

Управление процессами перевозок

УДК 656.21:004.94

М. А. Власов, А. Л. Казаков, А. В. Супруновский

Моделирование участковой железнодорожной станции Байкало-Амурской магистрали в среде AnyLogic

UDC 656.21:004.94

M. A. Vlasov, A. L. Kazakov, A. V. Suprunovsky

Modeling of a district railway station of the Baikal-Amur Mainline in the AnyLogic environment

Аннотация

В статье выполняется исследование участковой железнодорожной станции Таксимо, расположенной в зоне Байкало-Амурской магистрали, с использованием имитационной модели. Моделирование производится в среде AnyLogic, преимуществами которой являются использование различных подходов (дискретно-событийного, агентного и др.), детализация работы объектов инфраструктуры, а также наличие набора библиотек моделирования. Модель учитывает

характерные свойства станции при изменении интенсивности движения поездов.

Особенность работы станции Таксимо заключается в смене вида тяги (с электрической на автономную), а также в многочисленных операциях, производимых с подвижным составом (смена поездных локомотивов, технический и коммерческий осмотры, отцепка групп вагонов с хвоста составов и др.). Эти операции влияют на количество пропущенных пар поездов через станцию Таксимо, из-за которых

снижается пропускная способность не только станции, но и Байкало-Амурской магистрали.

На основании анализа результатов моделирования делаются выводы о работе станции Таксимо при увеличении поездопотока с учетом числа бригад пункта технического обслуживания и количества свободных приемо-отправочных путей.

Ключевые слова: участковая железнодорожная станция, пропускная и провозная способности, транспортная сеть, имитационное

Матвей Алексеевич Власов, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: vlasovmatvey.2001@yandex.ru. ORCID 0009-0000-5881-6270.

Александр Леонидович Казаков, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения, главный научный сотрудник Института динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия. E-mail: kazakov@icc.ru. ORCID 0000-0002-3047-1650.

Антон Викторович Супруновский, старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия. E-mail: as.irgups@gmail.com. ORCID 0000-0001-8356-4271.

© М. А. Власов, А. Л. Казаков, А. В. Супруновский, 2025

Matvey Alekseevich Vlasov, postgraduate student of Operational Work Management Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: vlasovmatvey.2001@yandex.ru. ORCID 0009-0000-5881-6270.

Alexander Leonidovich Kazakov, DSc in Physics and Mathematics, Professor of the Operational Work Management Department, Irkutsk State Transport University, Chief Researcher of Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia. E-mail: kazakov@icc.ru. ORCID 0000-0002-3047-1650.

Anton Viktorovich Suprunovsky, Senior Lecturer of Operational Work Management Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: as.irgups@gmail.com. ORCID 0000-0001-8356-4271.

© М. А. Власов, А. Л. Казаков, А. В. Супруновский, 2025

моделирование, вычислительный эксперимент.

DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-41-52

Abstract

The article studies the Taksimo railway station located in the area of Baikal-Amur Mainline using a simulation model. The simulation is carried out in AnyLogic environment, advantages of which are the use of different approaches (discrete-event, agent, etc.), detailed work of infrastructure objects, as well as the availability of a set of libraries of simulation. The

model takes into account the characteristic properties of the station when the traffic intensity changes.

The peculiarity of the Taksimo railway station consists in changing the type of traction (from electric to autonomous), as well as in numerous operations carried out with a rolling stock (change of train locomotives, technical and commercial inspections, disconnection of wagon groups from the tail of trains, etc.). These operations affect the number of trains passing through Taksimo station, which reduces the capacity

not only of the station, but also of the Baikal-Amur Mainline.

Based on the analysis of the simulation results, conclusions are made about the operation of the Taksimo station with an increase in train flow, taking into account the number of maintenance station crews and the number of free reception and transmission lines.

Keywords: district railway station, throughput and carrying capacity, transport network, simulation modeling, computational experiment

DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-41-52

Введение

В последние годы наблюдается тенденция усиления санкционной политики в отношении Российской Федерации со стороны стран Европы. Это повлекло за собой переориентацию грузопотоков с запада на восток – в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Основные пути доставки грузов железнодорожным транспортом через территорию России – Транссибирская и Байкало-Амурская (БАМ) магистрали. На сегодняшний день загрузка Транссибирской магистрали близка к максимальной [1], поэтому альтернативным путем доставки грузов является БАМ.

В соответствии с программой развития БАМа сейчас проходит третий этап его модернизации, который рассчитан до 2030 г. [2] и предусматривает увеличение пропускной и провозной способностей магистрали со 180 до 210 млн т перевозимых грузов в год [3].

При увеличении объемов перевозки грузов необходимо учитывать существующие инфраструктурные ограничения: в настоящее время движение по БАМу преимущественно однопутное, часть участков не электрифицирована, станции требуют реконструкции. Поэтому на текущий момент важными аспектами

модернизации становятся улучшение технического оснащения и совершенствование технологии работы железнодорожных станций.

В настоящее время для изучения технических и технологических процессов работы станций все чаще используют имитационное моделирование (ИМ), в основе которого лежат дискретно-событийный, агентный и другие подходы. Использование дискретно-событийного подхода [4, 5] дает возможность выбрать маршрут движения поездов по станции с учетом занятости путей и их спецификации. В свою очередь, агентный подход [6] позволяет детально описать статические инфраструктурные (путевое развитие, технические средства и др.) и динамические (локомотивы, вагоны, поезда) объекты.

Существуют различные системы для имитационного моделирования транспортных систем [7, 8]. Среди основных можно выделить следующие: ИМЕТРА, ИСТРА, Arena, AnyLogic. Все эти системы дают возможность использовать дискретно-событийный и агентный подходы. Однако отличительная особенность систем ИМЕТРА, ИСТРА, Arena заключается в том, что они в первую очередь ориентированы на моделирование крупных объектов железнодорожной инфраструктуры, поэтому

в них достаточно сложно детально моделировать технологические процессы работы станции.

Система AnyLogic [4, 9] не только позволяет использовать различные подходы к моделированию, в том числе агентный, но и дает возможность моделировать железнодорожные объекты как на микроуровне (детальное отображение технологических процессов на станции), так и на макроуровне [10] (отображение работы железнодорожных узлов или участков). Кроме того, AnyLogic имеет набор различных библиотек, среди которых есть и железнодорожная. Соответственно использование готовых элементов из библиотеки значительно упрощает построение модели.

Ранее авторами были разработаны математические и компьютерные модели станций [11–13] с использованием аппарата теории массового обслуживания [13, 14]. В ходе проведенных экспериментов было установлено, что этот подход не позволяет детально моделировать рассматриваемые объекты и технологические процессы. Исходя из полученного опыта, с учетом исследований других специалистов в области математического моделирования [15], а также возможностей ИМ было принято решение использовать имитационное моделирование в программной среде AnyLogic.

В данном исследовании в качестве объекта выбрана станция Таксимо, так как на ней производится ряд трудоемких технологических операций (смена поездных локомотивов, увеличение либо уменьшение длины и массы железнодорожных составов), оказывающих влияние на организацию движения всего БАМа, что делает ее одним из ключевых объектов магистрали.

Цель исследования – с помощью методов имитационного моделирования оценить загрузку участковой железнодорожной станции Таксимо при увеличении входящего поездопотока.

Для достижения поставленной цели определим задачи исследования:

1. Создать модель участковой железнодорожной станции в среде имитационного моделирования AnyLogic.
2. Выполнить моделирование станции в условиях увеличения существующего поездопотока.
3. Определить наличие узких мест станции при текущем техническом оснащении.

Описание исследуемого объекта

Станция Таксимо расположена на Байкало-Амурской магистрали (рис. 1) и является последней крупной станцией Восточно-Сибирской железной дороги.



Рис. 1. Схема Байкало-Амурской магистрали

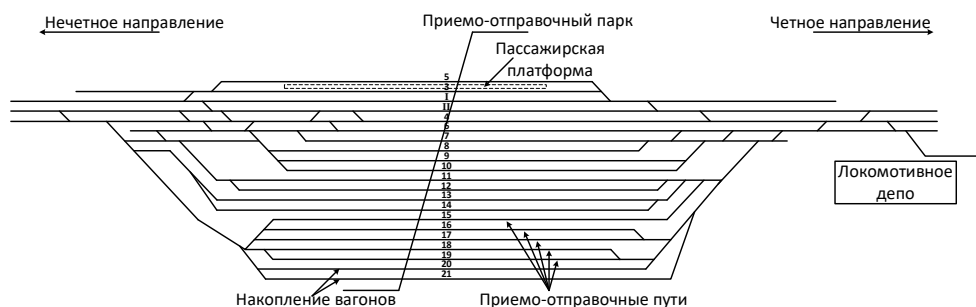


Рис. 2. Схема участковой железнодорожной станции Таксимо

По функциональным особенностям Таксимо является участковой станцией, по объему работы относится к первому классу. Она включает в себя 21 путь в приемо-отправочном парке, пути, принадлежащие локомотивному и вагонному хозяйствам, а также пути необщего пользования.

На станции выполняются следующие операции с поездами: прием, отправление и расформирование; технический и коммерческий осмотры; смена локомотивов и бригад; изменение длины и массы составов; грузовые операции; посадка и высадка пассажиров.

В соответствии с технологией работы станции у каждого поезда происходит смена вида тяги, которая представляет собой изменение напряжения и тока либо переход с электрического питания на автономное [16]. Это означает, что для дальнейшего движения подвижного состава требуется произвести замену поездного локомотива или использовать сложный двухсистемный электровоз. Затраченное на это время негативно влияет на пропускную способность магистрали.

У поездов с массой, превышающей значения для автономной тяги, выполняется отцепка вагонов. Затем они переставляются на свободный путь под накопление.

Технический осмотр поездов производится работниками пункта технического обслуживания (ПТО) и включает в себя выявление и устранение неисправностей оборудования вагонов, а также их

подготовку к отправлению [17]. Схема станции изображена на рис. 2.

Время выполнения операций на станции Таксимо, согласно технологическим процессам работы с поездами, составляет 89 мин для смены только поездного локомотива и 109 мин для смены поездного локомотива и отцепки групп вагонов с хвоста поезда. Таким образом, обработка подвижного состава занимает существенно больше времени, чем на железнодорожных станциях, где нет изменения вида тяги.

Построение модели с помощью железнодорожной библиотеки

В среде AnyLogic за создание железнодорожных составов и имитации поездопотока отвечает блок TrainSource. Он позволяет задать в модели расписание прибытия поездов на железнодорожную станцию.

На основе статистических данных об объемах перевозок на Восточном полигоне за последние три года и графика движения поездов за 2023 г. был выбран целевой показатель в 30 пар грузовых поездов в сутки. Исходя из целевого показателя авторами составлено модельное расписание движения грузовых поездов, маневровых и поездных локомотивов (табл. 1). В соответствии с ним в модели осуществляется прибытие поездов на станцию. Это расписание служит отправной точкой для последующего моделирования.

Таблица 1

График движения грузовых поездов на станции

№ поезда	Время прибытия поезда	Время выхода поездного локомотива из депо	Время прибытия маневрового локомотива для отцепки групп вагонов	Время отправления поезда со станции
1	08.02.2025 0:00	08.02.2025 0:55	–	08.02.2025 1:29
2	08.02.2025 0:48	08.02.2025 1:58	08.02.2025 1:41	08.02.2025 2:37
3	08.02.2025 1:36	08.02.2025 2:46	08.02.2025 2:29	08.02.2025 3:25
4	08.02.2025 2:24	08.02.2025 3:19	–	08.02.2025 3:53
5	08.02.2025 3:12	08.02.2025 4:22	08.02.2025 4:05	08.02.2025 5:01
6	08.02.2025 4:00	08.02.2025 5:10	08.02.2025 4:53	08.02.2025 5:49
7	08.02.2025 4:48	08.02.2025 5:43	–	08.02.2025 6:17
8	08.02.2025 5:36	08.02.2025 6:46	08.02.2025 6:29	08.02.2025 7:25
9	08.02.2025 6:24	08.02.2025 7:34	08.02.2025 7:17	08.02.2025 8:13
10	08.02.2025 7:12	08.02.2025 8:07	–	08.02.2025 8:41
11	08.02.2025 8:00	08.02.2025 9:10	08.02.2025 8:53	08.02.2025 9:49
12	08.02.2025 8:48	08.02.2025 9:58	08.02.2025 9:41	08.02.2025 10:38
13	08.02.2025 9:36	08.02.2025 10:31	–	08.02.2025 11:05
14	08.02.2025 10:24	08.02.2025 11:34	08.02.2025 11:17	08.02.2025 12:13
15	08.02.2025 11:12	08.02.2025 12:22	08.02.2025 12:05	08.02.2025 13:01
16	08.02.2025 12:00	08.02.2025 12:55	–	08.02.2025 13:29
17	08.02.2025 12:48	08.02.2025 13:58	08.02.2025 13:41	08.02.2025 14:37
18	08.02.2025 13:36	08.02.2025 14:46	08.02.2025 14:29	08.02.2025 15:25
19	08.02.2025 14:24	08.02.2025 15:19	–	08.02.2025 15:53
20	08.02.2025 15:12	08.02.2025 16:22	08.02.2025 16:05	08.02.2025 17:01
21	08.02.2025 16:00	08.02.2025 17:10	08.02.2025 16:53	08.02.2025 17:49
22	08.02.2025 16:48	08.02.2025 17:43	–	08.02.2025 18:17
23	08.02.2025 17:36	08.02.2025 18:46	08.02.2025 18:29	08.02.2025 19:25
24	08.02.2025 18:24	08.02.2025 19:34	08.02.2025 19:17	08.02.2025 20:13
25	08.02.2025 19:12	08.02.2025 20:07	–	08.02.2025 20:41
26	08.02.2025 20:00	08.02.2025 21:10	08.02.2025 20:53	08.02.2025 21:49
27	08.02.2025 20:48	08.02.2025 21:58	08.02.2025 21:41	08.02.2025 22:37
28	08.02.2025 21:36	08.02.2025 22:31	–	08.02.2025 23:05
29	08.02.2025 22:24	08.02.2025 23:34	08.02.2025 23:17	09.02.2025 0:13
30	08.02.2025 23:12	09.02.2025 0:22	09.02.2025 0:05	09.02.2025 1:01

При построении модели станции применяется блок `SelectOutput5`, который имеет пять выходов (условий). С его помощью была реализована проверка наличия железнодорожного состава на путях. Свободный путь по умолчанию имел значение `true`, а при

нахождении и остановке поезда на соответствующем пути ему присваивалось значение `false`. Далее процесс повторялся: при освобождении пути присваивалось значение `true`, при занятости `false` и т. д. В результате в процессе моделирования было определено количество

занятых и свободных путей при заданной интенсивности движения (прибытие поездов каждые 48 мин).

За движение поездов на станции в модели отвечает блок TrainMoveTo, в котором было задано движение железнодорожных составов согласно кратчайшему маршруту. Также в блоке TrainMoveTo выполнялась проверка наличия свободности пути.

Время станционных операций, а именно нахождения железнодорожных составов на станции, реализовано с помощью блоков Delay – в них заданы временные задержки (время обработки составов на станции).

В модели также предусмотрены следующие маневровые операции: смена поездного локомотива на тепловоз или

тепловоза на поездном локомотив, заезд маневрового локомотива для отцепки групп вагонов с хвоста составов. Эти операции невозможно выполнить без использования блоков TrainCouple, которые отвечают за прицепку поездного локомотива либо тепловоза (в зависимости от рода тяги на исследуемом участке движения), а также за прицепку маневрового локомотива к хвосту состава для последующей отцепки групп вагонов с помощью блока TrainDecouple (в модели предусмотрено, что с хвоста поезда отцепляется 6 вагонов). Из отцепленных вагонов формируется дополнительный состав на свободном пути.

Работа модели представлена в виде блок-схемы на рис. 3.

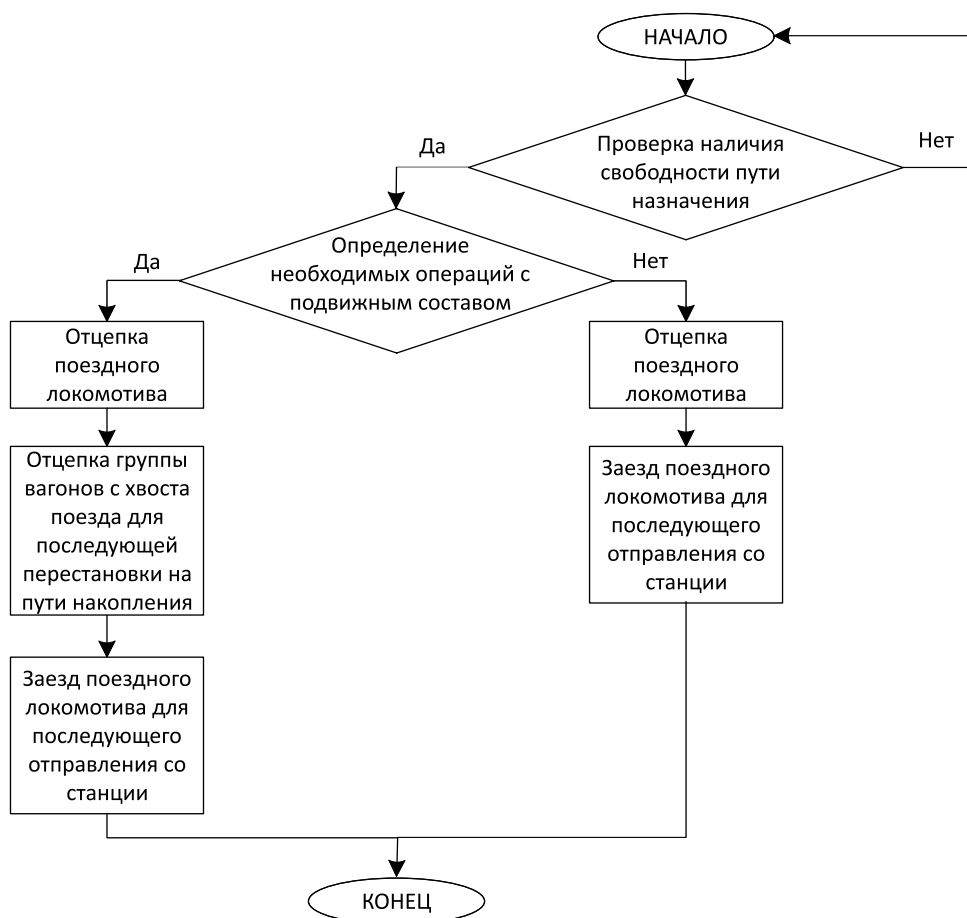


Рис. 3. Блок-схема работы модели

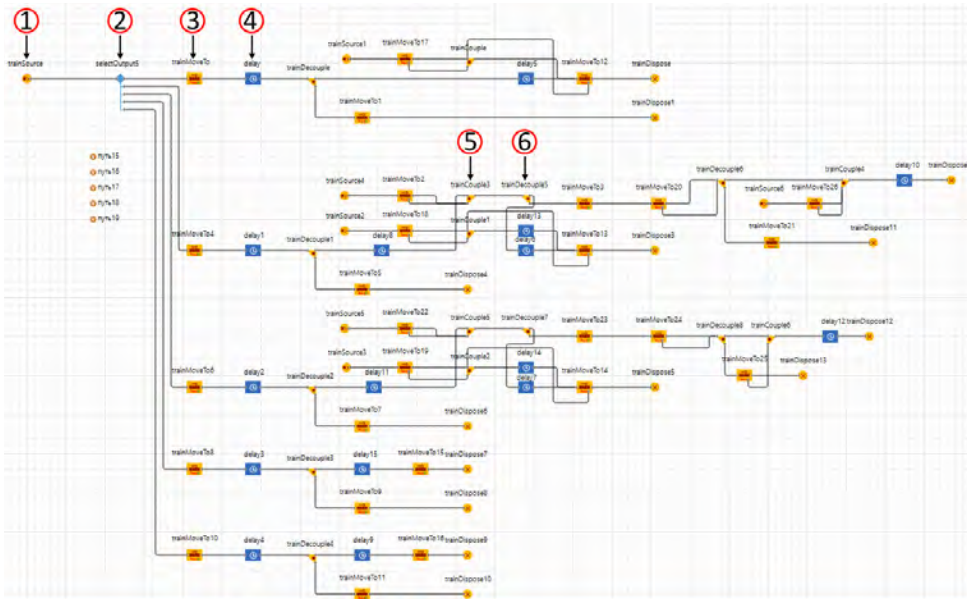


Рис. 4. Схема имитационной модели участковой железнодорожной станции Таксимо

Модель станции Таксимо с вышеописанными блоками TrainSource, SelectOutput5, TrainMoveTo, Delay, TrainCouple, TrainDecouple, обозначенными цифрами от 1 до 6 соответственно, показана на рис. 4.

Моделирование

С использованием построенной имитационной модели работы станции была выполнена серия вычислительных экспериментов, которые проводились при следующих исходных данных: $T = 24$ ч – расчетный период времени; $t_1 = 89$ мин – время обработки поезда и смены поездного локомотива; $t_2 = 109$ мин – время обработки со сменой поездного локомотива и отцепки групп вагонов с хвоста поезда; $t_3 = 15$ мин – среднее время перестановки группы вагонов; $n = 1$ – число бригад пункта технического обслуживания; $N = 14$ – количество приемо-отправочных путей. Переменным параметром является S – количество пар поездов, поступающих на станцию, которое в ходе расчетов менялось от 33 до 44. Для каждого из этих значений составлялось новое расписание

прибытия поездов на основе корректировки табл. 1. Из-за ограниченности объема статьи они не приводятся.

В ходе проведенных расчетов определялись следующие параметры: $N_{\text{зан}}$ – среднее число занятых путей; K – коэффициент использования имеющейся мощности железнодорожных путей; k – отношение среднего значения занятых путей к общему числу приемо-отправочных путей; n – число бригад с тремя и четырьмя группами осмотровиков. Полученные результаты приведены в табл. 2.

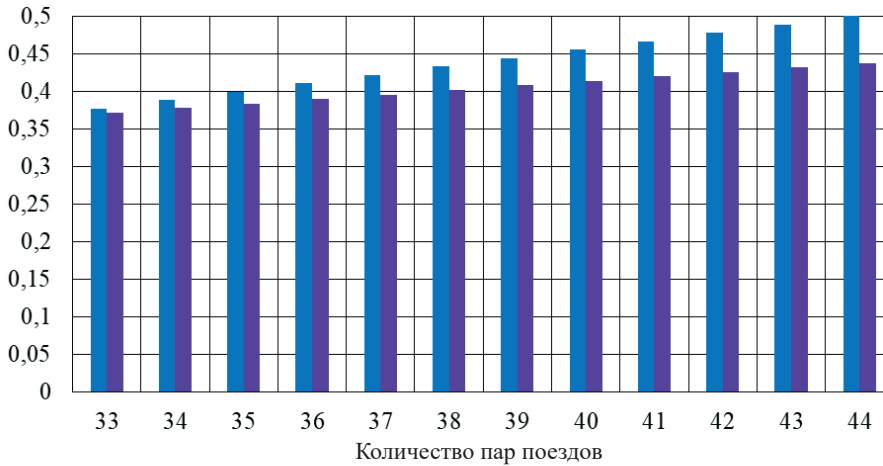
Из табл. 2 и рис. 5 видно, что значение S последовательно увеличивалось с 33 до 44 пар поездов в сутки. При $S = 33$ получены следующие значения: $N_{\text{зан}} = 5,208$, $k = 0,372$, $K = 0,377$, а при $S = 44$ – соответственно $N_{\text{зан}} = 6,125$, $k = 0,438$ и $K = 0,5$.

Рассмотрим подробнее значения для состава и количества бригад ПТО, приведенные в табл. 2 и на рис. 6. Число групп в одной бригаде составляет от 2 до 4. Согласно применяемой в настоящее время методике расчета [17], количество бригад округляется в большую сторону. Так, при $S = 33$ имеем:

Таблица 2

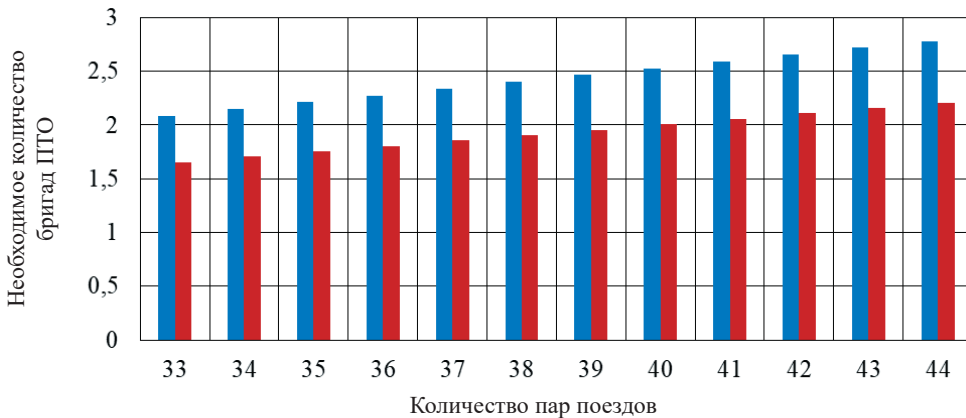
Результаты расчетов

Количество пар поездов (S)	Среднее значение занятых путей ($N_{зан}$)	Среднее значение свободных путей ($N_{св}$)	Коэффициент использования мощностей железнодорожных путей (K)	Отношение среднего значения занятых путей к общему количеству приемо-отправочных путей (k)	Необходимое количество бригад ПТО с 3-мя группами осмотровиков (n_3)	Необходимое количество бригад ПТО с 4-мя группами осмотровиков (n_4)
33	5,208	8,792	0,377	0,372	2,087	1,656
34	5,292	8,708	0,389	0,378	2,150	1,706
35	5,375	8,625	0,400	0,384	2,213	1,756
36	5,458	8,542	0,411	0,390	2,276	1,807
37	5,542	8,458	0,422	0,396	2,340	1,857
38	5,625	8,375	0,433	0,402	2,403	1,907
39	5,708	8,292	0,444	0,408	2,466	1,957
40	5,792	8,208	0,456	0,414	2,529	2,007
41	5,875	8,125	0,467	0,420	2,593	2,058
42	5,958	8,042	0,478	0,426	2,656	2,108
43	6,042	7,958	0,489	0,432	2,719	2,158
44	6,125	7,875	0,500	0,438	2,782	2,208



- Коэффициент использования имеющейся мощности железнодорожных путей K
- Отношение среднего значения занятых путей к общему количеству приемо-отправочных путей k

Рис. 5. Сравнение коэффициента использования имеющейся мощности железнодорожных путей и отношения среднего значения занятых путей к общему количеству приемо-отправочных путей



- бригады с 3-мя группами осматривщиков
- бригады с 4-мя группами осматривщиков

Рис. 6. Необходимое количество бригад ПТО на станции Таксимо

$n_3 = 2,087$ и $n_4 = 1,656$. Отсюда следует, что в данном случае нужно задействовать две бригады, состоящие из четырех групп. При $S = 44$ получаем: $n_3 = 2,782$ и $n_4 = 2,208$. То есть здесь эффективнее задействовать три бригады, состоящие из трех групп.

На основе результатов экспериментов можно утверждать, что при текущем техническом оснащении станция сможет пропустить поездопоток от 33 до 44 пар поездов в сутки. Однако потребуются изменение в технологии – необходимо увеличить число бригад ПТО.

Заключение

Применение программной среды AnyLogic позволило создать имитационную модель работы железнодорожной станции Таксимо, которая является важным объектом транспортной инфраструктуры БАМа, обеспечивающим пропуск поездов и перевозку грузов. В ходе расчетов удалось установить необходимое число бригад технического обслуживания, определить число свободных и занятых путей с учетом их загрузки, оценить работу станции при текущем техническом оснащении.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что станция

способна пропустить поездопоток в 44 пары поездов в сутки. Для пропуска большего числа пар поездов потребуются технические изменения. Одним из вариантов решения проблемы является реконструкция приемо-отправочного парка с увеличением в нем числа путей.

В перспективе программную среду AnyLogic можно использовать не только для создания имитационных моделей железнодорожных станций, но и для моделирования более крупных и сложных объектов железнодорожной инфраструктуры (таких как железнодорожные участки с множеством станций, крупные железнодорожные узлы). ■

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р (ред. от 06.11.2024 г.).
2. Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (третий этап)» : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.04.2024 г. № 981-р.
3. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : утв. приказом Минтранса России от 18.07.2018 г. № 266.
4. Багинова В. В., Кузьмин Д. В. Применение алгоритмов маршрутизации агента при разработке дискретно-событийных имитационных моделей с использованием инструментов железнодорожной библиотеки AnyLogic // Вестник УрГУПС. 2023. № 2 (58). С. 109–118. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118.
5. Дискретно-событийное моделирование статических, динамических и комбинированных моделей в среде AnyLogic / А. П. Кирпичников, Н. Д. Устинов, Г. В. Спиридонов, А. А. Ямалтдинова // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22. № 5. С. 98–102. ISSN 3034-4689.
6. Мишкuroв П. Н., Рахмангулов А. Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2021. Т. 11. № 1. С. 29–40. DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40.
7. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкuroв, Д. В. Александрин // Вестник УрГУПС. 2022. № 3 (55). С. 43–59. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.
8. Белоголов Ю. И. Увеличение пропускной способности участка Слюдянка-1 – Улан-Удэ за счет построения оптимальной модели движения поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 94–105. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).94-105.
9. Козлов П. А., Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Методы исследования проектов развития объектов транспортной инфраструктуры // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. Москва : РУТ, 2021. С. 174–181. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.25.
10. Петров М. Б., Серков Л. А., Кожов К. Б. Имитационная модель обоснования приоритетов развития железнодорожных связей между Уралом и Западной Сибирью // Вестник УрГУПС. 2021. № 4 (52). С. 50–58. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-4-50-58.

11. Лемперт А. А., Казаков А. Л., Бухаров Д. С. Математическая модель и программная система для решения задачи размещения логистических объектов // Управление большими системами. 2013. № 41. С. 270–284. ISSN 1819-2440.
12. Казаков А. Л., Маслов А. М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 27–32. ISSN 1813-9108.
13. Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Оценка пропускной способности однопутного участка БАМа с использованием теории массового обслуживания // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82. № 4. С. 370–384. DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384.
14. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания / М. Л. Жарков, А. Л. Казаков, А. В. Супруновский, М. М. Павидис // Вестник УрГУПС. 2021. № 3 (51). С. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-3-4-14.
15. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Анализ структуры пространственного распределения нетранспортных эффектов ВСМ на основе модели дискретного выбора // Вестник УрГУПС. 2019. № 3 (43). С. 4–12. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-4-12.
16. Осьминин А. Т. О научно-практических проблемах повышения пропускных и провозных способностей линий // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2018. № 1. С. 37–48. ISSN 2304-9642.
17. Ковалев В. И., Кудрявцев В. А., Котенко А. Г. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте. Т. 1. Технология работы станций. Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. 264 с.

References

1. Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r (as amended on 06.11.2024). (In Russian).
2. Passport of the investment project «Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian Railways with the development of throughput and carrying capacities (third stage)»: approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 20.04.2024 No. 981-r. (In Russian).
3. Methodology for determining the throughput and carrying capacity of public rail transport infrastructure : approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 18.07.2018 No. 266. (In Russian).
4. Baginova V. V., Kuzmin D. V. Application of agent routing algorithms in the development of discrete-event simulation models using Anylogic Railway Library tools. *Herald of the USURT*. 2023. No. 2 (58). Pp. 109–118. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118. (In Russian).
5. Kirpichnikov A. P., Ustinov N. D., Spiridonov G. V., Yamaltdinova A. A. Discrete-event simulation of static, dynamic, and combined models in AnyLogic. *Herald of Technological University*. 2019. Vol. 22. No. 5. Pp. 98–102. ISSN 3034-4689. (In Russian).
6. Mishkurov P. N., Rakhmagulov A. N. Construction features of railway station agent-based simulation model. *Modern problems of Russian Transport Complex*. 2021. Vol. 11. No. 1. Pp. 29–40. DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40. (In Russian).
7. Rakhmagulov A. N., Kornilov S. N., Mishkurov P. N., Alexandrin D. V. Simulation models in digital twins of railway junctions. *Herald of the USURT*. 2022. No. 3 (55). Pp. 43–59. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59. (In Russian).
8. Belogolov Yu. I. Increasing the throughput capacity of the Slyudyanka-1 – Ulan-Ude section by building an optimal train traffic model. *Modern technologies. Systems analysis. Modeling*. 2023. No. 1 (77). Pp. 94–105. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).94-105. (In Russian).
9. Kozlov P. A., Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Methods for studying projects for the development of transport infrastructure facilities. *Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov – the founder of transport science : proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university*, Moscow, October 22, 2021. Moscow : Publishing House of Russian University of Transport, 2021. Pp. 174–181. DOI: 10.47581/2022/Obratcov.25. (In Russian).

10. Petrov M. B., Serkov L. A., Kozhov K. B. Simulation model of substantiation priorities for the development of railway links between the Urals and Western Siberia. *Herald of the USURT*. 2021. No. 4 (52). Pp. 50–58. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-4-50-58. (In Russian).
11. Lempert A. A., Kazakov A. L., Bukharov D. S. Mathematical model and program system for solving the problem of logistic objects placement. *Large-Scale Systems Control*. 2013. No. 41. Pp. 270–284. ISSN 1819-2440. (In Russian).
12. Kazakov A. L., Maslov A. M. Constructing a model of uneven traffic flow on the example of a railway freight station. *Modern technologies. Systems analysis. Modeling*. 2009. No. 3 (23). Pp. 27–32. ISSN 1813-9108. (In Russian).
13. Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V. Estimation of line capacity of single-track section of Baikal-Amur Mainline using mass service theory. *Russian Railway Science Journal*. 2023. Vol. 82. No. 4. Pp. 370–384. DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384. (In Russian).
14. Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V., Pavidis M. M. Simulation of the world's largest railway marshalling yard using queuing theory. *Herald of the USURT*. 2021. No. 3 (51). Pp. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-3-4-14. (In Russian).
15. Martynenko A. V., Filippova E. G. Analysis of the structure of spatial distribution of nontransport effects of HSR on the basis of discrete choice model. *Herald of the USURT*. 2019. No. 3 (43). Pp. 4–12. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-4-12. (In Russian).
16. Osminin A. T. On scientific and practical problems of increasing the throughput and carrying capacity of railway lines. *Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways*. 2018. No. 1. Pp. 37–48. ISSN 2304-9642. (In Russian).
17. Kovalev V. I., Kudryavtsev V. A., Kotenko A. G. Management of operational work on railway transport. Vol. 1. Technology of station operation. Moscow : UMTs ZhDT, 2015. 264 p. . (In Russian).

Статья сдана в редакцию 8 августа 2025 года