

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА НА ПРИМЕРЕ СТАНЦИИ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Агеенко И.В.¹, Кузьмин Д.В.¹, Багинова В.В.¹

¹ Российский университет транспорта

Аннотация: в данной работе рассматривается дискретно-событийная модель работы инфраструктуры пассажирского транспорта на примере станции московского метрополитена. Данная модель позволяет подробно изучать процессы и поведение объекта моделирования в рамках выбранной станции метро. Разработанная модель состоит из функциональных блоков диаграммы процесса, элементов управления, инфографики, а также различных других элементов позволяющих в точности воссоздать выбранный объект. С моделью был проведён ряд экспериментов с целью выявления показателей на которые необходимо обратить внимание при оптимизации. Были использованы следующие инструменты: программная среда моделирования AnyLogic, объектно-ориентированный язык программирования Java. .

Ключевые слова: имитационное моделирование, дискретно-событийная модель, транспортная инфраструктура, инфраструктура станции метрополитена.

© Агеенко И.В., Кузьмин Д.В., Багинова В.В.

Поступила 17.08.2025, одобрена после рецензирования 24.10.2025, принята к публикации 24.10.2025.

Для цитирования:

Агеенко И.В., Кузьмин Д.В., Багинова В.В. Дискретно-событийная имитационная модель работы инфраструктуры пассажирского транспорта на примере станции Московского метрополитена // Логистика и управление цепями поставок. - 2025. - Т. 22, №3 (116). - С. 15–28.

Информация об авторах:

Агеенко И.В. - магистрант РУТ (МИИТ), e-mail: ivan.ageenko3@mail.ru.

Кузьмин Д.В. - к.т.н., доцент, доцент кафедры: «Логистика и управление транспортными системами» РУТ (МИИТ).

Багинова В.В. - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры: «Логистика и управление транспортными системами» Российского университета транспорта.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечивая перемещение пассажиров или товарно-материальных потоков, транспорт играет решающую роль в удовлетворении потребностей населения и экономики в перевозке грузов и пассажиров. Рациональная эксплуатация инфраструктуры транспортно-логистических комплексов позволяет снизить влияние многих негативных факторов, снижающих качество транспортных услуг, таких как: несовершенная маршрутизация пассажирских потоков, устранение узких мест, повышение комфорта и безопасности пассажиров в здании вокзала. Такая проблема рационализации комплексов не может быть полностью решена с помощью простых аналитических моделей.

В настоящее время широкое распространение получили инструменты имитационного моделирования, позволяющие разрабатывать имитационные модели в различных концепциях моделирования. В данной статье рассматривается вопрос разработки модели с высоким уровнем детализации движения пассажирских потоков с использованием только инструментов дискретно-событийного моделирования [1].

Результаты проведенного моделирования позволяют выявить узкие места в работе станции и предложить меры по их устранению, что в итоге приведет к повышению качества обслуживания пассажиров и улучшению общей эффективности работы московского метрополитена.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА

В качестве объекта моделирования была выбрана станция, на территории которой находятся 2 железнодорожных пути, платформа

длинной 160 метров, северный и южный вестибюли (Рисунок 1).

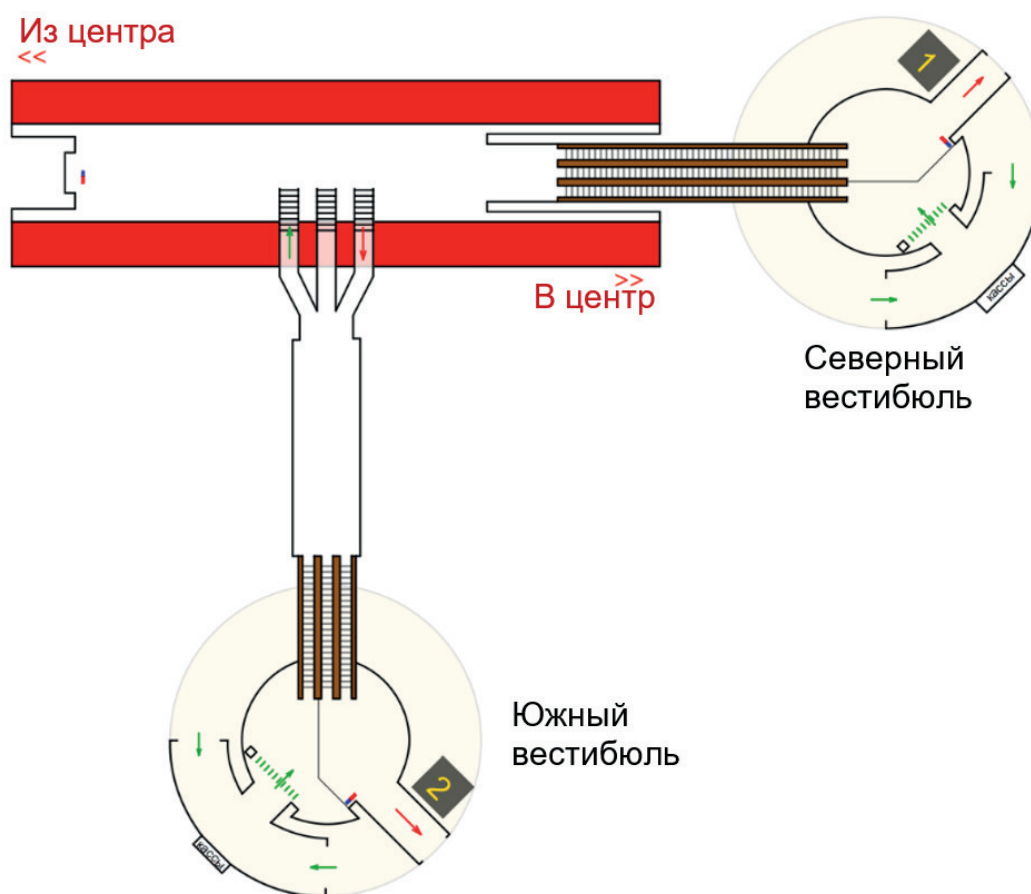


Рисунок 1 - Схема выбранного объекта моделирования.

Для моделирования работы железнодорожной станции в среде Anylogic была разработана программная дискретно-событийная имитационная модель. Схема моделируемого пространства и направления пассажиропотока показаны на рисунках 1-2 [2].

Модель представляет собой набор блоков, которые моделируют различные операции (события), происходящие с агентами (пассажира-

ми и поездами). Архитектура модели состоит из двух взаимосвязанных частей, использующих разные библиотеки – пешеходной (рисунок 3) и железнодорожной (рисунок 5). Следовательно, в рамках единой имитационной модели фактически моделируются два разных процесса, взаимодействие которых происходит в конкретно заданной точке пересечения – на платформе станции метрополитена.

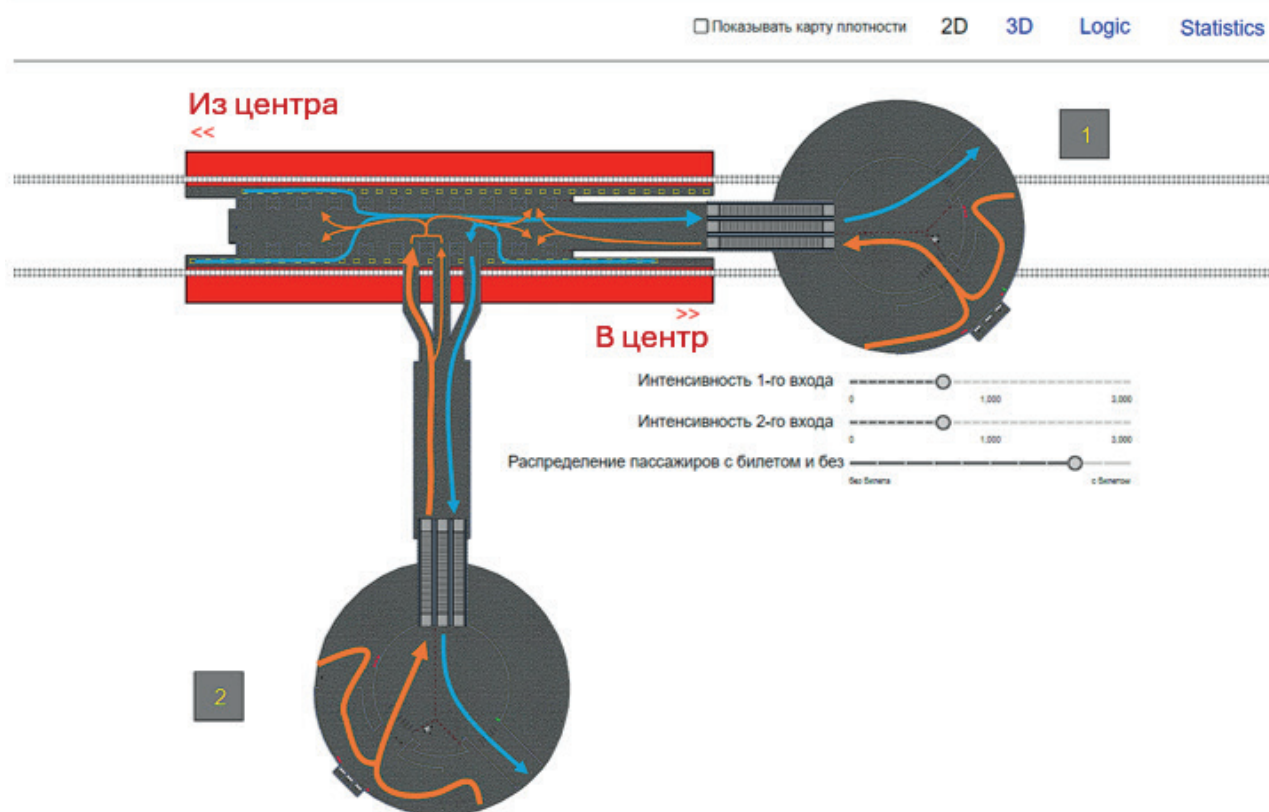


Рисунок 2 - Схема моделируемого пространства, интерфейс модели и траектория движения пассажирских потоков.

Пассажиропотоки формируются в нескольких местах модельного пространства, а именно у входов в метро и на платформах городского сообщения. Принимая во внимание планировку станции метро и логику функционирования моделируемого объекта, можно сделать вывод о наличии противоположно направленных пассажиропотоков. Движение пассажиропотоков целесообразно разделить на два направления:

- пассажиры прибывают на станцию метро и направляются к выходу из остановочного пункта (рис. 2, синяя траектория);

- пассажиры прибывают в вестибюли метро, при необходимости приобретают билеты, спускаются, ждут прибытия нужного поезда на платформе и садятся на соответствующий поезд (рис. 2, оранжевая траектория);

Логика движения реализована в модели двумя автономными архитектурными ветвями модели, показанными на рисунке 3 [3, 4]¹. Описание функциональности блоков пассажирского сегмента имитационной модели приведено ниже в таблице 1.

¹ AnyLogic - имитационное моделирование для бизнеса [Электронный ресурс] - <https://www.anylogic.ru/>

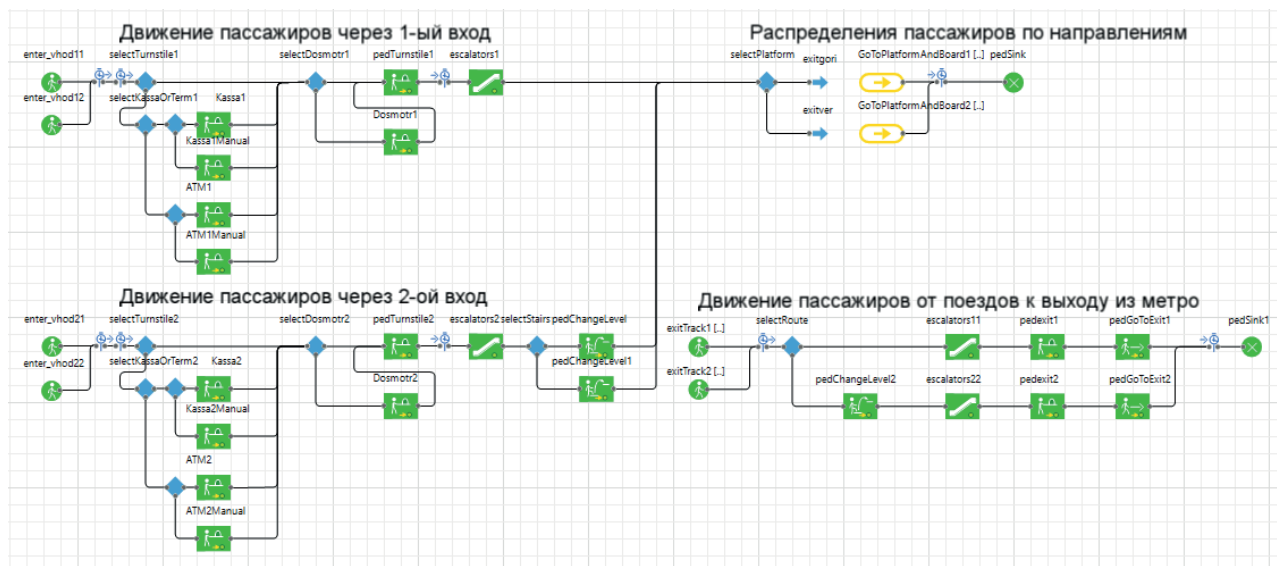


Рисунок 3 - Архитектура дискретно-событийной модели (Пассажирский сегмент).

Таблица 1

Описание пассажирского сегмента дискретно событийной модели²

Название блока	Описание блока из документации «AnyLogic»	Название блоков в модели и выполняемые ими функции
PedSource	Создает пешеходов. Как правило, используется в качестве начального блока диаграммы процесса.	<ol style="list-style-type: none"> enter_vhod11, enter_vhod12 – прибытие агентов осуществляется согласно параметру <i>intensiv1</i> в час, в котором указано число; enter_vhod21, enter_vhod22 – прибытие агентов осуществляется согласно параметру <i>intensiv2</i> в час, в котором указано число; exitTrack1-2 – агенты прибывают согласно интенсивности, которая устанавливается после прибытия поездов в блоки <i>Delay – exitGori, exitVer</i>.
SelectOutput	Блок направляет входящих агентов в один из двух выходных портов в зависимости от выполнения заданного (детерминистического или заданного с помощью вероятностей) условия.	<ol style="list-style-type: none"> selectTurnstile1-2 – с вероятностью указанной в параметре <i>probability</i> агенты идут на турникеты или покупать билет через кассы или терминалы; selectKassaOrTerm1-2 – по условиям <i>queueKassa1() <= 10, queueKassa2() <= 10</i> агенты идут покупать билеты через кассы до тех пор пока в очереди к кассам не будет 10 агентов, после чего они пойдут покупать билеты через терминалы;

² Документация AnyLogic [Электронный ресурс] - <https://anylogic.help/ru/>

SelectOutput	Блок направляет входящих агентов в один из двух выходных портов в зависимости от выполнения заданного (детерминистического или заданного с помощью вероятностей) условия.	<p>3. selectPM1-4 – в зависимости от значения параметров ManualKassa и ManualATM время задержки имеет вероятностное распределение или есть возможность регулировать её в ручную;</p> <p>4. selectDosmotr1-2 – агенты с вероятностью 0,02 попадают на пункт досмотра;</p> <p>5. selectStairs – с вероятностью 0,5 агенты выбирают центральную лестницу, в противном случае идут на правую;</p> <p>6. selectPlatform – с вероятностью 0,5 агенты выбирают платформу на которую прибывает поезд который следует в сторону центра, в противном случае агенты выбирают платформу на которую прибывает поезд который следует по направлению из центра.</p> <p>7. selectRoute – с вероятностью 0,5 агенты идут на 1 выход, в противном случае, агенты идут на 2 выход.</p>
PedService	Направляет поток пешеходов на обслуживание в сервисе — это может быть покупка билета в кассе, прохождение через турникет, компостирование билета, прохождение паспортного контроля, и т.д.	<p>1. Kassa1-2 – имитирует покупку билетов в кассах и задерживает агентов треугольным вероятностным распределением от 30 до 120 секунд, где 60 секунд наиболее вероятное значение;</p> <p>2. ATM1-2 – имитирует покупку билетов в автоматах и задерживает агентов треугольным вероятностным распределением от 20 до 90 секунд, где 45 секунд наиболее вероятное значение;</p> <p>3. Kassa1Manual, Kassa2Manual – имитирует покупку билетов в кассах и задерживает агентов на значение указанное в параметре Кассы1;</p> <p>4. ATM1Manual, ATM2Manual – имитирует покупку билетов в автоматах и задерживает агентов на значение указанное в параметре Автоматы1;</p> <p>5. Dosmotr1-2 – имитирует работу пункта досмотра и задерживает агентов треугольным вероятностным распределением от 20 до 45 секунд, где 30 секунд наиболее вероятное значение;</p> <p>6. pedTurnstile1-2 – имитирует работу турникетов на вход в метро с задержкой 2-4 секунды;</p> <p>7. pedexit1-2 – имитирует работу турникетов на выход.</p>

PedGoTo	Заставляет пешеходов перейти в заданное место моделируемого пространства, которое может быть задано линией, точкой или сетевым узлом.	1. toCarDoor – данный блок находится в функциональном агенте GoToPlatformAndBoard и осуществляет движение агентов из зон ожидания в целевые линии дверей прибывшего поезда; 2. pedGoToExit1-2 – блоки осуществляют движение к заданным целевым линиям на выход из метро.
PedEscalator	Моделирует перемещение пешеходов по эскалатору. Пешеходы должны будут дойти до указанного эскалатора, и переместиться с его помощью.	1. escalators1-2 – блоки моделируют работу эскалаторов на спуск агентов к платформе; 2. escalators11, escalators22 – блоки моделируют работу эскалаторов на подъём агентов к вестибюлям;
PedChangeLevel	Перемещает поток пешеходов с текущего уровня на заданный уровень.	1. pedChangeLevel, pedChangeLevel1, pedChangeLevel2 – в данных блоках агенты используют лестницы для спуска или подъёма.
PedSink	Удаляет поступивших в блок пешеходов из моделируемой среды.	1. pedSink – блок отвечает за удаление агентов из модели после ухода в целевую линию, обозначенную функциональным агентом GoToPlatformAndBoard ; 2. pedSink1 – блок отвечает за удаление агентов из модели после ухода в целевую линию, обозначенную выходом из метро.
PedWait	Заставляет пешеходов перейти в заданное место и ожидать там в течение определенного периода времени.	1. waitTrain – данный блок находится в функциональном агенте GoToPlatformAndBoard и направляет агентов в прямоугольный узел с целью ожидания поезда до вызова функции «free ()».
Enter	Вставляет существующих агентов в определенное место внутри процесса, заданного потоковой диаграммой.	1. enter – данный блок находится в функциональном агенте GoToPlatformAndBoard и забирает агентов, которые были отданы блоками Exit.
Exit	Извлекает поступающих в блок агентов из процесса, заданного потоковой диаграммой, позволяя пользователю самому решить, что следует сделать с этими агентами.	1. exitGori – при выходе из данного блока мы ссылаемся на функционального агента GoToPlatformAndBoard1 и отдаём агентов на дальнейшую сортировку по зонам ожидания; 2. exitVer – при выходе из данного блока мы ссылаемся на функционального агента GoToPlatformAndBoard2 и отдаём агентов на дальнейшую сортировку по зонам ожидания.

Рассмотрим как устроен функциональный агент GoToPlatformAndBoard созданный с целью сортировки и распределения агентов

по зонам ожидания и в последствии вход в целевые линии дверей прибывающего поезда (рис. 4).

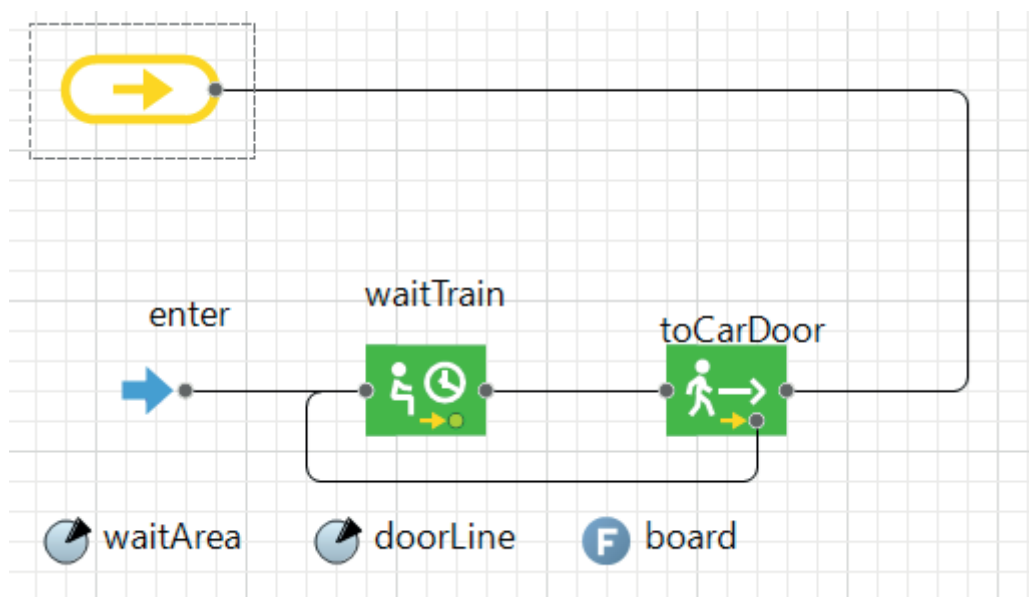


Рисунок 4 - Архитектура агента GoToPlatformAndBoard.

GoToPlatformAndBoard состоит из таких функциональных элементов как enter, waitTrain, toCarDoor, waitArea, doorLine и функции board. Работает он следующим образом: блок enter забирает агентов, которые были отданы соответствующим блоком Exit, после чего агенты, которые были рассортированы по 32 зонам ожидания используя параметр waitArea, ожидают в блоке waitTrain пока не будет вызвана функция board через блок Delay. Код функции прописан следующим образом: waitTrain.freeAll();. Далее агенты идут в целевые линии благодаря блоку toCarDoor,

которые были заранее определены параметром doorLine.

Железнодорожный сегмент модели реализован архитектурным подразделением, показанным на рисунке 5. Основное внимание в этой статье уделяется детализации навигации по пешеходным потокам [2]. Однако стоит отметить один аспект работы модели железнодорожного сегмента, а именно то что на сквозной станции инфраструктура ориентирована в соответствии с направления железнодорожного движения. Поэтому логика работы довольно проста.

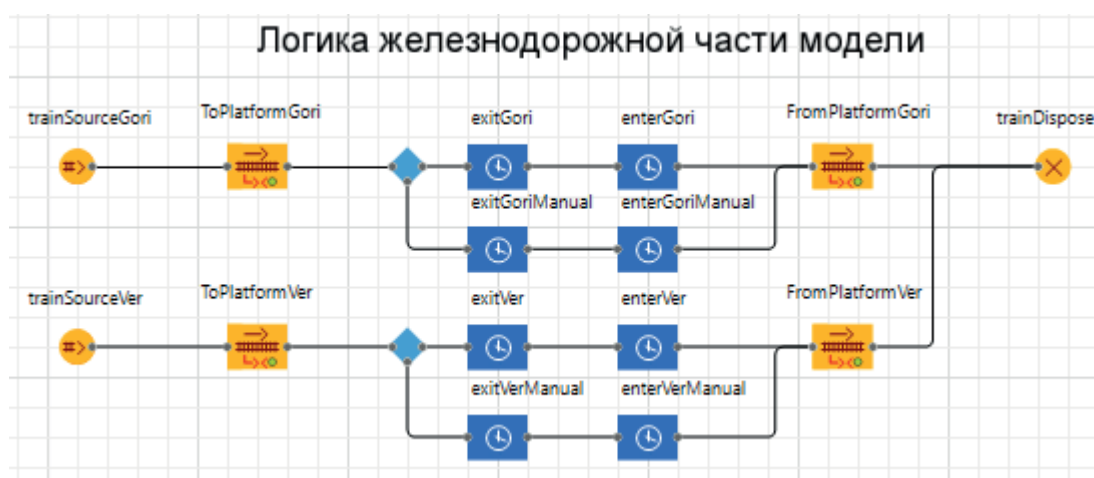


Рисунок 5 - Архитектура дискретно-событийной модели (Железнодорожный сегмент).

Описание функциональности блоков модели приведено в таблице 2.
железнодорожного сегмента имитационной

Таблица 2

Описание железнодорожного сегмента дискретно событийной модели³

Название блока	Описание блока из документации «AnyLogic»	Название блоков в модели и выполняемые ими функции
TrainSource	С объекта TrainSource начинается диаграмма любого железнодорожного процесса. Этот блок создает поезда, помещает их на пути ж/д узла, и вставляет агента-поезд в диаграмму процесса поезда.	1. trainSourceGori – блок отвечает за появление поездов в сторону центра; 2. trainSourceVer – блок отвечает за появление поездов которые следуют из центра.
TrainMoveTo	Единственный блок, который управляет движением поезда. Поезд может перемещаться только тогда, когда он находится в блоке TrainMoveTo.	1. ToPlatformGori , – блок отвечает за движения поезда в сторону центра до конца пути track1. Конец данного пути предполагает место для остановки первого вагона; 2. ToPlatformVer – блок отвечает за движения поезда в которые следуют из центра до конца пути track2. Конец данного пути предполагает место для остановки первого вагона; 3. FromPlatformGori, FromPlatformVer – блоки отвечает за дальнейшее движение по заданному пути согласно стрелкам;
Delay	Задерживает агентов на заданный период времени. Время задержки вычисляется динамически, может быть случайным, зависеть от текущего агента или от каких-то других условий.	1. exitGori, exitVer – данные блоки отвечают за остановку поезда для высадки пассажиров. При входе в данный блок на блоки exitTrack1 и exitTrack2 (в которых содержится по 32 целевые линии в каждом) устанавливается интенсивность через треугольное распределение кодом «triangular(4, 8, 6), PER_MINUTE». В данном блоке предусмотрено время задержки в 1 минуту. После прохождения данного времени интенсивность ставится на 0 и агент идёт к следующему блоку.

³ Документация AnyLogic [Электронный ресурс] - <https://anylogic.help/ru/>

Delay	Задерживает агентов на заданный период времени. Время задержки вычисляется динамически, может быть случайным, зависит от текущего агента или от каких-то других условий.	<p>2. enterGori, enterVer, enterGoriManual, enterVerManual – данные блоки отвечают за остановку поезда для посадки пассажиров. При входе в данный блок все агенты, находящиеся в блоке waitTrain освобождаются из прямоугольных узлов и следуют к целевым линиям на платформу, к которой прибыл поезд. Агенты, которые не успели зайти в поезд, возвращаются в зону ожидания (прямоугольный узел) через код «CancelALL ();». В данном блоке предусмотрено разное время задержки: 1, 2 или 3 минуты, для того чтобы подвижные составы не отправлялись от станции синхронно).</p> <p>3. exitGoriManual, exitVerManual – данные блоки отвечают за остановку поезда для высадки пассажиров. При входе в данный блок на блоки exitTrack1 и exitTrack2 (в которых содержится по 32 целевые линии в каждом) устанавливается интенсивность через регулируемое значение в параметрах intensiv3 и intensiv4. В данном блоке предусмотрено время задержки в 1 минуту. После прохождения данного времени интенсивность ставится на 0 и агент идет к следующему блоку.</p>
TrainDispose	Удаляет поезда из модели.	1. trainDispose – блок отвечает за удаление поездов из модели.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С разработанной моделью был проведен ряд простых экспериментов как в стандартных условиях, так и в условиях низкой или высокой нагрузки, что позволило изучить поведение моделируемого объекта. Основными целями проводимых экспериментов являются:

1. Оценка адекватности функционирования моделируемого объекта;
2. Выявление потенциальных слабых мест станции, с целью дальнейшей оптимизации.

Для оценки адекватности модели и установления соответствия между моделируемыми и реальными процессами обслуживания пассажиров были собраны и информационно-графически отображены в модели следующие показатели: количество и среднее время, проведенное пассажирами на станции, длина очереди в билетные кассы и терминалы и другие показатели.

После серии различно сконфигурированных экспериментов было выявлено, что невероятно значимыми показателями являются интенсивность и вероятность наличия билета.

Именно при их изменении наблюдается наиболее загруженная работа станции. Результаты экспериментов с учётом этих двух показателей представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты экспериментов с изменением интенсивности и вероятности наличия билета

№ эксперимента	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Показатель						
Интенсивность с каждого входа, агентов в час	1500	3000	1000	1000	1000	1000
Вероятность наличия билета, %	80	80	0	50	80	100
Среднее время нахождения агентов в модели, минут	7	7,4	12,9	7,3	6,9	6,6
Длина очереди в кассах, агентов	20	27	32	19	5	0
Длина очереди в терминалах, агентов	2	84	539	7	0	0
Среднее время обслуживания, минут	1,63	2,05	14,9	2,5	2	0.97
Среднее соотношение агентов между сервисами (терминалы/кассы)	23/77	74/26	96/4	33/67	25/75	-

По результатам проведения экспериментов с моделью можно выявить ряд закономерностей.

В первых двух экспериментах, при увеличении количества агентов, входящих с входа в метро и неизменной вероятности наличия билетов – все показатели возрастают, но наибольший рост показывает длина очереди к терминалам. Данный показатель так вырос из-за условий которые прописаны в блоках

selectKassaOrTerm1 и *selectKassaOrTerm2* а именно *queueKassa11() <= 10* и *queueKassa22() <= 10*. Агенты идут покупать билеты через кассы до тех пор пока в очереди к кассам не будет 10 агентов, после чего они пойдут покупать билеты через терминалы.

В последующих трёх экспериментах видно как сильно влияет вероятность наличия билета на работу станции. При интенсивности 1000 человек в час и отсутствии билета стан-

ция сталкивается с огромными очередями и среднее время обслуживания составляет 14,9 минут, а среднее время нахождения агентов в

модели составляет 12,9 минут. С ростом вероятности наличия билета все показатели значительно снижаются.

ВЫВОДЫ

После проведенного исследования возможно сделать следующие выводы:

- планировка исследуемого объекта выполнена таким образом, что на станции не создаются встречные пассажиропотоки в зонах обслуживания. Это позволяет комфортно и максимально точно оценить работу станции.
- наиболее важными показателями на которые необходимо обратить внимание в ходе оптимизации работы или постройки новых

станций железнодорожного сообщения являются интенсивность и вероятность наличия билета.

Решением в случае обнаружения скапливания очередей на сервисах станет распространение возможности удаленной покупки билета в онлайн формате. В качестве альтернативы можно увеличить число касс и терминалов на станции.

Список источников

1. Kuzmin, D. Discrete event simulation model of the railway station / D. Kuzmin, V. Baginova, A. Ageikin // X International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 марта 2022 года. – Novosibirsk: Elsevier B.V., 2022. – P. 929-937. – DOI 10.1016/j.tpro.2022.06.091. – EDN FAGWFG.
2. Kuzmin, D. Discrete-Event Intersection Operation Model (Yasnyy Proyezd-Dezhnev street, Moscow) / D. Kuzmin, V. Baginova // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 247. – P. 283-294. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_29. – EDN FCGFPY.
3. Багинова, В. В. Применение алгоритмов маршрутизации агента при разработке дискретно-событийных имитационных моделей с использованием инструментов железнодорожной библиотеки Anylogic / В. В. Багинова, Д. В. Кузьмин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2(58). – С. 109-118. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118. – EDN PZILTM.
4. Кузьмин, Д. В. Дискретно-событийная имитационная модель работы перекрестка / Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова // Академик Владимир Николаевич Образцов - основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2021. – С. 487-497. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.65. – EDN TJOCUB.

DISCRETE-EVENT SIMULATION MODEL FOR THE OPERATION OF GROUND METRO STATIONS IN HO CHI MINH CITY (CASE STUDY: THAO DIEN STATION)

Ageenko I.V.¹, Kuzmin D.V.¹, Baginova V.V.¹

¹ Russian University of Transport.

Abstract: in this paper, a discrete-event model of the operation of passenger transport infrastructure is considered using the example of a Moscow metro station. This model allows you to study in detail the processes and behavior of the modeling object within the selected metro station. The developed model consists of functional blocks of a process diagram, controls, infographics, as well as various other elements that allow you to accurately recreate the selected object. A number of experiments were conducted with the model in order to identify indicators that need to be paid attention to during optimization. The following tools were used: AnyLogic modeling software environment, Java object-oriented programming language.

Keywords: simulation modeling, discrete event model, transport infrastructure, subway station infrastructure.

© Ageenko I.V., Kuzmin D.V., Baginova V.V..

Received 17.08.2025, approved 24.10.2025, accepted for publication 24.10.2025.

For citation:

Ageenko I.V., Kuzmin D.V., Baginova V.V. A discrete-event simulation model of passenger transport infrastructure operation using the example of a Moscow metro station. *Logistics and Supply Chain Management*. 2025. Vol 22, Iss 3 (116). pp. 15-28.

Information about the authors:

Ageenko I.V. - master student at RUT (MIIT), e-mail: ivan.ageenko3@mail.ru.

Kuzmin D.V. - PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department: «Logistics and Management of Transport Systems» RUT (MIIT).

Baginova V.V. - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department: «Logistics and management of transport systems, Russian University of Transport.

References

1. Kuzmin, D. Discrete event simulation model of the railway station / D. Kuzmin, V. Baginova, A. Ageikin // X International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 02-05, 2022. – Novosibirsk: Elsevier B.V., 2022. – P. 929-937. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.091. – EDN FAGWFG.
2. Kuzmin, D. Discrete-Event Intersection Operation Model (Yasnyy Proyezd-Dezhnev street, Moscow) / D. Kuzmin, V. Baginova // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 247. – P. 283-294. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_29. – EDN FCGFPY.
3. Baginova, V. V. Application of agent routing algorithms in the development of discrete-event simulation models using the tools of the Anylogic railway library / V. V. Baginova, D. V. Kuzmin // Bulletin of the Ural State University of Railway Communications. – 2023. – № 2(58). – Pp. 109-118. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118. – EDN PZILTM.
4. Kuzmin, D. V. Discrete event simulation model of the intersection / D. V. Kuzmin, V. V. Baginova // Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov - 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: Russian University of Transport, 2021. – pp. 487-497. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.65. – EDN TJOCUB.