

Е. А. Середов, А. П. Осипов

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРИБЫТИЯ И РАСФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ

Аннотация. Описан механизм применения методов имитационного моделирования для анализа и оптимизации технологических процессов на сортировочных станциях в условиях цифровизации железнодорожного транспорта. Основное внимание уделено первой фазе переработки вагонов – прибытию и расформированию поездов. С использованием программного комплекса AnyLogic разработана имитационная модель, воспроизводящая логику взаимодействия между подразделениями железнодорожного транспорта. Модель обеспечивает визуализацию технологического цикла, оценку влияния изменения параметров – времени обработки состава, численности бригад, интервалов прибытия – на пропускную способность станции, а также выявление узких мест в технологической цепочке. Установлены аналитические условия синхронизации потоков прибытия, обработки и расформирования, формализованные в виде неравенств. Процесс моделирования завершается либо по истечении заданного времени, либо при достижении критического уровня заполнения парка приема, что позволяет оценить предельную пропускную способность станции при заданных технологических и инфраструктурных ограничениях. Полученные результаты могут быть использованы на этапах проектирования, модернизации и оперативного управления сортировочными станциями.

Ключевые слова: имитационное моделирование, визуализация процессов, сортировочная станция, переработка вагонов, технологический процесс, AnyLogic, цифровизация.

Для цитирования: Середов, Е. А. Имитационная модель прибытия и расформирования поездов на сортировочной станции / Е. А. Середов, А. П. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 43–50. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_43.

Введение

Современный этап развития железнодорожного транспорта характеризуется стремительной цифровизацией и внедрением интеллектуальных технологий управления инфраструктурой. На фоне роста объемов перевозок и усложнения логистических цепочек возрастает потребность в точном прогнозировании и оптимизации технологических процессов на сортировочных станциях. В этих условиях особую значимость приобретает метод имитационного моделирования, позволяющий воспроизводить динамику реальных систем в виртуальной среде, выявлять узкие места и тестировать управленческие решения без риска для функционирования реального объекта.

Одним из ключевых этапов технологического цикла на сортировочной станции является переработка вагонов, которая традиционно делится на три взаимосвязанных этапа:

- 1) прибытие и расформирование поездов;
- 2) накопление вагонов и формирование поездов, включая перестановку их в парк отправления;
- 3) обработка и отправление сформированных поездов.

В рамках данной работы основное внимание уделяется первому этапу – прибытию и расформированию поездов, поскольку именно на этом этапе закладываются условия для стабильной и бесперебойной работы всей станции. Нарушение баланса между темпами прибытия поездов и их обработкой может привести к образованию очередей на обработку, заполнению путей парка приема и, в конечном счете, к остановке приема составов. В имитационной модели этот риск учитывается путем введения динамических ограничений, связанных с максимально допустимым числом составов в парке приема, и моделирования логики приостановки приема поездов при достижении критического уровня загрузки станции. В перспективе это открывает возможность интеграции модели в систему поддержки принятия решений в реальном времени, где имитационная среда будет выступать в роли цифрового двойника сортировочной станции, способного не только прогнозировать, но и оперативно адаптировать управленческие воздействия в ответ на изменяющиеся условия эксплуатации.

Для обеспечения прозрачности методологии и оперативного восприятия результатов в начало работы введены основные показатели процесса моделирования: интенсивность прибытия поездов, нормативы времени обработки состава и расформирования на горке, количество маневровых

локомотивов. Эксперименты выполнены по трем сценариям: базовому, для условий повышенной нагрузки и критическому.

Несмотря на акцент на первом этапе переработки вагонов, его результаты напрямую определяют загрузку последующих фаз: задержки в расформировании ведут к снижению интенсивности поступления вагонов в сортировочный парк, что, в свою очередь, нарушает процесс накопления и формирования составов. Таким образом, устойчивость всей технологической цепочки зависит от синхронизации именно начального этапа.

Для анализа и визуализации этапа прибытия и расформирования поездов в работе применяется метод имитационного моделирования. В отечественной научной литературе этому направлению посвящены труды ряда исследователей: П. А. Козлова, С. П. Вакуленко, В. С. Колокольникова, разработавших систему автоматизированного управления сортировочной станции, основанную на трех моделях [1]; Л. Н. Иванковой, А. В. Бураковой, предложивших подходы к определению пропускной способности станций [2]; работы С. В. Карасева и Д. А. Сивицкого, посвященные применению имитационного моделирования для определения варианта организации многогруппной сортировки [3].

Несмотря на значительный вклад указанных авторов в исследование технологического цикла на сортировочной станции с помощью метода имитационного моделирования, в большинстве публикаций недостаточно внимания уделяется детализации начального этапа переработки – прибытию и расформированию составов, что особенно актуально при высокой неравномерности поступления поездов. Модель, реализованная в среде AnyLogic с использованием дискретно-событийного подхода, позволяет точно учитывать временные параметры операций и инфраструктурные ограничения станции.

Анализ технологических условий первой фазы переработки вагонов

Первая фаза переработки вагонов включает в себя взаимодействие прилегающих участков, парка приема, сортировочной горки (или вытяжных путей на станциях без сортировочных горок), пунктов технического обслуживания (ПТО) и коммерческого осмотра (ПКО), а также станционного технического центра. Стабильность работы станции на этом этапе определяется соблюдением ряда условий, обеспечивающих синхронизацию потоков.

Во-первых, интенсивность обработки поездов в парке приема должна быть не ниже интенсивности их прибытия. Это условие формализуется неравенством:

$$\frac{B_{\Pi}}{t_{\Pi}} \geq \frac{1}{I_{\Pi}^p}, \quad (1)$$

где B_{Π} – число бригад ПТО/ПКО;
 t_{Π} – нормативное время обработки одного состава;
 I_{Π}^p – расчетный интервал прибытия поездов.

Невыполнение неравенства (1) приводит к накоплению составов в парке приема, что со временем приводит к блокировке дальнейшего приема поездов. В подобной ситуации возможны два решения: либо снизить интенсивность подачи поездов, либо повысить производительность их обработки.

Во-вторых, интенсивность расформирования составов должна быть не ниже интенсивности завершения их обработки в парке приема [4]. Для станций с горкой это условие формализуется неравенством:

$$\frac{1}{t_{\text{гор}}} \geq \frac{B_{\Pi}}{t_{\Pi}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{гор}}$ – горочный технологический интервал.
 Для станций без горок аналогичное условие принимает вид:

$$\frac{M_p}{t_p} \geq \frac{B_{\Pi}}{t_{\Pi}}, \quad (3)$$

где M_p – число маневровых локомотивов, участвующих в расформировании поездов;
 t_p – среднее время на расформирование состава одним локомотивом.
 Если предположить, что количество бригад не ограничено, неравенства (2) и (3) примут вид:

– для станций с горкой:

$$\frac{1}{t_{\text{гор}}} \geq \frac{1}{I_{\text{п}}^{\text{п}}}, \quad (4)$$

– для станций без горок:

$$\frac{M_{\text{р}}}{t_{\text{р}}} \geq \frac{1}{I_{\text{п}}^{\text{п}}}. \quad (5)$$

Приведенные выше неравенства подчеркивают необходимость синхронизации всех операций первой фазы переработки вагонов: задержка на любом этапе немедленно приводит к снижению общей пропускной способности станции.

Имитационная модель прибытия и расформирования поездов на сортировочной станции

Для визуализации и анализа первой фазы переработки была разработана имитационная модель в среде AnyLogic. Модель включает в себя следующие ключевые элементы инфраструктуры:

- парк приема, состоящий из восьми путей, разделенный на секции для одновременного приема поездов с противоположных направлений;
- сортировочный парк, состоящий из 24 путей;
- один путь надвига;
- один путь роспуска.

Схема путевого развития станции [5] в имитационной модели представлена на рис. 1.

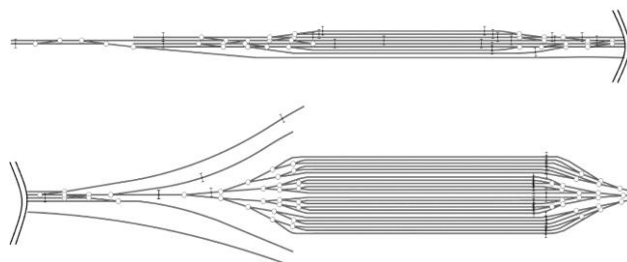


Рис. 1. Схема путевого развития станции в имитационной модели

На путях установлены точки, разграничивающие этапы движения подвижного состава. Расформирование составов выполняется двумя горочными локомотивами.

В модели установлено:

- среднесуточное поступление составов – 42 поезда/сут ($\approx 1,75$ поезда/ч);
- среднее время обработки состава в парке приема (ПТО + ПКО) – 30 мин;
- горочный технологический интервал – 20 мин.

При этом интенсивность вывода составов с горки (3 состава/ч) превышает интенсивность поступления (1,75 состава/ч), что теоретически обеспечивает устойчивость.

Сравнение интенсивностей подтверждает необходимость условий (1)–(5):

- при $B_{\text{п}} = 2$, $t_{\text{п}} = 30$ мин \rightarrow максимальная интенсивность обработки = $2/0,5 = 4$ состава/ч;
- при $t_{\text{гор}} = 20$ мин \rightarrow интенсивность расформирования = $60/20 = 3$ состава/ч;
- при $I_{\text{п}}^{\text{п}} = 34,3$ мин \rightarrow интенсивность прибытия = 1,75 состава/ч.

Таким образом, установлено, что узким местом в технологической цепочке пропуска составов является горка ($3 < 4$). В то же время при увеличении интенсивности поступления до 4 составов/ч пропускная способность станции оказывается недостаточной как на этапе обработки, так и на этапе расформирования. Однако наименьшей в указанной цепочке по-прежнему остается пропускная способность сортировочной горки. Это подтверждает вывод о том, что даже при высокой загрузке парка приема горка будет выступать лимитирующим фактором, если не произведено ее усиление.

Показатели процесса моделирования и сценарии экспериментов

Моделирование проводилось по трем сценариям, отражающим различные режимы эксплуатации станции (табл. 1).

Таблица 1

Сценарии моделирования

Сценарий	Интенсивность поступления, составов/ч
Базовый	1,75
Повышенной нагрузки	2,5
Критический	3,5

Каждый сценарий моделировался в течение 5 ч. Сравнительные показатели по сценариям моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные показатели по сценариям моделирования

Показатель	Сценарий		
	базовый	повышенной нагрузки	критический
Средний простой состава в парке приема, мин	60	64	76
Все поезда приняты	да	да	нет
Блокировка парка приема	нет	нет	да
Загрузка горки, %	52	75	100

Анализ показывает, что даже при увеличении интенсивности до 2,5 состава/ч средний простой состава в парке приема увеличивается с 60 до 64 мин, что свидетельствует о сохранении устойчивости технологического процесса. Однако при дальнейшем росте интенсивности до 3,5 состава/ч система переходит в критический режим: средний простой состава в парке приема возрастает до 76 мин, к концу 5-часового периода происходит блокировка парка приема.

Последовательность проведения экспериментов реализована в виде блок-схемы, представленной на рис. 2.

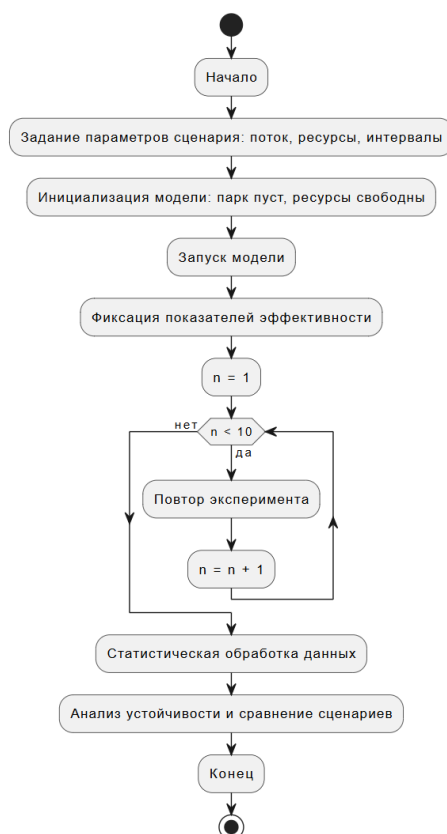


Рис. 2. Блок-схема последовательности проведения экспериментов

Таким образом, описанный выше подход к сценарному анализу на основе имитационной модели позволяет оперативно оценить риски перегрузки элементов станции и обосновать необходимость усиления обработки поездов.

Алгоритм имитационной модели прибытия и расформирования поездов

Прибывающие в расформирование поезда принимаются на пути парка приема. После остановки состав закрепляется, от него отцепляется поездной локомотив, который направляется в локомотивное депо. Далее устанавливается ограждение, после чего производится техническое обслуживание и коммерческий осмотр вагонов. По завершении этих операций ограждение снимается, и к составу подается горочный локомотив для надвига на горку и последующего роспуска в соответствии с сортировочным листком [6–8].

В программной среде AnyLogic [9] описанный технологический процесс реализован следующим образом: модель предусматривает генерацию поездов, поступающих в разборку, на главных путях, а горочных локомотивов – в противоположных горловинах парка приема. Уборка поездных локомотивов предусматривается на ходовом пути, ведущем к локомотивному хозяйству. Горочные локомотивы направляются к составам, подлежащим расформированию, после завершения ожидания, связанного с выполнением операций по ограждению, техническому обслуживанию, коммерческому осмотру и снятию ограждения. Надвиг состава выполняется до точки разъединения отцепов. Цикл разъединения отцепов повторяется до тех пор, пока состав не будет полностью расформирован. После завершения роспуска состава горочный локомотив направляется в противоположную горловину парка, откуда следует к следующему составу, подлежащему расформированию.

Алгоритм моделирования, реализованный в виде логической цепочки в среде AnyLogic (рис. 3), отражает авторскую методику воспроизведения технологического цикла первой фазы переработки вагонов.

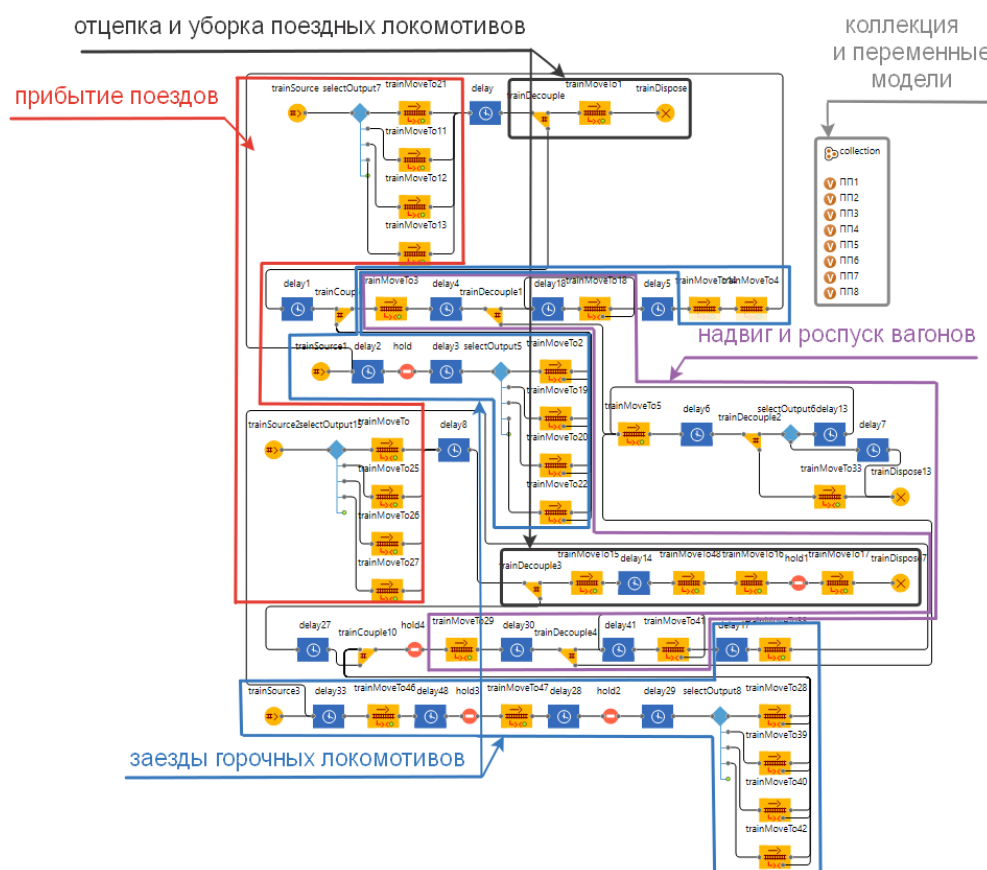


Рис. 3. Алгоритм имитационной модели прибытия и расформирования поездов, реализованный в среде AnyLogic

Важной особенностью модели является учет реальной последовательности технологических операций и их взаимной зависимости: каждая следующая стадия (например, подача горочного локомо-

тива) инициируется только после подтверждения завершения предыдущей (например, окончания операций по обработке состава). Такой подход обеспечивает высокую степень достоверности имитации и позволяет корректно оценивать влияние факторов, таких как количество бригад ПТО/ПКО, непредвиденные задержки при осмотре или неравномерность прибытия поездов. Благодаря этому модель не только воспроизводит штатный режим работы, но и способна имитировать сбои и экстремальные нагрузки, что особенно ценно при оценке устойчивости технологического процесса и разработке резервных сценариев управления.

Следует отметить, что в текущей версии модели не предусмотрено формирование и отправление составов – она фокусируется исключительно на первом этапе. Моделирование прекращается по истечении отведенного на него времени или при достижении критического уровня заполнения парка приема, что позволяет оценить максимальную пропускную способность станции при заданных параметрах.

Выводы

Разработанная имитационная модель прибытия и расформирования поездов на сортировочной станции, реализованная в AnyLogic [10–12], представляет собой эффективный инструмент для анализа и оптимизации технологических процессов. Модель позволяет:

- визуализировать последовательность операций и взаимодействие между подразделениями;
- оценить влияние изменений штатного расписания, времени обработки или инфраструктурных параметров на технологические показатели станции;
- выявлять узкие места и прогнозировать последствия их игнорирования.

Применение имитационного моделирования особенно актуально на этапе проектирования или модернизации станций, когда необходимо опробовать технические и организационные решения без риска для реальной эксплуатации. Это не только снижает финансовые и временные затраты на натурные испытания, но и повышает обоснованность принимаемых решений. В отличие от существующих моделей предложенная имитационная система интегрирует подразделения железнодорожного транспорта в единую модель с учетом аналитических условий синхронизации потоков и реальной топологии станции, что позволяет более точно оценивать предельную пропускную способность по сравнению с традиционными методами расчета.

В перспективе планируется расширить модель за счет включения второй и третьей фаз переработки, а также интеграции внешних факторов, таких как колебания графика движения, отказы техники или изменение состава поездов. Это позволит создать комплексную цифровую копию станции, пригодную для стратегического планирования и оперативного управления.

Список литературы

- 1 **Козлов, П. А.** О построении интеллектуальных систем управления железнодорожными станциями / П. А. Козлов, С. П. Вакулenco, В. С. Колокольников // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 2. – С. 70–76. – ISSN 2074-9325. – EDN UHBNMQ.
- 2 **Иванкова, Л. Н.** Определение пропускной способности станций с учетом емкости путевого развития / Л. Н. Иванкова, А. В. Буракова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 92–98. – DOI 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.
- 3 **Карасев, С. В.** Обоснование рациональных конструктивных и технологических параметров вариантов организации многогруппной сортировки на основе имитационного моделирования / С. В. Карасев, Д. А. Сивицкий // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2017. – Т. 76, № 2. – С. 94–100. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-2-94-100.

References

- 1 **Kozlov, P. A.** On Building Intelligent Railway Station Management Systems / P. A. Kozlov, S. P. Vakulenco, V. S. Kolokolnikov // Science and Technology of Transport. – 2019. – No. 2. – P. 70–76. – ISSN 2074-9325. – EDN UHBNMQ.
- 2 **Ivankova, L. N.** Determining the capacity of stations, taking into account the capacity of track development / L. N. Ivankova, A. V. Burakova // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2018. – No. 3 (59). – P. 92–98. – DOI 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.
- 3 **Karasev, S. V.** Justification of rational design and technological parameters of options for organizing a multi-group sorting based on simulation modeling / S. V. Karasev, D. A. Sivitsky // Russian Railway Science Journal (Vestnik VNIIZhT). – 2017. – Vol. 76, No. 2. – P. 94–100. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-2-94-100.

4 Управление эксплуатационной работой (в примерах и задачах) / А. Ф. Бородин, Е. С. Максимова, Е. В. Бородина [и др.]. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2024. – 328 с. – ISBN 978-5-907695-65-8.

5 Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учебник / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич [и др.] ; под редакцией Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 1086 с. – ISBN 978-5-89035-619-2.

6 **Бородина, Е. В.** Управление эксплуатационной работой. Разработка технологического процесса работы сортировочной станции : учебно-методическое пособие / Е. В. Бородина, Н. В. Бессонова, В. Н. Шмаль. – Москва : РУТ МИИТ, 2025. – 152 с.

7 Расчет технических средств и технологических нормативов работы сортировочной станции : методические указания / А. Э. Александров, Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева, Е. Е. Смородинцева. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 51 с.

8 **Алаев, М. М.** Проект новой сортировочной станции с автоматизированной горкой в железнодорожном узле : учебное пособие / М. М. Алаев, И. А. Иванов-Толмачев – Москва : РУТ МИИТ, 2020. – 84 с.

9 **Евреенова, Н. Ю.** Выбор параметров транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.00 / Евреенова Надежда Юрьевна. – Москва, 2015. – 197 с. – EDN FYTNHZ.

10 **Середов, Е. А.** Имитационное моделирование выполнения маневров на вытяжных путях / Е. А. Середов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 73–78. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_73.

11 **Маликов, Р. Ф.** Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 : учебное пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа : БГПУ, 2013. – 296 с. – ISBN 978-5-87978-862-4.

12 **Ремезова, Е. М.** Имитационное моделирование в среде AnyLogic : лабораторный практикум / Е. М. Ремезова // Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : ВлГУ, 2017. – 87 с. – ISBN 978-5-9984-0806-9.

4 Management of operational work (in examples and tasks) / A. F. Borodin, E. S. Maksimova, E. V. Borodina [et al.]. – Moscow : EMC RT, 2024. – 328 p. – ISBN 978-5-907695-65-8.

5 Designing the railway transport infrastructure (stations, railway and transport hubs) : a textbook / N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich [et al.] ; edited by N. V. Pravdin and S. P. Vakulenko. – Moscow : FSBEI “Educational and Methodological Center for Education on Railway Transport”, 2012. – 1086 p. – ISBN 978-5-89035-619-2.

6 **Borodina, E. V.** Management of operational work. Development of the technological process of operation of a marshalling yard : educational and methodological manual / E. V. Borodina, N. V. Bessonova, V. N. Shmal. – Moscow : RUT MIIT, 2025. – 152 p.

7 Calculation of technical means and technological standards for the operation of a marshalling yard : methodological guidelines / A. E. Aleksandrov, E. N. Timukhina, N. V. Kashcheeva, E. E. Smorodintseva. – Yekaterinburg : USURT, 2016. – 51 p.

8 **Alaev, M. M.** Design of a new marshalling yard with an automated hump in a railway junction : a tutorial / M. M. Alaev, I. A. Ivanov-Tolmachev – Moscow : RUT MIIT, 2020. – 84 p.

9 **Evreenova, N. Yu.** Selection of parameters of transport and transfer hubs formed with the participation of railway transport : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.22.00 / Evreenova Nadezhda Yurievna. – Moscow, 2015. – 197 p. – EDN FYTNHZ.

10. **Seredov, E. A.** Simulation modeling of maneuvers on draw-out tracks / E. A. Seredov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 73–78. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_73.

11 **Malikov, R. F.** Workshop on simulation modeling of complex systems in the AnyLogic 6 environment : a textbook / R. F. Malikov. – Ufa : BSPU, 2013. – 296 p. – ISBN 978-5-87978-862-4.

12 **Remezova, E. M.** Simulation modeling in the AnyLogic environment : laboratory workshop / E. M. Remezova // Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov. – Vladimir : VISU, 2017. – 87 p. – ISBN 978-5-9984-0806-9.

E. A. Seredov, A. P. Osipov

SIMULATION MODEL OF TRAINS ARRIVAL AND BREAKING-UP AT THE MARSHALLING YARD

Abstract. The mechanism of application of simulation modeling methods for the analysis and optimization of technological processes at marshalling yards in the context of digitalization of railway transport is described. The main focus is on the first phase of car processing, which involves the arrival and breaking-up of trains. Using the AnyLogic software package, a simulation model has been developed that reproduces the logic of interaction between railway transport units. The model provides visualization of the technological cycle, assessment of the impact of changes in parameters such as processing time, crew size, and arrival intervals on the station's capacity, and identification of bottlenecks in the technological chain. Analytical conditions for synchronizing the arrival, processing, and disbanding flows have been established and formalized as inequalities. The modeling process is completed either after a specified time or when the critical level of the reception yard occupancy is reached, which allows to estimate the limit capacity of the station under given technological and infrastructure constraints. The results obtained can be used at the stages of design, modernization and operational management of marshalling yards.

Keywords: simulation modeling, process visualization, marshalling yard, processing of wagons, technological process, AnyLogic, digitalization.

For citation: Seredov, E. A. Simulation model of trains arrival and breaking-up at the marshalling yard / E. A. Seredov, A. P. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 43–50. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_1_43.

Сведения об авторах

Середов Евгений Александрович

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Железнодорожные станции
и транспортные узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

Осипов Александр Петрович

Центр инновационного развития –
филиал ОАО «РЖД»,
ведущий технолог,
e-mail: osipoff.sanya2010@yandex.ru

Information about the authors

Seredov Evgeniy Alexandrovich

Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Railway Stations and Transport Hubs”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

Osipov Alexander Petrovich

Center for Innovative Development –
branch of JSC “Russian Railways”,
Leading Technologist,
e-mail: osipoff.sanya2010@yandex.ru