

Применение теории массового обслуживания для моделирования Улан-Баторской железной дороги

И. В. БЫЧКОВ, М. Л. ЖАРКОВ, А. Л. КАЗАКОВ*

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

*Контактный автор: Казаков Александр Леонидович, e-mail: kazakov@icc.ru

Поступила 15 мая 2023 г., доработана 01 сентября 2023 г., принята в печать 06 сентября 2023 г.

В статье рассматривается задача оценки пропускной способности Улан-Баторской железной дороги (УБЖД), которая является частью наиболее короткого транспортного коридора из Центральной России в Северо-Восточный Китай. Отличительной ее особенностью является то, что УБЖД в основном имеет однопутное сообщение, вследствие чего применяется пакетный график движения поездов, существенно усложняющий технологию работы. Исследование проводится методами математического моделирования с применением теории массового обслуживания. Модель имеет вид сети массового обслуживания, поступление пакетов поездов описывается при помощи ВМАР-потоков, для учета различных маршрутов движения поездов используется несколько типов заявок. Выполняются численные расчеты, на их основе определяется текущая пропускная способность УБЖД и проводится сравнительная оценка эффективности возможных вариантов ее модернизации.

Ключевые слова: математическое моделирование, теория массового обслуживания, вычислительный эксперимент, железнодорожный транспорт, международные перевозки.

Цитирование: Бычков И.В., Жарков М.Л., Казаков А.Л. Применение теории массового обслуживания для моделирования Улан-Баторской железной дороги. Вычислительные технологии. 2023; 28(6):17–36. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.003.

Введение

В последнее время в России происходит переориентация цепей поставок на юго-восток, прежде всего — в направлении Китая. Среди видов транспорта при этом самым востребованным оказался железнодорожный [1]. Из Центральной части РФ в Китай имеется три железнодорожных коридора. Наиболее короткий из них пролегает через Восточный полигон и Улан-Баторскую железную дорогу (УБЖД). Этот маршрут занимает второе место по объему транзита контейнеров (данные на 2021 г.) [2]. Восточный полигон активно развивается [3], он определен ключевым транспортным проектом 2023 г. [4]. В подобном контексте особую актуальность приобретает вопрос повышения пропускной способности УБЖД, поскольку именно она становится “узким местом” в цепях поставок.

Улан-Баторская железная дорога имеет эксплуатационную протяженность 1815 км, проходит через столицу Монголии г. Улан-Батор и соединяет пограничные станции Наушки (Россия) и Эрлянь (Китай). К настоящему времени УБЖД все еще не электрифицирована и в основном имеет однопутную систему движения [5], что препятствует

росту транзитных перевозок [6]. Технология ее работы устарела, на многих участках дороги применяется полуавтоматическая блокировка. Фактически движение поездов регулируется на перегоне в ручном режиме дежурными по ближайшей станции. Сами станции, построенные при содействии СССР, нуждаются в модернизации [5], в частности, по причине износа оборудования и инфраструктуры повышается риск возникновения поломок и, следовательно, нарушения графика движения поездов. При этом из-за нестабильной геополитической обстановки в Европе эффективное планирование структуры и объемов поездопотоков практически невозможно. В подобных условиях необходимы разработка и применение специальных методов моделирования, которые позволят оценить текущий уровень работы УБЖД и эффективность возможных мер по ее модернизации с учетом высокой неопределенности в цепях поставок.

Известно, что наиболее распространенным классом математических моделей в области железнодорожного транспорта являются оптимизационные [7, 8]. Они позволяют найти наилучшее в смысле рассматриваемого критерия решение, но при наличии существенных случайных воздействий их построение оказывается проблематичным. В этой связи еще в прошлом веке специалисты указывали на необходимость использования вероятностных моделей [8, 9].

Одним из эффективных инструментов сценарного моделирования сложных систем в условиях неопределенности является теория массового обслуживания (ТМО) или теория очередей (queueing theory) [10], в частности сети массового обслуживания (СеМО), которые представляют собой совокупность некоторого числа взаимосвязанных систем массового обслуживания (СМО) [11]. Сети массового обслуживания предоставляют значительно больше возможностей для моделирования по сравнению с СМО (даже с многофазными), поскольку позволяют отобразить нелинейную структуру системы, включая возможное появление циклов. Современная ТМО, помимо классических моделей потока заявок (пуассоновского, эрланговского, нормального и т. п.), рассматривает и более сложные: МАР (markovian arrival process), ВМАР (branch МАР) и ММРР (markov modulated poisson process) [12].

Обычно математический аппарат ТМО применяется для исследования компьютерных сетей и телекоммуникационных систем [13], однако его можно успешно использовать и в области транспорта. Так, СеМО в последние годы активно применяются зарубежными специалистами для моделирования транспортных систем [14]. Обычно используют наиболее простые СеМО, узлы которых являются одноканальными СМО с бесконечной очередью или без очереди вообще. Так, в статье [15] построена модель для оценки задержек поездов при движении по городской железнодорожной сети. В [16, 17] предложен подход для анализа пропускной способности железнодорожной магистрали, когда расписание неизвестно. В [18] описана модель движения пригородных поездов. Однако в научной литературе имеются примеры использования более сложных СеМО, узлы в которых — многоканальные СМО. В [19] такой подход использован для описания движения грузовых поездов по железнодорожной сети, в [20] для моделирования взаимодействия железной дороги и порта, в [21] — крупного железнодорожного узла.

На основе данного подхода авторы предложили методику моделирования работы грузового железнодорожного терминала [22] и железнодорожных станций различных типов [23–25], а затем модернизировали ее для описания участков железнодорожной сети с двухпутным сообщением [26]. В соответствии с этой методикой узлы СеМО являются многоканальными СМО с конечными очередями и описывают работу станционных парков. При этом, в отличие от представленных выше работ других специалистов,

используются более сложные модели входящего потока заявок, включая ВМАР-поток для математического описания входящего поездопотока сложной структуры, что позволяет описать несколько отдельных поездопотоков с различными параметрами, причем подпотоки могут быть коррелированными и групповыми.

В настоящей работе рассматривается дальнейшее развитие указанной методики и ее применение для моделирования однопутных железнодорожных линий, на которых движение поездов между соседними станциями осуществляется по одному пути в двух направлениях. В этом случае для увеличения пропускной способности обычно используется пакетный график движения поездов, вследствие чего однопутная железнодорожная сеть имеет более сложную технологию работы по сравнению с двухпутной.

Далее приводятся обобщенное описание железнодорожных линий и методика моделирования, краткая характеристика северной части УБЖД, математическая модель движения поездов по ней и результаты ее численного исследования. На их основе делаются выводы о текущей пропускной способности УБЖД и производится оценка эффективности возможных вариантов ее модернизации.

1. Методика математического моделирования

Под железнодорожной линией здесь и далее понимаются несколько станций разных типов [8], взаимодействующих между собой на относительно небольшой площади. Поезда поступают на станцию с двух и более направлений, каждое из которых включает несколько категорий поездов. Станции состоят из одного и более парков с различной вместимостью и пропускной способностью. На станциях возможно наличие специальных путей для погрузки/разгрузки поездов — грузовых дворов. Движение поездов между соседними станциями осуществляется по одному и более железнодорожному пути (далее — участок). При однопутном сообщении поезда прибывают (отправляются) на станцию пакетами, под которыми понимается несколько (группа) поездов, следующих друг за другом с небольшим интервалом времени (8 минут). Размер пакета, как правило, не превышает три поезда. Для пропуска встречных поездов и пакетов по однопутному участку на нем могут находиться разъезды — два или три параллельных пути длиной до 2 км.

На станциях и участках между ними регулярно выполняются однотипные операции с поездами: принятие, обработка, пропуск и отправление. Их продолжительность хоть и регламентирована, однако подвержена воздействию множества случайных факторов, в частности, это погодные условия, поломки техники и человеческий фактор. Станции и участки образуют нелинейную иерархическую структуру, в которой может быть несколько маршрутов движения. Число поездов, которые могут одновременно следовать по сети, ограничено. Поэтому поезд может остановиться из-за запрещающего сигнала и ожидать освобождения участка на пути его следования или места на станции.

Целью исследования железнодорожной линии обычно является определение ее пропускной способности, нахождение “узких мест” в структуре и выработка рекомендаций по улучшению работы. Для ее достижения мы применяем методы компьютерного моделирования, используя в качестве математического аппарата теорию массового обслуживания. При построении модели выделяются следующие типы элементов: входящие поездопотоки, парки станций, железнодорожные участки и маршруты движения поездов по железнодорожной сети.

Для описания поступления пакетов поездов с одного направления применяется отдельный ВМАР-поток [12]. В данном случае каждый ВМАР-поток включает по два под-

потока. Первый описывает поступление грузовых поездов, а второй — пассажирских. Для каждого подпотока задаются интенсивность поступления пакетов и распределение числа поездов в них. Один поезд считается заявкой, а пакет, состоящий из двух или трех поездов, группой заявок. Мы пренебрегаем промежутком времени между поездами в пакете и считаем, что они поступают на станцию одновременно. Это упрощение допустимо, так как: а) поезда следуют в пакете с минимальным интервалом времени; б) если необходимо пропустить поезд/пакет на разъезде, то весь пакет останавливается, а затем следует далее с сохранением временного интервала. Таким образом, пакет при движении между станциями можно считать неделимым объектом.

ВМАР-поток задается набором квадратных матриц D_k . При моделировании поступления пакетов в систему эти матрицы задаются следующим образом. Их размеры определяются по числу рассматриваемых типов поездов W , в частности грузовых и пассажирских. Поступление каждого типа описывается в виде отдельного подпотока. Элементы матриц задаются по следующим формулам, в которых λ_v — интенсивность поступления заявок из подпотока v ; $p_k(v, v')$ — вероятность поступления заявок из подпотока v' при том, что предыдущее поступление было из подпотока v ; $f_{v'}(k)$ — вероятность поступления группы заявок (пакета) размера k из подпотока v' . Для $p_k(v, v')$ и $f_{v'}(k)$ выполняется условие нормировки $\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{v=0}^W p_k(v, v') f_{v'}(k) = 1$.

$$\begin{aligned} (D_0)_{v,v} &= -\lambda_v, & v &= \overline{1, W}, \\ (D_0)_{v,v'} &= 0, \\ (D_k)_{v,v'} &= \lambda_v p_k(v, v') f_{v'}(k), & v, v' &= \overline{1, W}, \quad k \geq 1. \end{aligned}$$

Для описания работы парков и участков используются сети массового обслуживания. Сеть массового обслуживания представляет собой совокупность конечного числа S СМО (далее — узлов), в которой заявки переходят из одного узла в другой в соответствии с маршрутной матрицей P . Нами используются открытые СеМО, поэтому заявки поступают из внешнего источника [25]. В этом случае матрица P будет размера $(S+1) \times (S+1)$, ее элементы — вероятности перехода заявок между узлами. Каждый парк и участок между станциями описываются с помощью одного и более узлов СеМО. Заявки из внешнего источника принимаются в узлы согласно дисциплине полного отказа: если в узле нет места для принятия всех заявок из группы, то вся группа покидает систему необслуженной. Этим мы учитываем ситуацию, когда поезда в пакете остаются на соседней железнодорожной линии из-за нарушения графика и ожидают освобождения места на станциях рассматриваемой линии и нового для них графика движения.

Математическое описание участков основано на следующих принципах:

1. Разъезд имеет три и более пути при однопутном сообщении. Такой участок описывается двумя одноканальными СМО без очереди и с групповым обслуживанием, размер групп — максимальный размер пакета поездов.
2. Разъезд имеет два пути, тогда одна СМО обслуживает заявки группами, а вторая — по одной за раз. Благодаря этому мы можем отобразить в модели ситуацию, когда поезд останавливается на разъезде и пропускает встречный пакет поездов.
3. При двухпутном сообщении каждый путь моделируется отдельной многоканальной СМО без очереди. Число каналов определяется количеством поездов, которые могут одновременно следовать по участку. Каналы обслуживают заявки по одной. Продолжительность обслуживания заявки — время движения поезда по соответствующему пути.

Различные маршруты движения поездов по железнодорожной линии учитываются посредством использования нескольких типов заявок. Для каждого типа строится своя маршрутная матрица $P_z, z = 1, 2, 3, \dots$. Остановка поезда (пакета) из-за занятости пути и станций описывается в виде временной блокировки каналов предыдущего узла до тех пор, пока в следующем не освободится достаточное количество мест.

Построенные ВМАР-потoki и СМО, а также маршрутные матрицы составляют СеМО. Ее исследование выполняется с помощью ранее разработанной имитационной модели [25, 26]. При этом в ходе численного исследования определяются показатели эффективности СеМО: вероятность отказа, среднее время пребывания заявки в системе и отдельно в узле, среднее число занятых каналов, время их блокировки. На их основе далее делаются выводы о качестве работы исходной транспортной системы.

2. Объект исследования

Рассмотрим участок Улан-Баторской железной дороги от станции Дархан 1 — крупной грузовой станции, расположенной в 40 км от границы с РФ, — до станции Улан-Батор 1 — основной сортировочной станции Монголии (далее — линия). Эта линия имеет протяженность 283 км и включает 12 станций: Дархан 1, Дархан 2, Салхит, Эрхэт, Баруунхараа, Зуунхараа, Тунх, Мандал, Аршаант, Толгойт, Улан-Батор 2 и Улан-Батор 1. Схема станций представлена на рис. 1, где черными точками отмечены разъезды.

Между станциями Дархан 1 – Дархан 2 и Толгойт – Улан-Батор 1 – Улан-Батор 2 имеется двухпутное сообщение, поэтому здесь разъезды отсутствуют. В табл. 1 представлены расстояния и средняя продолжительность движения поездов между станциями. Данные получены на основе нормативной скорости движения поездов для указанных участков.

Опишем станции подробнее. Их технические параметры мы получили на основе анализа спутниковых снимков, регламента работы и графиков движения поездов.



Рис. 1. Карта-схема линии Дархан 1 – Улан-Батор 1

Fig. 1. Scheme of the Darkhan 1 – Ulaanbaatar 1 line

Т а б л и ц а 1. Время движения поезда по железнодорожным участкам

Table 1. Train travel time on railway sections

Участок	Длина, км	Среднее время хода поезда, мин	
		пассажирского C	грузового F
Дархан 1 – Дархан 2	5	7	9
Дархан 2 – Салхит	30	28	34
Салхит – Эрхэт	11	12	14
Эрхэт – Баруунхараа	32	29	34
Баруунхараа – Зуунхараа	31	29	34
Зуунхараа – Тунх	39	40	44
Тунх – Мандал	39	40	44
Мандал – Аршаант	45	41	45
Аршаант – Толгойт	38	40	47
Толгойт – Улан-Батор 2	7	11	14
Улан-Батор 2 – Улан-Батор 1	3	3	5

Сначала рассмотрим участковые станции Салхит, Эрхэт, Баруунхараа, Зуунхараа, Тунх и Мандал, основной задачей которых является пропуск и непродолжительная остановка всех типов поездов. Станции состоят из одного приемоотправочного парка (ПОП): Баруунхараа имеет 4 пути; Эрхэт, Тунх и Мандал — по 5 путей; Салхит — 6 путей; Зуунхараа — 7 путей.

Время проследования через станцию 3–8 мин, остановка пассажирских поездов занимает 9–16 мин, грузовых — 20–60 мин.

Дархан 1, Дархан 2, Аршаант и Толгойт — грузовые станции, на которых также выполняются остановка и пропуск пассажирских поездов. Станции имеют один или два ПОП и грузовой двор: Дархан 1 имеет один парк на 10 путей; Дархан 2 — два ПОП по 6 путей в каждом; Аршаант — один парк на 6 путей; Толгойт — два ПОП на 6 и 7 путей. Вместимость грузового двора на всех станциях — один поезд, среднее время погрузки/разгрузки состава — одни сутки. Параметры работы ПОП на этих станциях аналогичны таковым на участковых станциях.

Улан-Батор 2 — вспомогательная станция при Улан-Батор 1, она также является участковой. На ней имеется один ПОП на 7 путей, на котором выполняются два класса операций над поездами с разной продолжительностью: а) пропуск и остановка поездов, время выполнения которых соответствует аналогичным параметрам для участковых станций; б) изменение длины состава или продолжительная остановка перед передачей в Улан-Батор 1, время выполнения 50–80 мин.

Улан-Батор 1 — крупнейшая сортировочная станция в Монголии. Она расположена в городской черте, поэтому, помимо обработки грузовых составов, также принимает и пассажирские поезда. Станция включает один ПОП на 9 путей, сортировочный парк на 11 путей и грузовой двор, вмещающий один поезд целиком. Среднее время обработки поезда в сортировочном парке составляет 4 ч, на грузовом дворе — 12 ч.

Поездотоки на рассматриваемой линии распределены неравномерно и следуют по частично пакетному графику движения. На различных участках применяется как авто-

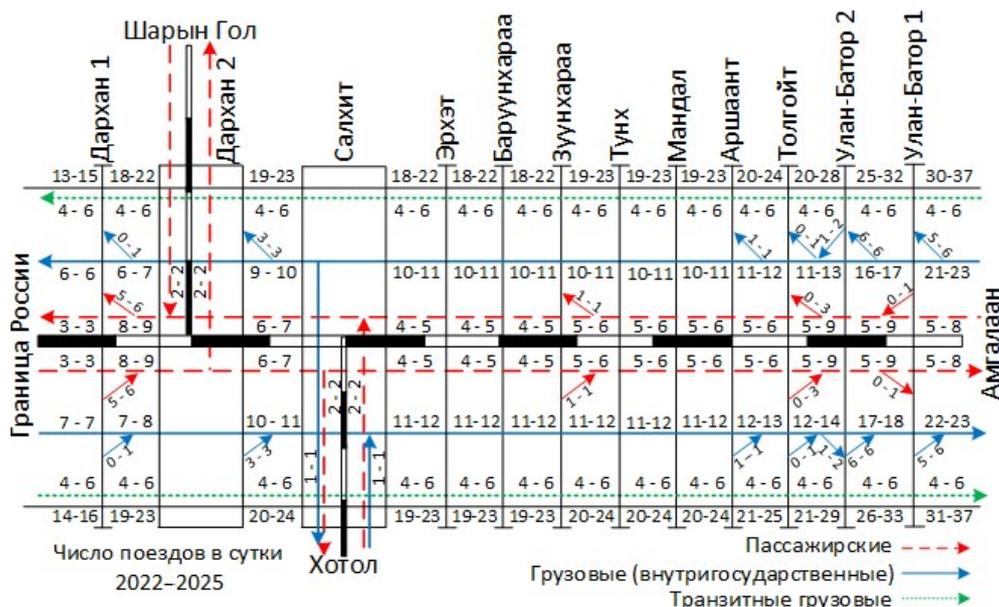


Рис. 2. Схема поездотоков

Fig. 2. Train flow diagram

матическая, так и полуавтоматическая блокировка. Грузовые поезда (местные и транзитные) движутся пакетами. Их размеры не превосходят двух поездов из-за малой вместимости промежуточных станций (4–5 путей). Пассажирские поезда в пакеты не включаются, так как они имеют приоритет над грузовыми при выполнении расписания. Отметим, что поступающие пакеты с других железнодорожных участков могут достигать трех поездов.

Через станцию Дархан 1 по плану проходят 15–16 поездов в каждом направлении. Затем поездопоток постепенно увеличивается и составляет суммарно 74 поезда по станции Улан-Батор 1 (прогноз на 2025 г.). Схема поездопотоков представлена на рис. 2, где пары чисел обозначают количество поездов в сутки в 2022 г. (натурные данные) и прогноз на 2025 г. На станции возможен разворот поезда, тогда маршрут его движения меняется на обратный. Разворот отмечен наклонными стрелками на рис. 2.

3. Математическое описание

Поезда на рассматриваемую железнодорожную линию поступают с четырех направлений, каждое из которых мы описываем отдельным ВМАР-поток. Основные направления: ВМАР-1 — со станции Амгалаан прибывает 32 поезда/сут. (1.13 пакета/ч); ВМАР-2 — от границы с Россией (станция Сухэ Батор) — 15 поездов/сут. (0.5 пакета/ч). Дополнительные направления: ВМАР-3 — со станции Шарын Гол — 2 поезда/сут. (0.083 пакета/ч); ВМАР-4 — со станции Хотол — 3 поезда/сут. (0.125 пакета/ч).

ВМАР-1, -2 и -4 моделируют прибытие грузовых (местных и транзитных) и пассажирских поездов, поэтому они имеют два подпотока. ВМАР-3 описывает поступление только пассажирских поездов. Вероятности поступления поездов определенной категории примем равными их относительным частотам. Грузовые поезда поступают пакетами, число поездов в которых (далее — размер пакета) описывается дискретным распределением (табл. 2), вид которого получен на основе экспертных оценок.

Матрицы ВМАР-потоков будут иметь следующий вид. В них верхние строки описывают поступление грузовых поездов, а нижние — пассажирских.

$$\begin{aligned}
 D_{1,0} &= \begin{pmatrix} -1.13 & 0 \\ 0 & -1.13 \end{pmatrix}, & D_{1,1} &= \begin{pmatrix} 0.379 & 0.186 \\ 0.57 & 0.373 \end{pmatrix}, \\
 D_{1,2} &= \begin{pmatrix} 0.341 & 0.168 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, & D_{1,3} &= \begin{pmatrix} 0.038 & 0.018 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 D_{2,0} &= \begin{pmatrix} -0.5 & 0 \\ 0 & -0.5 \end{pmatrix}, & D_{2,1} &= \begin{pmatrix} 0.185 & 0.065 \\ 0.370 & 0.130 \end{pmatrix}, \\
 D_{2,2} &= \begin{pmatrix} 0.167 & 0.059 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, & D_{2,3} &= \begin{pmatrix} 0.018 & 0.006 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 D_{3,0} &= (-0.083), & D_{3,1} &= (0.083), \\
 D_{4,0} &= \begin{pmatrix} -0.125 & 0 \\ 0 & -0.125 \end{pmatrix}, & D_{4,1} &= \begin{pmatrix} 0.041 & 0.084 \\ 0.041 & 0.084 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\tag{2}$$

Теперь построим модели работы станций и железнодорожных участков между ними. Работу ПОП и сортировочного парка моделируем многоканальными СМО без очереди, грузового двора — одноканальными СМО. Число каналов в многоканальной СМО равно количеству путей в соответствующем парке. При описании ПОП время обслуживания в каналах соответствующей СМО имеет экспоненциальное распределение с па-

Т а б л и ц а 2. Распределение размера пакета
Table 2. Package Size distribution

Размер пакета	1	2	3
Вероятность	0.5	0.45	0.05

раметром λ , характеризующим среднее число заявок в единицу времени; при моделировании грузового двора и сортировочного парка — нормальное распределение $N(a, \sigma)$, где a — математическое ожидание, σ — среднее квадратичное отклонение. Их параметры (в минутах) определяются на основе экспертной оценки графика движения поездов и регламента работы станции.

Для математического описания узлов (СМО) используется символика Кендалла–Башарина $A/B/n/m$, где позиция A — модель входящего потока заявок, B — закон распределения времени обслуживания, n — количество каналов, m — максимальная длина очереди [11]. Далее в статье: на позиции A ставится ВМАР или символ “*” — произвольный нестационарный поток, характеристики которого неизвестны; на позиции B возможны M или G , что соответствует экспоненциальному или нормальному распределению времени обслуживания заявки; после символика Кендалла–Башарина указываются числовые параметры распределения времени обслуживания, если их определение не требует дополнительных пояснений.

Модели станций будут иметь следующий вид:

- Дархан 1: ПОП (узел 1) — ВМАР-2/ M /9/0, $\lambda_1 = 0.08$; грузовой двор (узел 2) — */ G /1/0, $N(1440, 60)$;
- Дархан 2 имеет два однотипных ПОП, поэтому мы описываем их одним узлом (узел 5) — ВМАР-3/ M /12/0, $\lambda_5 = 0.2$; грузовой двор (узел 6) — */ G /1/0, $N(420, 50)$;
- Салхит (узел 9) — ВМАР-4/ M /6/0, $\lambda_9 = 0.2$;
- Эрхэт (узел 12), Тунх (узел 21), Мандал (узел 24) — */ M /5/0, $\lambda_{12} = \lambda_{21} = \lambda_{24} = 0.2$;
- Баруунхараа (узел 15) — */ M /4/0, $\lambda_{15} = 0.2$;
- Зуунхараа (узел 18) — */ M /7/0, $\lambda_{18} = 0.2$;
- Аршаант: ПОП (узел 27) — */ M /6/0, $\lambda_{27} = 0.3$; грузовой двор (узел 28) — */ G /1/0, $N(1440, 60)$;
- Толгойт: ПОП (узел 31) — */ M /13/0, $\lambda_{31} = 0.2$; грузовой двор (узел 32) — */ G /1/0, $N(1440, 60)$;
- Улан-Батор 2 имеет три парка: ПОП (узел 39) — пропуск поездов — */ M /5/0, $\lambda_{35} = 0.2$; узел 36 — изменение длины поезда — */ G /2/0, $N(65, 5)$;
- Улан-Батор 1 имеет три парка: ПОП (узел 39) — ВМАР-1/ M /9/0, $\lambda_{39} = 0.2$; сортировочный парк (узел 40) — */ G /11/0, $N(240, 35)$; грузовой двор (узел 41) — */ G /1/0, $N(720, 60)$.

Рассматриваемая железнодорожная линия включает 11 участков:

1. Участки Дархан 1–Дархан 2, Толгойт–Улан-Батор 2, Улан-Батор 2–Улан-Батор 1 имеют двухпутное сообщение, их работа описывается двумя одноканальными СМО (узлы 3, 4, 33, 34, 37 и 38) — */ G /1/0.
2. Однопутный участок Мандал–Аршаант имеет разъезд на 3 пути и может пропустить сразу два пакета поездов. Его работа описывается двумя СМО (узлы 25 и 26) с групповым обслуживанием — */ G^X /1/0, где X — максимальный размер обслуживаемых групп равен двум (размер пакета).
3. Разъезды на остальных участках включают по два пути, т. е. возможен пропуск поезда и одного пакета. Тогда одна СМО обслуживает заявки группами (узлы 7,

10, 13, 16, 19, 22 и 29) — $*/G^X/1/0$, а вторая СМО обрабатывает заявки по одной за раз (узлы 8, 11, 14, 17, 20, 23 и 30) — $*/G/1/0$. Мы считаем, что время обслуживания в этих узлах имеет нормальное распределение [24], параметры которого подбираются на основе данных из табл. 1 следующим образом: математическое ожидание $a = (C + F)/2$ — среднее время движения пассажирских и грузовых поездов; среднеквадратичное отклонение подобрано в соответствии с “правилом трех сигма” $\sigma = (a - C)/3$. В этом случае в интервал от C до F попадает не менее 99.9997% значений полученной случайной величины. Тогда время обслуживания в узлах 3 и 4 имеет распределение $N(8, 0.33)$, в узлах 7 и 8 — $N(31, 1)$, в узлах 10 и 11 — $N(13, 0.5)$, в узлах 13, 14, 16 и 17 — $N(31.5, 1)$, в узлах 19, 20, 22 и 23 — $N(42, 2)$, в узлах 25 и 26 — $N(43, 2)$, в узлах 29 и 30 — $N(43.5, 2)$, в узлах 33 и 34 — $N(12.5, 0.5)$, в узлах 37 и 38 — $N(4, 0.33)$.

Таким образом, модель движения поездов по железнодорожной линии имеет вид СеМО с четырьмя ВМАР и 41 узлами, из которых 19 моделируют работу станций, 22 узла описывают железнодорожные участки. К этим узлам добавим четыре фиктивных, по числу входящих потоков заявок [13]: узел 0 — ВМАР-1, узел 42 — ВМАР-2, узел 43 — ВМАР-3, узел 44 — ВМАР-4. На рис. 3 представлен направленный граф СеМО, где эллипсы соответствуют паркам при станциях, а круги — железнодорожным участкам.

Напомним, что на железнодорожной линии поезда следуют в двух основных направлениях. При этом маршруты пассажирских и грузовых поездов различаются. В частности, пассажирские составы не могут быть обслужены на грузовом дворе. Следовательно, возможны четыре маршрута движения поездов. В модели они учитываются посредством введения различных типов заявок: 1 и 3 описывают движение нечетных грузовых и пассажирских поездов, а 2 и 4 — четных грузовых и пассажирских поездов. Для заявок каждого типа строятся особые маршрутные матрицы P_z . Они имеют размеры 45 на 45, сильно разрежены и малоинформативны, поэтому далее мы опишем только отличные от нуля элементы матриц P_z — вероятности $p_{i,j}$ перехода из узла i в узел j .

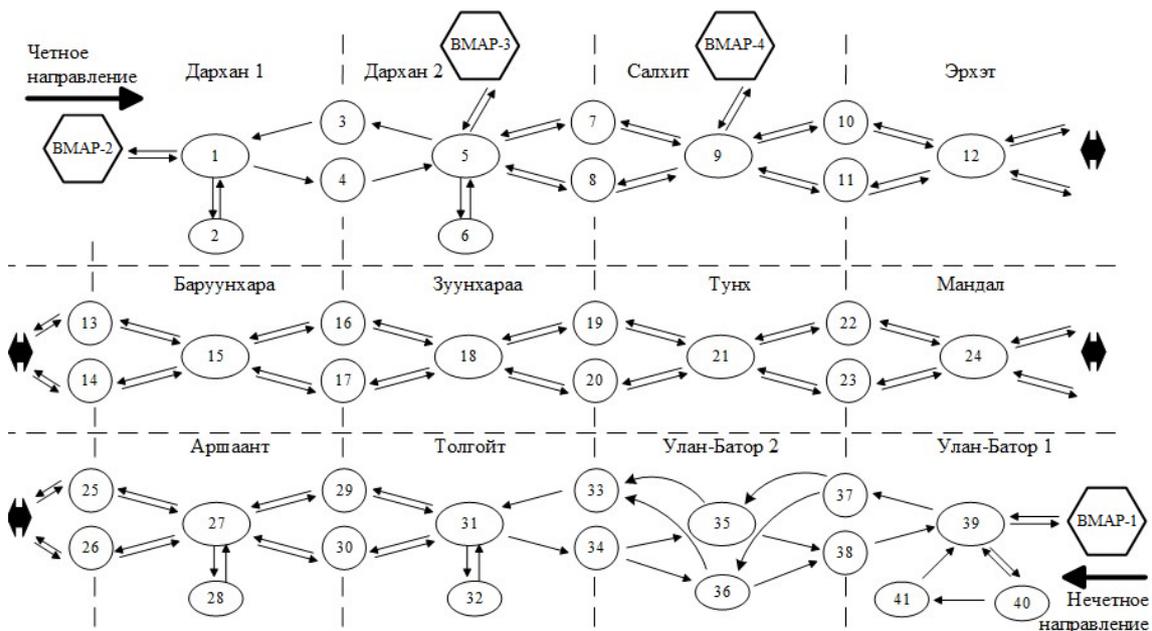


Рис. 3. Схема СеМО
Fig. 3. Queuing network scheme

Ненулевые элементы матрицы P_1 :

$$\begin{aligned} p_{2,1} = p_{3,1} = p_{6,5} = p_{7,5} = p_{8,5} = p_{10,9} = p_{11,9} = p_{13,12} = p_{14,12} = p_{16,15} = \\ = p_{17,15} = p_{19,18} = p_{20,18} = p_{22,21} = p_{23,21} = p_{25,24} = p_{28,27} = p_{29,27} = p_{30,27} = \\ = p_{32,31} = p_{33,31} = p_{35,33} = p_{41,39} = p_{42,39} = p_{43,5} = p_{44,9} = 1; \\ p_{12,10} = p_{15,13} = p_{18,16} = p_{21,19} = p_{24,22} = p_{37,35} = 0.8; \\ p_{9,8} = p_{12,11} = p_{15,14} = p_{18,17} = p_{21,20} = p_{24,23} = p_{31,30} = p_{37,36} = 0.2; \\ p_{1,0} = 0.85; \quad p_{1,2} = 0.15; \quad p_{5,3} = 0.6; \quad p_{5,6} = 0.4; \quad p_{9,44} = p_{27,28} = p_{31,32} = 0.06; \quad p_{27,25} = 0.94; \\ p_{31,29} = p_{9,7} = 0.74; \quad p_{39,37} = 0.87; \quad p_{39,40} = 0.13; \quad p_{40,39} = 0.7; \quad p_{40,41} = 0.3. \end{aligned}$$

Ненулевые элементы матрицы P_2 :

$$\begin{aligned} p_{0,1} = p_{1,4} = p_{2,1} = p_{4,5} = p_{6,5} = p_{7,9} = p_{8,9} = p_{10,12} = p_{11,12} = p_{13,15} = p_{14,15} = p_{16,18} = \\ = p_{17,18} = p_{19,21} = p_{20,21} = p_{22,24} = p_{23,24} = p_{24,26} = p_{26,27} = p_{28,27} = p_{29,31} = \\ = p_{30,31} = p_{31,34} = p_{32,31} = p_{35,38} = p_{36,38} = p_{38,39} = p_{39,42} = p_{41,39} = 1; \\ p_{5,7} = p_{9,10} = p_{12,13} = p_{15,16} = p_{18,19} = p_{21,22} = p_{27,29} = 0.8; \\ p_{5,8} = p_{9,11} = p_{12,14} = p_{15,17} = p_{18,20} = p_{21,23} = p_{27,30} = 0.2; \\ p_{34,35} = 0.9; \quad p_{34,36} = 0.1; \quad p_{40,39} = 0.7; \quad p_{40,41} = 0.3. \end{aligned}$$

Ненулевые элементы матрицы P_3 :

$$\begin{aligned} p_{3,1} = p_{5,3} = p_{8,5} = p_{9,8} = p_{11,9} = p_{12,11} = p_{14,12} = p_{15,14} = p_{17,15} = p_{18,17} = p_{20,18} = p_{21,20} = p_{23,21} = \\ = p_{24,23} = p_{25,24} = p_{27,25} = p_{30,27} = p_{31,30} = p_{33,31} = p_{35,33} = p_{37,35} = p_{39,37} = p_{42,39} = 1. \end{aligned}$$

Ненулевые элементы матрицы P_4 :

$$\begin{aligned} p_{0,1} = p_{1,4} = p_{4,5} = p_{7,9} = p_{8,9} = p_{11,12} = p_{12,14} = p_{14,15} = p_{15,17} = p_{17,18} = p_{18,20} = p_{20,21} = p_{21,23} = \\ = p_{23,24} = p_{24,26} = p_{26,27} = p_{27,30} = p_{30,31} = p_{31,34} = p_{34,35} = p_{35,38} = p_{36,38} = p_{38,39} = p_{39,42} = 1; \\ p_{5,8} = 0.85; \quad p_{5,43} = 0.15; \quad p_{9,44} = 0.33; \quad p_{9,11} = 0.67. \end{aligned}$$

После остановки на станции поезд может изменить свой маршрут, что влечет смену типа заявки. Обозначим $p_r(i, j)$ вероятность того, что заявка изменит тип с i на j после обслуживания в узле r . Поскольку пассажирский поезд не может принять маршрут грузового, возможны следующие варианты смены типов заявок: $1 \longleftrightarrow 2$ и $3 \longleftrightarrow 4$. Вероятности этих событий следующие:

$$\begin{aligned} p_2(1, 2) = p_6(1, 2) = p_{28}(1, 2) = p_{32}(1, 2) = p_{40}(1, 2) = p_{36}(2, 1) = 1; \\ p_1(3, 4) = 0.625; \quad p_{18}(3, 4) = 0.2; \quad p_{31}(3, 4) = 0.33. \end{aligned}$$

4. Вычислительный эксперимент

Для определения показателей эффективности полученной СеМО использована разработанная ранее имитационная модель, которая реализована в виде программного комплекса на языке Object Pascal [25, 26]. Проведены три серии расчетов (три вычислительных эксперимента) с различными параметрами модели, в первую очередь, с разными объемами входящих поездопотоков.

В табл. 3–5 представлены усредненные результаты численного исследования, полученные за 10 пусков имитационной модели для каждого эксперимента. Виртуальное время моделирования одного пуска составило 28 дней. Используются следующие обозначения: T_{move} — среднее время прохождения заявок сквозь систему без учета времени

обслуживания в узлах 2, 6, 28, 32, 36, 41 и 40, т. е. время прохождения поезда по всей линии без учета грузовой работы, ч; T_{QN} — среднее время пребывания заявок в СеМО, ч; T_{lock} — среднее суммарное время блокировки одной заявки во всех узлах, т. е. суммарное время ожидания отправления для отдельного поезда, ч; k — среднее число работающих каналов в узле; R — среднее число поступивших заявок в сутки в отдельный узел; t_{node} — среднее время пребывания заявки в узле, мин; t_b — средняя продолжительность блокировки работы всех каналов узла в сутки, мин.

Эксперимент 1. В табл. 3 представлены результаты моделирования построенной СеМО при планируемом на 2025 г. объеме поездопотоков, который описан матрицами (1), (2).

Для проверки адекватности модели сравнивались данные о движении поездопотоков (см. рис. 2) и число поступивших в узел заявок (см. табл. 3). В модели выбор поезда, который совершит разворот, происходит случайным образом. Из-за этого число заявок, поступивших в узел, может отличаться от планового значения более чем на 6 %

Т а б л и ц а 3. Результаты эксперимента 1
Table 3. The results of simulation 1

Поступило групп		1217.33	P_{loss}	0	T_{move} , ч	8.54	
Поступило заявок		1632.00	T_{lock} , ч	1.29	T_{QN} , ч	42.51	
	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7
k	0.34	0.47	0.12	0.13	0.42	0.65	0.44
t_{node}	14.46	743.19	8.00	8.00	12.55	435.49	31.80
R	38.90	0.90	21.71	22.64	48.58	2.13	21.38
t_b	1092.33	0	0	0	3894.00	0	0
	Узел 8	Узел 9	Узел 10	Узел 11	Узел 12	Узел 13	Узел 14
k	0.48	0.40	0.23	0.16	0.37	0.49	0.45
t_{node}	31.81	12.58	12.99	13.00	12.52	32.00	32.00
R	21.45	47.48	25.98	17.43	43.39	23.35	20.08
t_b	0	3652.33	0	0	3513.33	10.00	4.00
	Узел 15	Узел 16	Узел 17	Узел 18	Узел 19	Узел 20	Узел 21
k	0.43	0.50	0.45	0.55	0.64	0.65	0.69
t_{node}	14.65	32.00	31.99	18.19	43.48	43.47	22.95
R	43.44	23.26	20.21	44.44	23.96	21.44	45.38
t_b	6045.00	5.00	0	10148.00	24.00	15.50	15831.67
	Узел 22	Узел 23	Узел 24	Узел 25	Узел 26	Узел 27	Узел 28
k	0.64	0.65	0.71	0.64	0.55	0.87	0.88
t_{node}	43.49	43.46	25.64	44.46	44.42	28.97	1452.62
R	23.90	21.48	45.37	24.80	20.57	47.05	0.87
t_b	27.00	9.00	16560.67	11.00	0	18244.67	0
	Узел 29	Узел 30	Узел 31	Узел 32	Узел 33	Узел 34	Узел 35
k	0.67	0.67	0.74	0.87	0.27	0.22	0.40
t_{node}	44.81	44.82	21.52	1461.17	13.00	13.00	11.42
R	25.32	21.71	51.31	0.86	29.18	24.74	50.50
t_b	0	0	16627.00	0	0	1.50	2708.67
	Узел 36	Узел 37	Узел 38	Узел 39	Узел 40	Узел 41	
k	0.31	0.09	0.08	0.46	0.90	0.42	
t_{node}	69.40	4.01	4.00	10.96	261.97	2752.91	
R	6.36	32.12	27.65	70.15	4.95	0.80	
t_b	210.00	6.33	0	439.00	37.00	0	

Т а б л и ц а 4. Результаты эксперимента 2
Table 4. The results of simulation 2

Поступило групп		1473.00	P_{loss}	0	T_{move} , ч	8.98	
Поступило заявок		1996.75	T_{lock} , ч	1.48	T_{QN} , ч	42.82	
	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7
k	0.43	0.53	0.15	0.15	0.56	0.69	0.56
t_{node}	14.80	712.30	8.00	8.00	14.31	435.38	31.81
R	46.98	1.06	26.09	27.21	57.87	2.29	26.24
t_b	1509.00	0	0	0	7262.75	0	0
	Узел 8	Узел 9	Узел 10	Узел 11	Узел 12	Узел 13	Узел 14
k	0.46	0.50	0.27	0.21	0.50	0.63	0.47
t_{node}	31.83	13.37	13.00	13.00	13.93	31.98	32.00
R	24.05	57.58	30.17	23.60	53.75	30.19	23.57
t_b	0	4792.00	0	0	5475.00	10.00	5.33
	Узел 15	Узел 16	Узел 17	Узел 18	Узел 19	Узел 20	Узел 21
k	0.57	0.62	0.48	0.77	0.79	0.64	0.83
t_{node}	16.81	32.00	31.99	23.48	43.44	43.43	25.64
R	53.74	30.22	23.54	55.25	31.78	24.99	56.77
t_b	8843.00	5.33	0	16404.25	0	3.00	18944.00
	Узел 22	Узел 23	Узел 24	Узел 25	Узел 26	Узел 27	Узел 28
k	0.77	0.66	0.89	0.77	0.68	1.14	0.89
t_{node}	43.45	43.47	27.78	44.44	44.46	35.43	1440.07
R	31.84	24.96	56.80	31.91	24.94	58.59	0.88
t_b	7.33	0.00	20672.00	9.00	0	25148.50	0
	Узел 29	Узел 30	Узел 31	Узел 32	Узел 33	Узел 34	Узел 35
k	0.75	0.70	1.06	0.93	0.34	0.27	0.51
t_{node}	44.82	44.81	25.43	1466.75	13.00	13.01	12.21
R	32.85	25.76	63.83	0.91	37.21	30.03	60.95
t_b	3.00	0	25426.00	0	0	11.50	4401.00
	Узел 36	Узел 37	Узел 38	Узел 39	Узел 40	Узел 41	
k	0.48	0.12	0.10	0.56	1.4	0.46	
t_{node}	70.66	4.03	4.00	10.91	263.08	752.52	
R	9.79	40.71	33.49	87.54	7.71	0.88	
t_b	642.75	37.00	0	730.00	49.25	0	

(единственный случай). Поэтому рассмотрено среднее относительное отклонение числа поездов в приемоотправочных парках для всех станций (узлы 1, 5, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 29, 31, 35, 36 и 39) от планового значения. Оно не превосходит 3.01 %.

В модели не предусмотрено управление движением заявок. Поэтому при проведении вычислительного эксперимента в четырех пусках имитационной модели произошла коллизия — ситуация, когда встречные потоки заявок переполняют соседние узлы и блокируют друг друга. Результаты этих пусков не учитывались в табл. 3, а только фиксировались узлы, в которых произошла коллизия: 15, 21 и 24 (станции Буунхара, Тунх и Мандал).

Наиболее загруженными являются грузовые дворы при станциях Аршаант и Толгойт, так как в узлах 28 и 32 наблюдаются наибольшие значения коэффициента занятости каналов ($K = k/n$, где n — число каналов в узле). Однако на них поступает небольшой объем поездопотоков (1 поезд в сутки), поэтому загрузка грузовых дворов

Т а б л и ц а 5. Результаты эксперимента 3
Table 5. The results of simulation 3

Поступило групп		3080.25	P_{loss}	0.0002	T_{move} , ч	7.59	
Поступило заявок		4163.25	T_{lock} , ч	0.61	T_{QN} , ч	41.61	
	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7
k	1.03	0.74	0.36	0.31	0.97	0.87	1.39
t_{node}	108.01	1.41	64.59	55.76	126.03	2.86	62.79
R	15.43	759.76	8.00	8.00	11.41	440.24	32.36
t_b	221.65	0	0	0	205.16	0	0
	Узел 8	Узел 9	Узел 10	Узел 11	Узел 12	Узел 13	Узел 14
k	1.20	0.83	0.55	0.46	0.75	1.35	1.12
t_{node}	54.11	122.13	60.70	50.58	111.27	60.74	50.56
R	32.31	10.03	13.16	13.15	9.98	32.52	32.59
t_b	0	26.24	0	0	32.09	0.00	0.00
	Узел 15	Узел 16	Узел 17	Узел 18	Узел 19	Узел 20	Узел 21
k	0.74	1.35	1.12	0.76	1.92	1.61	0.77
t_{node}	111.27	60.80	50.51	114.09	63.71	53.24	116.95
R	9.91	32.55	32.61	9.97	44.23	44.36	9.88
t_b	2.04	0	0	1.02	0	0.04	0.23
	Узел 22	Узел 23	Узел 24	Узел 25	Узел 26	Узел 27	Узел 28
k	1.93	1.61	0.77	1.97	1.64	1.06	0.74
t_{node}	63.81	53.18	116.96	63.88	53.12	118.40	0.74
R	44.25	44.21	9.81	45.31	45.39	13.33	1440.57
t_b	0	0	0.29	0	0	7.63	0
	Узел 29	Узел 30	Узел 31	Узел 32	Узел 33	Узел 34	Узел 35
k	2.02	1.68	1.37	0.75	0.65	0.55	1.45
t_{node}	64.71	53.72	126.23	0.74	71.83	60.73	123.25
R	45.23	45.76	16.05	1448.39	13.00	13.09	17.24
t_b	0	0	759.49	0	0	5.41	899.22
	Узел 36	Узел 37	Узел 38	Узел 39	Узел 40	Узел 41	
k	0.89	0.23	0.19	1.19	3.43	0.74	
t_{node}	14.89	77.42	66.27	179.63	19.03	1.41	
R	85.65	4.19	4.00	11.26	263.57	755.71	
t_b	255.79	14.15	0	91.46	6.01	0	

не оказывает существенного влияния на работу системы в целом. Участок между станциями Тунх, Мандал, Аршаант и Толгойт — “узкое место”. Во-первых, в узлах 21, 24, 27 и 31, которые описывают работу этих станций, зафиксирована наибольшая продолжительность блокировки работы каналов (t_b). Во-вторых, работа единственного пути между станциями описывается парой узлов. В этом случае K для каждого узла не должен превышать 0.5. Для узлов 19 и 20, 22 и 23, 25 и 26, 29 и 30 этот показатель составляет 0.55 и более, т. е. пропускной способности соответствующих участков недостаточно.

Одним из известных способов увеличения пропускной способности однопутной железной дороги при относительно небольших финансовых затратах является увеличение числа путей на разъездах между станциями. Это позволит пропускать по одному пути сразу два пакета поездов в разных направлениях. Проверим эффективность подобной меры для Улан-Баторской железной дороги.

Эксперимент 2. В табл. 4 представлены результаты моделирования при следующих изменениях в модели: размер обслуживаемой группы в узлах 8, 11, 14, 17, 20, 23 и 30 увеличен с одного до двух; значения элементов в матрицах (1) увеличены на 20 %.

Увеличение числа путей на разъездах с двух до трех позволило повысить общую пропускную способность всего участка с 59 до 71 поезда в сутки, т. е. более чем на 20 %. Однако рост поездопотоков привел к увеличению времени ожидания отправления поездов на станциях в среднем на 37 % и загрузки железнодорожных путей на 15 % в среднем (K), в частности, загрузка путей между станциями Дархан 2 — Салхит, Эрхет — Буунхараа — Зуунхараа приблизилась к максимальной (в узлах 7, 13 и 16 $K > 0.55$). В ходе эксперимента наблюдалась одна коллизия в узле 15 (станция Баруунхараа). Таким образом, данное решение является приемлемым при невозможности проведения полной реконструкции объекта и требует относительно небольших финансовых затрат.

Дальнейшее увеличение объемов поездопотоков будет труднореализуемо из-за малой вместимости самих станций. В частности, Баруунхараа имеет 4 пути, Тунх и Мандал по 5 путей. Именно в узлах СеМО, которые соответствуют данным станциям, происходили коллизии. Поэтому значительно повысить общую пропускную способность Улан-Баторской железной дороги возможно лишь при проведении полной реконструкции с созданием двухпутного сообщения [5]. Основной трафик на ней составляют грузовые поезда, поэтому предположим, что после модернизации на всей дороге будет использоваться автоматическая блокировка с трехзначной сигнализацией [27]. Спрогнозируем возможную пропускную способность выбранной железнодорожной линии в этом случае.

Эксперимент 3. Расстояние между соседними поездами при двухпутном сообщении и наличии автоматической блокировки должно быть три и более длин тормозного пути (блок-участок) ℓ , где $1 \leq \ell \leq 2.6$ км [27]. Также сам поезд занимает один блок-участок, тогда максимальное число поездов x , которые могут одновременно находиться на пути между станциями, определяется его длиной (L_i): $x = [L_i/(4\ell)]$, где $[\cdot]$ — операция округления. Исходя из имеющихся сведений об особенностях УБЖД, примем длину блок-участка равной 1.5 км.

Внесем следующие изменения в модель. Во-первых, размер обслуживаемой группы в узлах, соответствующих участку с одним путем (7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 29 и 30), уменьшен до одного, а число каналов в этих узлах станет равным количеству поездов, помещающихся на соответствующий участок (x). Продолжительность обслуживания в канале — время движения поезда по этому участку. Во-вторых, число каналов в узлах 12, 15, 21 и 24 доведено до 6, т. е. добавлены новые пути на станциях Эрхэт, Баруунхараа, Тунх и Мандал. В-третьих, значения элементов в матрицах (1) увеличены на 150 %. В-четвертых, изменяются следующие элементы в матрицах:

Элементы матрицы P_1 :

$$p_{12,10} = p_{15,13} = p_{18,16} = p_{21,19} = p_{24,22} = 1; \quad p_{9,7} = p_{27,25} = p_{31,29} = 0.94.$$

$$p_{9,8} = p_{12,11} = p_{15,14} = p_{18,17} = p_{21,20} = p_{24,23} = p_{31,30} = 0.$$

Элементы матрицы P_2 :

$$p_{5,8} = p_{9,11} = p_{12,14} = p_{15,17} = p_{18,20} = p_{21,23} = p_{27,30} = 1;$$

$$p_{5,7} = p_{9,10} = p_{12,13} = p_{15,16} = p_{18,19} = p_{21,22} = p_{27,29} = 0.$$

В табл. 5 представлены результаты численного исследования полученной модели.

Проанализируем результаты моделирования (см. табл. 5) и сравним их с результатами эксперимента 2. Можно видеть, что, во-первых, среднее время прохождения поезда

по УБЖД $T_{\text{ход}}$ уменьшилось на 12 %, а время ожидания отправления T_{lock} — почти на 52 %. Во-вторых, участок от станции Тунх до станции Толгойт теперь не является “узким местом”, так как протяженность путей между этими станциями перестала быть ограничивающим фактором. В-третьих, при увеличении объемов поездопотоков в системе еще останется запас пропускной способности, что подтверждается низкими значениями коэффициента занятости путей (каналов) $K < 0.55$ для приемоотправочных парков и путей между станциями. Таким образом, создание двухпутного сообщения повышает пропускную способность северной части УБЖД более чем в два раза. Это позволит вывести рассматриваемый транспортный коридор из РФ в Китай на первое место по транзиту контейнеров, а учитывая, что он самый короткий, то и получить существенную экономическую выгоду. Подобные суждения уже высказывались ранее экономистами [6].

Общий вывод по результатам вычислительного эксперимента. Пропускной способности северной части Улан-Баторской железной дороги достаточно для обслуживания объемов поездопотоков, запланированных на 2025 г. Участок между станциями Тунх, Мандал, Аршаант и Толгойт является “узким местом” в системе из-за большого расстояния между станциями, а также недостаточной вместимости самих станций.

Дальнейшее повышение объемов поездопотоков потребует модернизации железнодорожной магистрали. Здесь возможны два технических решения. Первое – увеличение числа путей на разъездах с двух до трех, что позволит повысить пропускную способность на 20 %. Это решение относительно простое и дешевое, однако его реализация не устраним проблему полностью и приведет к увеличению простоя поездов на станциях и может рассматриваться в качестве временной меры. Второе — создание двухпутного сообщения, что увеличит пропускную способность этой железнодорожной линии более чем вдвое и существенно сократит время движения поездов. Разумеется, для его реализации потребуются значительные капиталовложения и затраты времени [6]. Тем не менее представляется, что в долгосрочной перспективе именно второе решение будет наиболее эффективным, что, заметим, согласуется с мнением некоторых специалистов в области экономики транспорта [5].

Заключение

Через территорию Монголии проходит наиболее короткий транспортный коридор, связывающий центральные регионы РФ со столицей Китая. Текущее состояние железных дорог в Монголии, которые характеризуются однопутным движением, не позволяет удовлетворить растущий спрос на транзитные перевозки, поэтому все большую актуальность приобретает проблема увеличения пропускной способности УБЖД.

Для поиска путей решения данной проблемы в настоящей работе проведен анализ движения поездов по северной (наиболее загруженной) части указанной магистрали. В качестве инструмента исследования применено математическое моделирование на основе теории массового обслуживания. Модель имеет вид сети массового обслуживания с 41 узлом, четырьмя ВМАР-потоками и четырьмя типами заявок, для каждого из которых построена отдельная маршрутная матрица. Благодаря этому она отображает наиболее значимые для цели исследования свойства УБЖД: однопутную систему движения, поступление пакетов (групп) поездов с нескольких направлений, нелинейную структуру сети и разные маршруты движения поездопотоков на ней, которые зависят от категории поезда и его направления.

Математическая модель программно реализована в виде имитационной модели и численно исследована. На основе полученных результатов исследована пропускная способность УБЖД, найдены “узкие места” в ее структуре при текущем и растущем объемах поездопотоков. Показано, что для удовлетворения спроса на контейнерные перевозки [6] в ближайшей перспективе достаточно увеличить число путей на разъездах, а полная реконструкция УБЖД с созданием двухпутного сообщения позволит вывести железнодорожный коридор, проходящий через территорию Монголии, на первое место по объему транзита контейнеров среди всех сухопутных транспортных коридоров Россия – Китай.

По результатам как представленных выше, так и выполненных ранее [24, 25] исследований можно сделать вывод о том, что получен гибкий и достаточно универсальный модельно-алгоритмический аппарат, позволяющий исследовать широкий спектр транспортных систем, подверженных влиянию случайных факторов. Развитие исследований в данном направлении, в первую очередь, может быть связано с созданием и исследованием полной модели УБЖД от станции Наушки до станции Эрлянь. Также видится перспективным применение предложенной методики для изучения Байкало-Амурской магистрали, которая в значительной части, как и УБЖД, имеет однопутное сообщение.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: математическая модель построена в рамках проекта № госрегистрации 121041300065-9; численное исследование модели выполнено в рамках проекта № госрегистрации 121032400051-9.

Список литературы

- [1] **Постников С.Б.** Железные дороги: адаптация к переменам и новым реальностям. М.: Прометей; 2022: 350.
- [2] Контейнерные железнодорожные перевозки на евразийском пространстве в 2021 г. ERAI январь 2022. Адрес доступа: <https://index1520.com/analytics/konteynerye-zheleznodorozhnye-perevozki-na-evraziyskom-prostranstve-v-2021-godu/> (дата обращения 05.05.2023).
- [3] Долгосрочная программа развития ОАО “РЖД” до 2025 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/553927831> (дата обращения 09.05.2023).
- [4] Восточный полигон определен ключевым транспортным проектом 2023 года. Информационная группа “Интерфакс”. Адрес доступа: <https://www.interfax.ru/russia/878955> (дата обращения 01.01.2023).
- [5] **Батурин А.П., Балжир М.** Выбор оптимального варианта развития Улан-Баторской железной дороги. Мир транспорта. 2015; 13(2):154–165.
- [6] **Самуйлов В.М., Ткачева Т.Н., Калашников А.Е.** Развитие проекта “Новый шелковый путь”: функционирование в период пандемии и рост контейнерных перевозок. Инновационный транспорт. 2021; (2):8–13. DOI:10.20291/2311-164X-2021-2-8-13.
- [7] **Миротин Л.Б., Гудков В.А., Зырянов В.В., Некрасов А.Г., Балалаев А.С., Ларин О.Н.** Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах. М.: Горячая линия — Телеком; 2017: 704.
- [8] **Акулиничев В.М., Кудрявцев В.А., Корешков А.Н.** Математические методы в эксплуатации железных дорог. М.: Транспорт; 1981: 223.
- [9] **Поттгофф Г.** Учение о транспортных потоках. Пер. с нем. В.И. Шейко, В.Н. Воскресенского. М.: Транспорт; 1975: 343.

- [10] **Kleinrock L.** Queueing systems. N.Y.: Wiley Interscience; 1975: 417.
- [11] **Medhi J.** Stochastic models in queueing theory. 2nd edn. San Diego: Academic Press; 2002: 504.
- [12] **Dudin A., Klimenok V., Vishnevsky V.** The theory of queueing systems with correlated flows. Switzerland: Springer Nature; 2019: 405. DOI:10.1007/978-3-030-32072-0.
- [13] **Вишневский В.М.** Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера; 2003: 512.
- [14] **Wilson N., Fourie C.J., Delmistro R.** Mathematical and simulation techniques for modelling urban train networks. South African Journal of Industrial Engineering. 2016; (27):109–119. DOI:10.7166/XX-X-1364.
- [15] **Higgins A., Kozan E.** Modeling train delays in urban networks. Transportation Science. 1998; (32):346–357. Available at: <http://www.jstor.org/stable/25768833>.
- [16] **Huisman T., Boucherie R.J.** Running times on railway sections with heterogeneous train traffic. Transportation Research Part B: Methodological. 2001; (35):271–292. DOI:10.1016/S0191-2615(99)00051-X.
- [17] **Huisman T., Boucherie R.J., van Dijk N.M.** A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands. European Journal of Operational Research. 2002; (142):30–51. DOI:10.1016/S0377-2217(01)00269-7.
- [18] **Weik N., NieBen N.** Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors. Journal of Rail Transport Planning & Management. 2020; (15):100203. DOI:10.1016/j.jrtpm.2020.100203.
- [19] **Marinov M., Viegas J.** A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. Simulation Modelling Practice and Theory. 2011; (19):516–539. DOI:10.1016/j.simpat.2010.08.009.
- [20] **Dragovic B., Park N.-K., Zrnic N.D., Mestrovic R.** Mathematical models of multiserver queueing system for dynamic performance evaluation in port. Mathematical Problems in Engineering. 2012; (2012):1–19. DOI:10.1155/2012/710834.
- [21] **Lyubchenko A., Bartosh S., Kopytov E., Shiler A., Kildibekov A.** AnyLogic-based discrete event simulation model of railway junction. Silhavy R., Senkerik R. (Eds.) Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017; (574). DOI:10.1007/978-3-319-57264-2_14.
- [22] **Bychkov I.V., Kazakov A.L., Lempert A.A., Bukharov D.S., Stolbov A.B.** An intelligent management system for the development of a regional transport logistics infrastructure. Automation and Remote Control. 2016; (2):332–343. DOI:10.1134/S0005117916020090.
- [23] **Бычков И.В., Казаков А.Л., Жарков М.Л.** Интеллектуальная технология моделирования железнодорожных станций на основе теории массового обслуживания. 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. Лапидуса, А.Т. Осьмилина. СПб.: ЛЕМА; 2019: 185–193.
- [24] **Zharkov M., Lempert A., Pavidis M.** Simulation of railway marshalling yards based on four-phase queueing systems. Dudin A., Nazarov A. (Eds.) Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications. ITMM 2020. Communications in Computer and Information Science. 2021; (1391):143–154. DOI:10.1007/978-3-030-72247-0_11.
- [25] **Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M.** Modeling of railway stations based on queueing networks. Applied Sciences. 2021; (11):2425. DOI:10.3390/app11052425.

- [26] **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):120–132. DOI:10.38028/ESI.2022.25.1.010.
- [27] **Кондратьева Л.А.** Системы регулирования движения на железнодорожном транспорте. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте; 2016: 324.

Вычислительные технологии, 2023, том 28, № 6, с. 17–36. © ФИЦ ИВТ, 2023
Computational Technologies, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 17–36. © FRC ICT, 2023

ISSN 1560-7534
eISSN 2313-691X

MATHEMATICAL MODELLING

DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.003

Application of queuing theory for modelling of the Ulaanbaatar Railway

I. V. BYCHKOV, M. L. ZHARKOV, A. L. KAZAKOV*

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

*Corresponding author: Alexander L. Kazakov, e-mail: kazakov@icc.ru

Received May 15, 2023, revised September 01, 2023, accepted September 06, 2023.

Abstract

The article considers the problem of assessing the capacity of the Ulaanbaatar Railway, which is a part of the shortest transport corridor from Central Russia to Northeast China. In its current state, Mongolian railways cannot satisfy the growing demand for transit traffic, so the problem of increasing their capacity is essential. To find ways of solving this problem, we analyze the running of trains along the northern (most loaded) part of the trunk railway. Mathematical modelling based on the queuing theory is used as a research tool. The model has the form of a queuing network with 40 nodes, four BMAP flows, and four types of requests, for each of which a separate route matrix is constructed. The model describes the most significant properties of the Ulaanbaatar railway for the study, such as a single-track system of running, the arrival of train packages from several directions, the non-linear structure of the network, and the different routes of the train traffic. The mathematical model is implemented in the form of a simulation model and numerically studied. Based on the results obtained, we can draw the following conclusions. First, to meet the demand for container transportation in the short term, it is enough to increase the number of tracks at the sidings. Secondly, the complete reconstruction of the Ulaanbaatar Railway with the construction of double-track lines will allow bringing the railway corridor for passing through the territory of Mongolia. The major outcome is expected to be the volume of container transit among all land transport corridors between Russia and China. In addition to solving the important practical problem, the research results suggest that the presented highly adaptive model-algorithmic apparatus allows to studying a wide range of transport systems affected by random factors.

Keywords: mathematical modelling, queuing theory, computational experiment, railway transport, international transportation.

Citation: Bychkov I.V., Zharkov M.L., Kazakov A.L. Application of queuing theory for modelling of the Ulaanbaatar Railway. Computational Technologies. 2023; 28(6):17–36. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.003. (In Russ.)

Acknowledgements. The study was funded by Ministry of Science and Education of the Russian Federation: the mathematical model is constructed in the framework of the project No. 121041300065-9; the numerical study of the model is performed in the framework of the project No. 121032400051-9.

References

1. **Postnikov S.B.** Zheleznye dorogi: adaptatsiya k peremenam i novym real'nostyam [Railways: adaptation to changes and new realities]. Moscow: Prometey; 2022: 350. (In Russ.)
2. Konteynernye zheleznodorozhnye perevozki na evraziyskom prostranstve v 2021 g. ERAI yanvar' 2022 [Cargo container rail transportation in the Eurasian space in 2021. ERAI January 2022]. Available at: <https://index1520.com/analytics/konteynerye-zheleznodorozhnye-perevozki-na-evraziyskom-prostranstve-v-2021-godu/> (accessed 05.05.2023). (In Russ.)
3. Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO "RZhD" do 2025 goda [The long-term development program of public corporation "Russian Railways" until 2025]. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-r. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/553927831> (accessed 05.05.2023). (In Russ.)
4. Vostochnyy poligon opredelen klyuchevym transportnym proektom 2023 goda [The Eastern polygon has been identified as the key transport project of 2023]. Interfax International Information Group. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/878955> (accessed 01.05.2023). (In Russ.)
5. **Baturin A.P., Balzhir M.** Selection of optimal variants for Ulaanbaatar Railway development. World of Transport and Transportation. 2015; 13(2):154–165. (In Russ.)
6. **Samuilov V.M., Tkacheva T.N., Kalashnikov A.E.** Development of the New Silk Road project: operation during the pandemic and the increase in container transportation. Innotrans Journal. 2021; (2):8–13. DOI:10.20291/2311-164X-2021-2-8-13.
7. **Mirotin L.B., Gudkov V.A., Zyryanov V.V., Nekrasov A.G., Balalaev A.S., Larin O.N.** Upravlenie gruzovymi potokami v transportno-logisticheskikh sistemah [Cargo flow management in transport and logistics systems]. Moscow: Hotline — Telecom; 2017: 704. (In Russ.)
8. **Akulinichev V.M., Kudryavtsev V.A., Koreshkov A.N.** Matematicheskie metody v ekspluatatsii zheleznikh dorog [Mathematical methods in railway operation]. Moscow: Transport; 1981: 223. (In Russ.)
9. **Potthoff G.** Verkehrsstromungslehre. TRANSPRESS-VEB; 1970. 344.
10. **Kleinrock L.** Queueing systems. N.Y.: Wiley Interscience; 1975: 417.
11. **Medhi J.** Stochastic models in queueing theory. 2nd edn. San Diego: Academic Press; 2002: 504.
12. **Dudin A., Klimenok V., Vishnevsky V.** The theory of queueing systems with correlated flows. Switzerland: Springer Nature; 2019: 405. DOI:10.1007/978-3-030-32072-0.
13. **Vishnevskiy V.M.** Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setey [Theoretical foundations of computer network design]. Moscow: Tekhnosfera; 2003: 512. (In Russ.)
14. **Wilson N., Fourie C.J., Delmistro R.** Mathematical and simulation techniques for modelling urban train networks. South African Journal of Industrial Engineering. 2016; (27):109–119. DOI:10.7166/XX-X-1364.
15. **Higgins A., Kozan E.** Modeling train delays in urban networks. Transportation Science. 1998; (32):346–357. Available at: <http://www.jstor.org/stable/25768833>.
16. **Huisman T., Boucherie R.J.** Running times on railway sections with heterogeneous train traffic. Transportation Research Part B: Methodological. 2001; (35):271–292. DOI:10.1016/S0191-2615(99)00051-X.
17. **Huisman T., Boucherie R.J., van Dijk N.M.** A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands. European Journal of Operational Research. 2002; (142):30–51. DOI:10.1016/S0377-2217(01)00269-7.
18. **Weik N., NieBen N.** Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors. Journal of Rail Transport Planning & Management. 2020; (15):100203. DOI:10.1016/j.jrtpm.2020.100203.
19. **Marinov M., Viegas J.** A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. Simulation Modelling Practice and Theory. 2011; (19):516–539. DOI:10.1016/j.simpat.2010.08.009.
20. **Dragovic B., Park N.-K., Zrnica N.D., Mestrovic R.** Mathematical models of multiserver queueing system for dynamic performance evaluation in port. Mathematical Problems in Engineering. 2012; (2012):1–19. DOI:10.1155/2012/710834.
21. **Lyubchenko A., Bartosh S., Kopytov E., Shiler A., Kildibekov A.** AnyLogic-based discrete event simulation model of railway junction. Silhavy R., Senkerik R. (Eds.) Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017; (574). DOI:10.1007/978-3-319-57264-2_14.

22. **Bychkov I.V., Kazakov A.L., Lempert A.A., Bukharov D.S., Stolbov A.B.** An intelligent management system for the development of a regional transport logistics infrastructure. *Automation and Remote Control*. 2016; (2):332–343. DOI:10.1134/S0005117916020090.
23. **Bychkov I.V., Kazakov A.L., Zharkov M.L.** *Intellectual'naya tehnologiya modelirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy na osnove teorii massovogo obsluzhivaniya. Upravlenie tovarnymi potokami i perevoznym protsessom na zheleznodorozhnom transporte na osnove klientoorientirovannosti i logisticheskikh printsipov: kollektivnaya monografiya chlenov i nauchnykh partnerov Obedinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" [Intelligent technology for modelling railway stations based on queuing theory. Management of goods flows and transportation process on railway transport based on customer orientation and logistics principles: a collective monograph of members and scientific partners of the Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"]*. Saint Peterburg: LEMA; 2019: 185–193. (In Russ.)
24. **Zharkov M., Lempert A., Pavidis M.** Simulation of railway marshalling yards based on four-phase queuing systems. Dudin A., Nazarov A. (Eds.) *Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications. ITMM 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2021; (1391):143–154. DOI:10.1007/978-3-030-72247-0_11.
25. **Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M.** Modeling of railway stations based on queuing networks. *Applied Sciences*. 2021; (11):2425. DOI:10.3390/app11052425.
26. **Zharkov M.L., Suprunovsky A.V.** On modelling sections of the railway network based on queuing theory. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2022; (1):120–132. DOI:10.38028/ESI.2022.25.1.010.
27. **Kondratieva L.A.** *Systems of traffic regulation in railway transport [Sistemy regulirovaniya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte]*. Moscow: Training and Methodological Center of Railway Transport; 2016: 324. (In Russ.)