также значительного местного поездопотока и пассажирского сообщения на участке при станции Иркутск-Пассажирский (главный ход).

Пропускную способность Иркутского железнодорожного узла теоретически можно увеличить. В настоящее время имеются планы ВСЖД филиала ОАО «РЖД» по увеличению транзитного поездопотока по ИЖУ на 15 %, что потребует перенаправить на 20% больше поездов этой категории на обходной путь.

Эксперимент 2. В табл. 2 представлены результаты моделирования при увеличении объемов транзитных поездопотоков на 15%, т.е. 87 и 82 поездов в сутки для восточного и западного направлений соответственно. В этом случае интенсивность поступления поездов с каждого направления составит $\lambda_B = \lambda_3 = 5,42$ в час. Также увеличим поездопоток, который проходит через обходной путь на 20%. Для этого в модели изменим вероятности перехода заявок между узлами (см. рис. 2): из узла 5 в узел 6 $p_{5,6} = 0,42$; из узла 5 в узел 9 $p_{5,9} = 0,58$; из узла 12 в узел 13 $p_{12,13} = 0,58$; из узла 12 в узел 15 $p_{12,15} = 0,42$.

Таблица 2. Результаты эксперимента 2

Общие показатели эффективности СеМО								
Поступило заявок	7758,5	P_{loss}	0,0003	T_{B1}	1,89	T_{B2}	1,73	
Отклонено заявок	2,3	T_{lock}	9,00	T_{31}	1,69	T_{32}	1,52	
Показатели эффективности отдельных узлов (время измеряется в минутах)								
	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8
<i>K</i>	0,50	0,50	0,73	0,76	0,78	0,39	0,47	0,31
<i>L</i>	0,26	0,03	-	-	-	-	-	-
<i>Ty</i>	8,28	5,81	20,88	21,63	23,89	9,54	8,60	8,52
<i>T_l</i>	0,0	50,6	258,8	1738,4	2881,8	1840,2	202,2	0
	Узел 9	Узел 10	Узел 11	Узел 12	Узел 13	Узел 14	Узел 15	Узел 16
<i>K</i>	0,42	0,42	0,47	0,84	0,44	0,43	0,41	0,50
<i>L</i>	-	-	0,08	0,11	-	-	-	-
<i>Ty</i>	8,56	8,51	6,43	10,37	8,60	8,56	9,88	8,58
<i>T_l</i>	103,2	0	9,2	4301,0	175,6	100,0	2442,4	185,4
	Узел 17	Узел 18	Узел 19	Узел 20	Узел 21	Узел 22	Узел 23	Узел 24
<i>K</i>	0,39	0,79	0,75	0,52	0,52	0,52	0,95	0,45
<i>L</i>	-	-	-	0,10	0,02	0,02	4,18	0,13
<i>Ty</i>	8,61	23,89	22,11	6,51	5,70	5,72	1556,64	490,35
<i>T_l</i>	180,4	1584,2	143,0	0	0	0	0	8,8
	Узел 25	Узел 26	Узел 27	Узел 28	Узел 29	Узел 30	Узел 31	
<i>K</i>	3,98	3,98	0,20	1,19	0,98	0,08	0,93	
<i>L</i>	34,90	35,92	0,03	-	2,08	-	2,92	
<i>Ty</i>	976,13	1000,48	945,55	3397,68	677,15	1337,77	1986,14	
<i>T_l</i>	724,4	768,4	16,3	1858,6	529,2	16,7	0	

Перенаправление дополнительно 20% транзитного поездопотока на обходной путь привело к снижению времени движения поезда по главному ходу на 17,5% в среднем (T_{B1} , T_{31}), при этом загрузка обходного пути увеличилась незначительно, в среднем на 2% (T_{B2} и T_{32}). Благодаря этому стало возможно увеличить объем транзитных поездов на 15%. Однако появились и негативные эффекты: загрузка станции Иркутск-Сортировочный приблизилась к максимально-возможной; общее время «простоя» в сутки увеличилось на 7,8% в целом.

В обоих экспериментах вероятность отказа больше нуля, что недопустимо для такого типа систем. Однако она незначительна (0,001), и может быть объяснена тем, что в модели не учитывается наличие диспетчерского управления, которое стремится равномерно распре-

делить нагрузку на систему в течение суток и тем самым избежать большого скопления поездов на одном участке.

Таким образом, Иркутский железнодорожный узел справляется с текущей плановой нагрузкой и имеет запас производительности, благодаря которому возможно увеличить объем транзитных поездов на 15%. Однако потребуется перенаправить большую часть этого поездопотока на обходной путь и оптимизировать технологические процессы, проводимые с поездами на станции Иркутск-Сортировочный, в частности, увеличить число бригад технического осмотра. Дальнейшее повышение объемов транзитного поездопотока потребует изменений не только технологического характера, но и технического. Так, необходимо будет провести модернизацию станции Иркутск-Сортировочный и увеличить пропускную способность обходного пути.

5. Интеллектуальная система моделирования и анализа работы СеМО. При участии авторов разработан прототип интеллектуальной системы [13], которая предназначена для автоматизации построения имитационных моделей различных по сложности СеМО, с последующим их исследованием и формированием рекомендаций по улучшению параметров работы. Второстепенной целью ее создания является отчуждение модельно-алгоритмического аппарата от разработчика и предоставление возможности его использования неспециалисту в области теории массового обслуживания.

Опишем кратко архитектуру и основные функции интеллектуальной системы, которая за два года, прошедшие с публикации работы [13], претерпела определенные изменения. Итак, в ней имеется два программных модуля: модуль имитационного моделирования и экспертная система. Первый реализует имитационную модель работы СеМО, в которой допустимо наличие до 100 узлов и нескольких MAP- и VMAP-потоков. Число каналов и длина очереди различны для каждого узла. Каналы работают независимо друг от друга, возможны разные законы распределения времени обслуживания и размеров обслуживаемых групп заявок в каналах. Данный модуль позволяет приближенно находить вероятности состояний и показатели эффективности СеМО, а также проводить многовариантные сценарные расчеты.

Экспертная система предназначена для автоматического анализа результатов имитационного моделирования, в частности, для определения «узких мест» в структуре СеМО, формирования рекомендаций по их устранению и увеличения пропускной способности системы в целом. В этот модуль также включена база знаний экспертов в виде продукционных правил. Экспертная система проводит поиск «узких мест» и выработку рекомендаций по следующему алгоритму:

Шаг 1. Загрузка параметров моделируемой СеМО и требований пользователя к ее пропускной способности. Пользователь может задать необходимую вероятность отказа или абсолютную пропускную способность.

Шаг 2. Модуль имитационного моделирования на основе полученных данных строит соответствующую модель и проводит ее численное исследование.

Шаг 3. Экспертная система с помощью продукционных правил из базы знаний проверяет характеристики СеМО, полученные в результате моделирования. Затем на их основе формирует список «узких мест». Если характеристики соответствуют требованиям пользователя, то выполняется Шаг 5, иначе переходим к Шагу 4.

Шаг 4. Из базы знаний выбираются решения для устранения найденных «узких мест» и вносятся соответствующие изменения в параметры моделируемой СеМО. Далее выполняется Шаг 2.

Шаг 5. Полученные результаты передаются пользователю.

Дополнительно интеллектуальная система также может отображать процесс работы СеМО в графическом виде и сохранять результаты в таблицах MS Excel.

Заключение. В статье представлена методика моделирования работы железнодорожных узлов, позволяющая учесть в модели: поступление различных категорий поездопотоков с двух и более направлений, нелинейную иерархическую структуру системы с несколькими возможными маршрутами движения поездов, а также местные поездопотоки, которые зарождаются на станциях. На основе предложенной методики была построена и исследована модель ИЖУ. В результате установлено, что он имеет достаточную пропускную способность для повышения транзитного поездопотока на 15%, что согласуется с планами ВСЖД филиала ОАО «РЖД» по развитию Транссибирской магистрали.

В работе также был затронут вопрос об отчуждаемости предложенного модельно-алгоритмического аппарата от разработчика. Его решение видится в создании интеллектуальной системы, которая позволит неспециалисту в области теории массового обслуживания использовать предложенный аппарат.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с повышением точности и адекватности получаемых моделей. Этого можно достичь за счет учета движения отдельных вагонов по железнодорожному узлу и/или с построением детального описания станций, в частности, рассмотрением ее парков как отдельных элементов с различной производительностью.

Благодарности. 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.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Правдин Н.В., Вакуленко С.П., Головнич А.К. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н.В. Правдин, С.П. Вакуленко, А.К. Головнич М. [и др.]. Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 1086 с. – ISBN 978-5-89035-619-2
2. Бухаров Д.С., Казаков А.Л. Программная система "Виголт" для решения задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике / Д.С. Бухаров, А.Л. Казаков // Вычислительные методы и программирование, 2012. – Т. 13. – №2. – С. 65–74. – eISSN 1726-3522.
3. Казаков А.Л., Лемперт А.А., Бухаров Д.С. Об одном численном методе решения некоторых задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике/ А.Л. Казаков, А.А. Лемперт, Д.С. Бухаров // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2011. – №6 (53). – С. 6–12. –ISSN 1814-3520.
4. Журавская М.А., Казаков А.Л., Парсюрова П.А. О размещении остановочных пунктов при осуществлении мультимодальных пассажирских перевозок / М.А. Журавская, А.Л. Казаков, П.А. Парсюрова // Транспорт Урала, 2012. –№4 (35). –С. 50–53. – ISSN 1815-9400.
5. Ковалев В.И., Верховых Г.В., Осьминин А.Т. Стохастические сети обслуживания в задачах моделирования работы железнодорожных сортировочных станций /В.И. Ковалев, Г.В. Верховых, А.Т. Осьминин [и др.]. – СПб: Информационный центр "Выбор", 2005. – 136 с. – ISBN 5-93518-036-7.
6. Казаков А.Л., Маслов А.М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции / А.Л. Казаков, А.М. Маслов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2009. – №3 (23). – С. 27–32. – ISSN 1813-9108.

7. Козлов П.А., Тушин Н. А., Слободянюк И.Г. Макромоделирование железнодорожных станций и узлов / П.А.Козлов, Н. А. Тушин, И.Г.Слободянюк // Наука и техника транспорта, 2015. – №2. – С. 82–88. – ISSN: 2074-9325.
8. Козлов П.А., Колокольников В.С., Сорокин В.Н. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей /П.А. Козлов, В.С. Колокольников, В.Н. Сорокин // Транспорт Урала, 2016. – №3 (50). – С. 3–8. – ISSN 1815-9400.
9. Любченко А.А., Бартош С.В., Смирнов В.А., Castillo P.A. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic / А.А. Любченко, С.В. Бартош, В.А. Смирнов, [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин, 2016. – №3. – С. 87–92. – ISSN 2310-9793.
10. Жарков М.Л., Казаков А.Л., Супруновский А.В., Павидис М.М. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания / М.Л. Жарков, А.Л. Казаков, А.В. Супруновский [и др.] // Вестник УрГУПС, 2021. – №3 (51). – С. 4–14. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-3-4-14. –ISSN 2079-0392.
11. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of Railway Stations Based on Queuing Networks. Applied Sciences, 2021, vol. 11(5), pp. 2425, ISSN: 2076-3417.
12. Dudin A., Klimenok V., Vishnevsky V. The Theory of Queuing Systems with Correlated Flows. Springer Nature: Switzerland, 2019, 530 p, ISBN 978-3-030-32071-3.
13. Интеллектуальная технология моделирования железнодорожных станций на основе теории массового обслуживания /И.В. Бычков, А.Л. Казаков, М.Л. Жарков // Управление товарными потоками и перевозочным процессом на железнодорожном транспорте на основе клиентоориентированности и логистических принципов: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»; под ред. Б.М. Лapidуса, А.Т. Осьминина. – СПб.: ЛЕМА, 2019. – С. 185–193. – ISBN 978-5-00105-520-4.

Жарков Максим Леонидович, к.т.н., научный сотрудник, *Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН*, *zharkm@mail.ru*, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134

Супруновский Антон Викторович, старший преподаватель, *Иркутский государственный университет путей сообщения*, *as.irgups@gmail.com*, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

On modeling sections of the railway network based on queuing theory

Maksim L. Zharkov¹, Anton V. Suprunovsky²

¹Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, *zharkm@mail.ru*

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, *as.irgups@gmail.com*

Abstract. In this paper, we proposed a methodology for the mathematical modeling of the movement of trains at railway junctions. It is based on the use of queuing networks of a special type. Sections of the railway network are important for cargo and passenger transportation, as well as international economic interaction. Therefore, their study is an urgent task. We use queuing networks, which allow us to take into account the influence of random factors on the operation of nodes and display the structural features of a particular object in the model. One of the large sections of the Trans-Siberian Railway sections was selected for testing the methodology. In the article, we built the model of its operation in the form of a queuing network with two incoming flows of applications and perform its numerical study. Then we used the results to determine the maximum allowable load and "bottlenecks" in the structure of the transport system and develop recommendations for increasing its throughput.

Keywords: sections of the railway network, traffic flow, mathematical model, queuing theory, computational experiment

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-010-00724; RFBR and the Government of the Irkutsk region within the framework of the scientific project no. 20-47-383002.

REFERENCES

1. Pravdin N.V., Vakulenko S.P., Golovnich A.K. [et al.]. *Proyektirovaniye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (vokzaly, zheleznodorozhnye i transportnye uzly)* [Designing the infrastructure of railway transport (stations, railway and transport nodes)]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2012, 1086 p, ISBN 978-5-89035-619-2.
2. Bukharov D.S., Kazakov A.L. *Programmnyaya sistema "Vigolt" dlya resheniya zadach optimizatsii, vznikayushchikh v transportnoy logistike* [Vigolt system for solving transport logistics optimization problems]. *Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye* [Computational methods and programming], 2012, vol. 13, no. 2. pp. 65–74, eISSN 1726-3522.
3. Kazakov A.L., Lempert A.A., Bukharov D.S. *Ob odnom chislennom metode resheniya nekotorykh zadach optimizatsii, vznikayushchikh v transportnoy logistike* [On a numerical method to solve some optimization problems occurring in transport logistics]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2011, no. 6 (53), pp. 6–12, ISSN 1814-3520.
4. Zhuravskaya M. A., Kazakov A. L., Parsiurova P. A. *Parsyurova P.A. O razmeshchenii ostanovochnykh punktov pri osushchestvlenii mul'timodal'nykh passazhirskikh perevozok* [On placement of stopping points during multimodal passenger traffic]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2012, no. 4 (35), pp. 50–53, ISSN 1815-9400.

5. Kovalev V.I., Verkhovyykh G.V., Osminin A.T. [et al.]. Stokhasticheskiye seti obsluzhivaniya v zadachakh modelirovaniya raboty zheleznodorozhnykh sortirovochnykh stantsiy [Stochastic service networks in the problems of modeling the work of railway sorting stations]. St. Petersburg, Information Center "Choice", 2005, 136 p, ISBN 5-93518-036-7.
6. Kazakov A. L., Maslov A. M. Postroenie modeli neravnomernogo transportnogo potoka na primere zheleznodorozhnoy gruzovoy stantsii [Constructing a model of uneven transport flow on the example of a railway freight station]. Modern technologies. System analysis. Modeling, 2009, no. 3 (23), pp. 27–32, ISSN 1813-9108.
7. Kozlov P.A., Tushin N.A., Slobodyanyuk I.G. Makromodelirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov [Macro-modeling of railway stations and nodes]. Science and technology in transport, 2015, no. 2, pp. 82–88, ISSN 2074-9325.
8. Kozlov P.A., Kolokolnikov V.S., Sorokin V.N. Sovmestnoye ispol'zovaniye analiticheskikh metodov i imitatsionnykh modeley [Shared use of analytical methods and simulation models]. Transport Urala [Transport of the Urals], 2016, no. 3 (50), pp. 3–8, ISSN 1815-9400.
9. Lyubchenko A.A., Bartosh S.V., Smirnov V.A., Castillo P.Á. Diskretno-sobytiynaya model' zheleznodorozhnogo uzla v srede AnyLogic [Discrete-event model of a railway junction in the AnyLogic environment]. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2016, no. 3, pp. 87–92, ISSN 2310-9793.
10. Zharkov M.L., Kazakov A.L., Suprunovsky A.V., Pavidis M.M. Modelirovaniye krupneyshey v mire zheleznodorozhnoy sortirovochnoy stantsii s ispol'zovaniyem teorii massovogo obsluzhivaniya [Simulation of the world's largest railway marshalling yard using queuing theory]. Vestnik UrGUPS [Bulletin of the UrGUPS], 2021, no. 3(51), pp. 4–14, ISSN 2079-0392.
11. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of Railway Stations Based on Queuing Networks. Applied Sciences, 2021, vol. 11(5), pp. 2425. ISSN 2076-3417.
12. Dudin A., Klimenok V., Vishnevsky V. The Theory of Queuing Systems with Correlated Flows. Springer Nature, Switzerland, 2019, 530 p, ISBN 978-3-030-32071-3.
13. Bychkov I.V., Kazakov A.L., Zharkov M.L. Intel'lectual'naya tekhnologiya modelirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy na osnove teorii massovogo obsluzhivaniya [Intelligent technology for modeling railway stations based on the theory of mass service]. Upravleniye tovarnymi potokami i perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte na osnove kliyentooriyentirovannosti i logisticheskikh printsipov [Management of commodity flows and the transportation process in railway transport based on customer focus and logistics principles], St. Petersburg, LEMA, 2019, pp. 185–193, ISBN 978-5-00105-520-4.

Maksim. L. Zharkov, PhD, Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control, zharkm@mail.ru, Irkutsk, st. Lermontov, 134

Anton V. Suprunovsky, S. Lecturer, Irkutsk State Transport University, as.irgups@gmail.com, Irkutsk, Russia, Chernyshevsky st. 15

Статья поступила в редакцию 18.02.2022; одобрена после рецензирования 25.03.2022; принята к публикации 28.03.2022.

The article was submitted 02.18.2022; approved after reviewing 03.25.2022; accepted for publication 03.28.2022.