



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК 656.073:004.942

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АГЕНТНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

Мишкuroв П.Н.^{1*}, Рахмангулов А.Н.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Российская Федерация

*E-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Аннотация. Представлены решения по построению имитационных моделей железнодорожной станции на основе агентного подхода. Имитационные модели на железнодорожном транспорте традиционно используются как инструмент обоснования проектных решений. Основным ограничением имитационных моделей железнодорожной станции является специфика организации обработки поездов на уровне оперативного планирования в условиях возрастающей сложности структуры и неравномерности вагонопотоков. Оперативное управление железнодорожным транспортом на основе имитационных моделей требует решения задачи корректировки параметров модели с использованием данных информационной системы. Предлагается подход к построению имитационных моделей железнодорожных станций, основанный на комплексном использовании вспомогательного виртуального графа и агентной модели оперативного управления обработкой поездов. Разработан оригинальный алгоритм формирования виртуального графа железнодорожной станции. Представлена программная библиотека описания маневровой работы и функционала маневрового диспетчера в среде имитационного моделирования AnyLogic. Приведены результаты сравнительного анализа различных подходов к созданию имитационных моделей железнодорожных станций.

Ключевые слова: железнодорожная станция, имитационное моделирование, AnyLogic, маневровый диспетчер, транспортная сеть, маневровый рейс, агентный подход

©Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н., 2021

Поступила: 15 апреля 2021 г.; Принята к публикации: 26 августа 2021 г.; Опубликовано: 30 декабря 2021 г.

Для цитирования:

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.
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ISSN 2222-9396(Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>

CONSTRUCTION FEATURES OF RAILWAY STATION AGENT-BASED SIMULATION MODEL

Mishkurov P.N.^{1*}, Rakhmangulov A.N.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, the Russian Federation

*E-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Abstract. The authors presented solutions for building simulation models of a railway yards based on an agent-based approach. Simulation models in railway transport are traditionally used as a tool for substantiating design decisions. The main limitation of simulation models of railway yards is the specificity of the organization of train processing at the level of operational planning in the context of the increasing complexity of the structure and unevenness of railcars flows. Operational management of railway transport based on simulation models requires solving the problem of adjusting the model parameters using the data of the information system. An approach to the construction of simulation models of railway stations is proposed, based on the integrated use of an auxiliary virtual graph and an agent-based model of operational control of train processing. An original algorithm for forming a virtual graph of a railway yard has been developed. A software library for describing shunting operations and the functionality of a shunting dispatcher in the AnyLogic simulation environment is presented. The results of a comparative analysis of various approaches to the creation of simulation models of railway yards are presented.

Keywords: rail yard, simulation modeling, AnyLogic, shunting dispatcher, transport network, route of shunting train movement, agent-based approach

© Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N., 2021

Received: April 15, 2021; Accepted: August 26, 2021; Published: December 28, 2021

For citation:

Mishkurov P.N., Rakhmangulov 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
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Новым подходом к построению автоматизированных систем управления является комплексное использование имитационного моделирования и методов оптимизации в информационно-управляющих системах железнодорожного транспорта [1–4].

Одни из первых рекомендаций по использованию метода имитационного моделирования для исследования транспортных процессов и систем предложены профессором В.А. Персиановым. В результате были построены универсальные модели. Использование таких моделей позволило исследовать процесс функционирования транспортных объектов из широкого класса в различных условиях. Следующим этапом стало формирование методик моделирования транспортных систем [1, 2, 5]. Однако представленные универсальные модели были ориентированы, в основном, на проектирование железнодорожных станций и узлов.

В настоящее время анализ практик применения метода имитационного моделирования при описании работы железнодорожного транспорта показывает развитие исследований по нескольким направлениям в зависимости от уровней абстракции и планирования.

Исследования [1, 6–11] посвящены современным подходам к построению имитационных моделей функционирования железнодорожных узлов на высоком уровне абстракции. Отличительной чертой такого подхода к построению имитационных моделей является представление грузов и подвижного состава в форме транспортных потоков, описание свойств и характеристик реальных объектов при помощи различных параметров и показателей потоков. Результатами реализации таких моделей в информационно-управляющих системах железнодорожного транспорта являются рекомендации руководителям стратегического уровня управления, например, при разработке инвестиционных планов, анализа пропускной и перерабатывающей способностей станций, оценке качества железнодорожных перевозок.

Подходы к построению имитационных моделей функционирования железнодорожных станций и узлов на среднем уровне абстракции развиваются в двух направлениях. Исследования [12–17] ориентированы на оптимизацию графика движения и планирование маршрутов движения поездов в железнодорожном узле. Авторами работ [18–22] предлагается макромоделирование технологии работы железнодорожных станций и участков железнодорожной сети. Отличительной особенностью такого подхода является описание групп стрелочных переводов и парков путей отдельными объектами библиотек имитационной модели.

Представленные универсальные модели нашли своё применение при проектировании железнодорожных транспортных узлов и станций, информатизации тактического уровня управления и автоматизации решений проектно-плановых задач на железнодорожном транспорте.

Имитационные модели работы железнодорожного транспорта на низком уровне абстракции применяются при создании цифровых двойников с высокой степенью детализации транспортных узлов и станций. Предлагается комплексное использование метода имитационно-

го моделирования и методов оптимизации графика движения, планирования маршрутов движения поездов в железнодорожном транспортном узле [23–25, 10], обработки поездов на железнодорожной станции [26], инфраструктуры и транспортной сети [27]. Основным преимуществом имитационного моделирования с высокой степенью детализации функционирования транспортных узлов и станций является формирование рекомендаций оперативным руководителям перевозочного процесса, что способствует уменьшению вероятности ошибок планирования работ и сокращению времени на принятие управленческих решений [2, 4].

Таким образом, метод имитационного моделирования позволяет описывать сложную функциональную структуру железнодорожных узлов с различной степенью детализации, проводить эксперименты для различных условий, определять их оптимальную структуру.

Однако существенным недостатком имитационного моделирования железнодорожных станций является высокая трудоёмкость и, как следствие, укрупнённое представление в модели схемы путевого развития железнодорожных станций и операций перевозочного процесса. Это связано с отсутствием эффективного способа представления в модели схемы путевого развития железнодорожной станции для решения различных задач моделирования маневровых перемещений.

В статье представлен способ описания в имитационной модели схемы путевого развития железнодорожной станции в форме ориентированного, не имеющего петель графа, а также порядок использования такого графа для моделирования маневровых операций в составе агентной имитационной модели.

2. Агентная имитационная модель железнодорожной станции

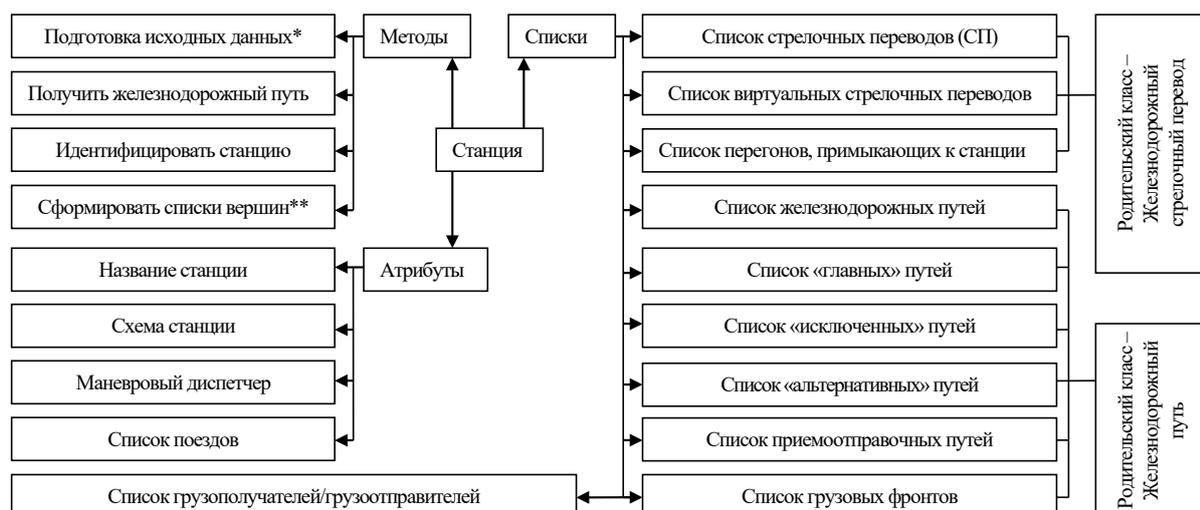
Создание новых программных библиотек моделирования маневровой работы и функционала маневрового диспетчера на основе объектно-ориентированного подхода требует использование агентного подхода к построению имитационных моделей железнодорожных станций (**рис. 1**).

Использование агентного подхода позволит детально описывать статические инфраструктурные (путевое развитие, грузовой фронт, технические средства и т.п.), динамические объекты (вагоны, локомотивы, поезда), а также действия руководителей перевозочного процесса, информационные сообщения между ними.

2.1 Представление схемы путевого развития железнодорожной станции в имитационной модели

Основным инфраструктурным объектом железнодорожной станции является её путевое развитие. Данные об этой схеме могут вводиться в имитационную модель программно (**рис. 2**), путём чтения данных о расположении железнодорожных путей и стрелочных переводов из файла или базы данных, а также вручную.

Транспортные сети традиционно описываются ориентированными или неориентированными графами, не имеющими петель. Предлагается описывать схему путевого развития в виде ориентированного графа, вершины которого графа соответствуют стрелочным переводам, а ребра – железнодорожным путям.



* - методы подготовки исходных данных: инициализировать вершины, определить предшествующий (в составе маршрута) железнодорожный стрелочный перевод, проверить «главный» железнодорожный путь стрелочного перевода, сформировать транспортную сеть, добавить грузополучателя/грузоотправителя.

** - результаты: список вершин транспортной сети, список виртуальных вершин транспортной сети. В качестве исходных данных метода используется граф, описывающий путевое развитие станции.

Рис. 1. Структура данных агентной имитационной модели железнодорожной станции

Fig. 1. Data structure of a rail yard' agent-based simulation model

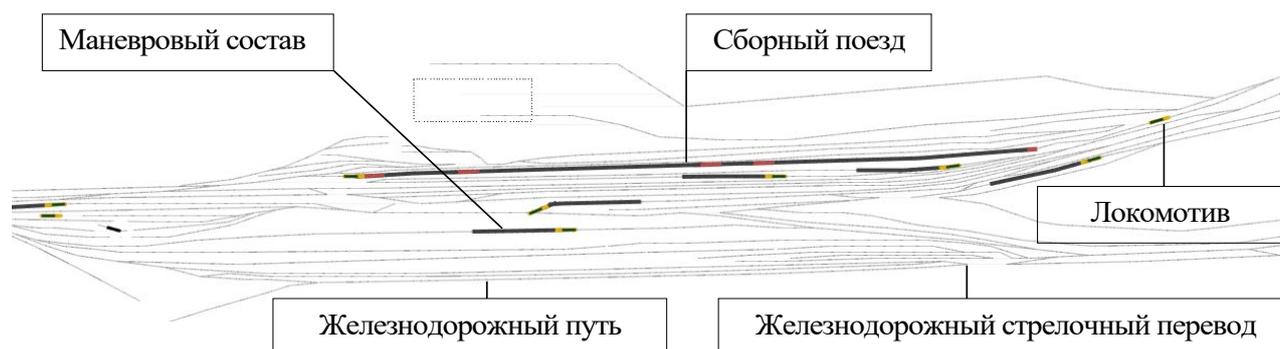


Рис. 2. Визуализация железнодорожной станции в имитационной модели

Fig. 2. Visualizing a rail yard in a simulation model

Традиционное описание топологии путей железнодорожной станции в форме транспортной сети не позволяет моделировать маневровые операции и маршруты маневровых составов с изменением направления их движения. Оптимальные маршруты между двумя произвольными вершинами такого графа не будут содержать ребра, соответствующего вытяжным путям. Это означает, что моделирование движения маневровых составов по таким маршрутам будет некорректным.

Предлагается подход, основанный на автоматизированном формировании виртуального графа, в котором каждой вершине (стрелочному переводу) ставится в соответствии две вершины – реальная и виртуальная (вспомогательная). Впервые идея графа с двумя вершинами для описания схемы путевого развития железнодорожных станций была предложена в [28]. Такой граф позволяет определять оптимальные маршруты движения поездов по железнодорожной станции со сложной схемой, когда требуется изменять направление движения поезда для достижения заданной конечной точки

маршрута. Добавление в граф виртуальной вершины требует связывание этой вершины с реальными при помощи дополнительного виртуального ребра (рис. 3).

Отличительным свойством виртуальной вершины транспортной сети является то, что ребра, которыми она связана с реальными вершинами, располагаются под углом больше 90° друг относительно друга. Такие дополнительные ребра будем также называть виртуальными.

Для предотвращения в модели движения маневрового состава без изменения направления, необходимо удалить из транспортной сети ребро, образующее острый угол, относительно других ребер, исходящих из вершины-стрелочного перевода. Такое ребро называется «исключённым». Ребро, которое не образует острый угол с «исключённым» и «альтернативным» называется «главным» (рис. 3).

Полученная в результате описанных преобразований виртуальная транспортная сеть позволяет моделировать следующие особенности схем путевого развития и технологии работы железнодорожных станций:

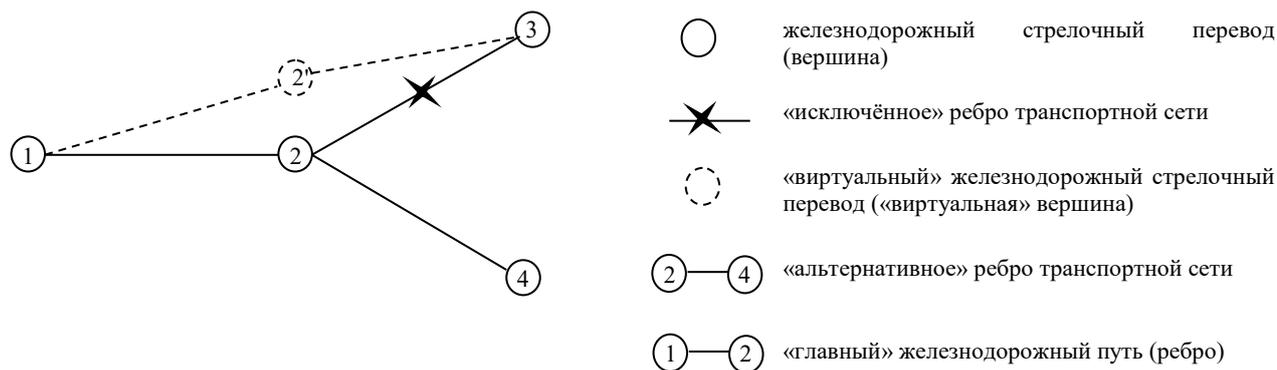


Рис. 3. Представление стрелочного перевода в имитационной модели
 Fig. 3. Formalized description of the turnout switch in the simulation model

- «исключённые» ребра могут иметь как симметричное, так и асимметричное расположение;
- железнодорожным путём начала движения поезда или маневрового состава может быть «альтернативный» или «исключённый», а также «главный»;
- парк путей железнодорожной станции могут иметь параллельное, последовательное или комбинированное расположение;
- направление движение поезда или маневрового состава может быть как в чётном, так и в нечётном направлении;
- маневровые полурейсы могут осуществляться методом осаживания, толчка, оттягивания, перестановки, надвига состава или заезда локомотива.

Виртуальная транспортная сеть формируется в разработанной имитационной модели автоматически в процессе подготовки исходных данных.

2.2 Маршрутизация

Оптимальный (кратчайший) маршрут движения поезда по сформированной виртуальной транспортной сети может быть рассчитан с использованием различных методов. Предлагается использовать быстрый эвристический «sweep algorithm» [29], который позволяет находить все оптимальные маршруты от одной или нескольких начальных вершин транспортной сети до всех остальных вершин.

Варианты маршрута движения поезда по станции хранятся в имитационной модели в виде списка агентов типа «Маршрут» (рис. 4). Однако, результатами эвристического алгоритма являются списки «конечных» вершин и маршрутов до них, поэтому в имитационной модели необходимо расширять функционал формирования маршрутов, передавая данные о пути назначения подвижного состава.

Формирование маршрута движения поезда по станции реализован в два этапа.

На первом этапе определяется маршрут движения поезда до пути назначения и формируется «предварительный» список железнодорожных путей, входящих в этот маршрут. В качестве критериев выбора маршрута используются оценки (длины) железнодорожных стрелочных путей (рёбер).

На рис. 5 показан пример формирования маршрута

с использованием виртуальных рёбер и вершины. Пусть путь отправления – это ребро (4)-(2), начальная вершина определена как (4), а путь назначения – дуга (2')-(3). В результате поиска кратчайших маршрутов в модели формируется список вершин $\{(4), (2), (1), (2'), (3)\}$ и список рёбер $\{(4)-(2), (2)-(1), (1)-(2'), (2')-(3)\}$.

На втором этапе предварительный маршрут разбивается на полурейсы и формируется окончательный маршрут движения поезда по станции. По результатам проверки списка дуг предварительного маршрута на наличие железнодорожных вытяжных путей формируются несколько полурейсов для маневрового состава. Производится контроль вместимости вытяжных путей. В случае превышения вместимости осуществляется поиск вытяжного пути необходимой длины. После этого изменяется часть предварительного маршрута до нового вытяжного пути. Результатом корректировки предварительного маршрута является новый список дуг, в состав которого входят железнодорожные вытяжные пути достаточной вместимости.

Формирование маршрутов является методом агента «Маневровый диспетчер», который определяет приоритеты пропускания поездов по транспортной сети.

2.3 Маневровая работа

Разработанная модель имитирует следующие функции маневрового диспетчера железнодорожной станции:

- приём и отправление поездов;
- планирование маневровых полурейсов;
- управление централизованными стрелочными переводами и контроль занятости элементов путевого развития;
- планирование подачи-уборки вагонов для выполнения грузовых операций;
- планирование формирования-расформирования поездов;
- планирование перестановок вагонов;
- контроль накопления составов поездов;
- ведение графика исполненной работы.

Оперативное управление работой железнодорожной станцией в имитационной модели реализовано агентом «Маневровый диспетчер».

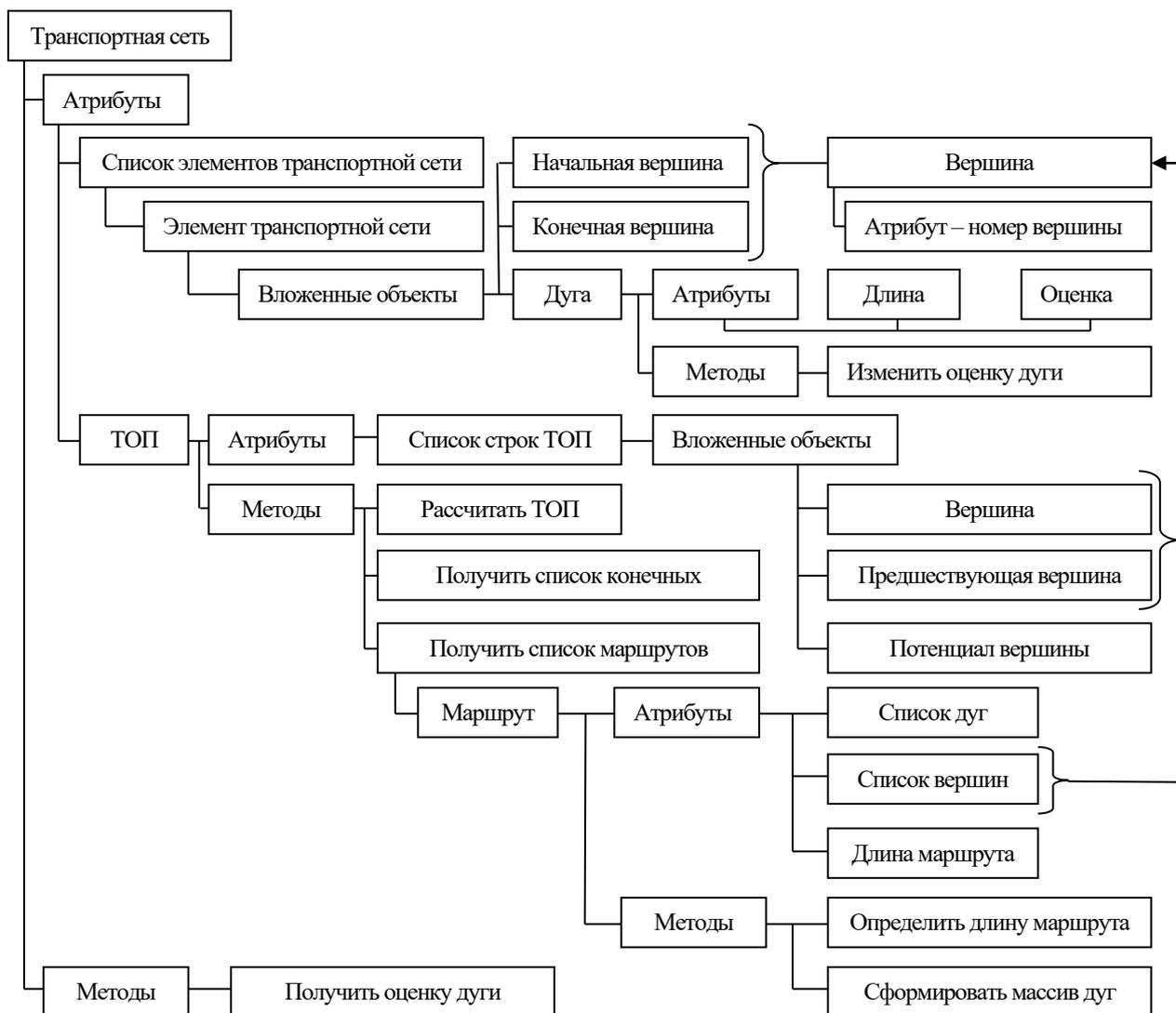


Рис. 4. Структура данных, описывающих путевое развитие железнодорожной станции в имитационной модели
 Fig. 4. Track topology data structure in the simulation model

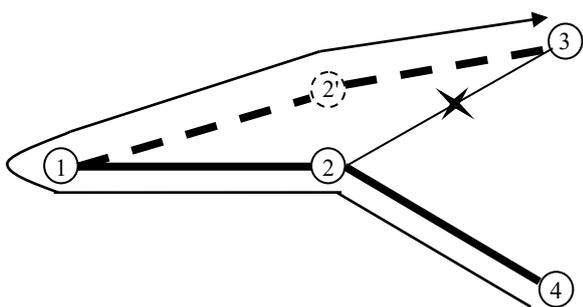


Рис. 5. Схема формирования маршрута на виртуальной транспортной сети
 Fig. 5. Route formation scheme on a virtual transport network

Результаты выполнения методов агента «Маневровый диспетчер» передаются в виде сообщений через установленные связи агентов в соответствии со структурой информационных потоков, циркулирующих между уровнями оперативного руководства работой железнодорожной станции [30, 31].

Одним из объектов оперативного руководства работой железнодорожной станции на низком уровне управления является локомотиво-составительская бригада, функционал которой представлен в агенте «Поезд». Агенты типа «Поезд» получают сообщения от агента «Маневровый диспетчер» и выполняют соответствующие команды.

Обработка поездов на железнодорожной станции в модели имитируется потоковой диаграммой (рис. 6), в состав которой входят стандартные блоки «Железнодорожной библиотеки» и «Библиотеки моделирования процессов» AnyLogic. Данная потоковая диаграмма является частью агента «Поезд». В состав разработанной потоковой диаграммы (рис. 6) входят переменные, блоки AnyLogic, а также вложенные агенты. Основные переменные: «ПутьОтправления» и «ПутьНазначения» – ссылки ребра транспортной сети, соответствующие путям отправления и назначения; «маршрутЗавершен», «полурейсЗавершен» – логические переменные, значение которых изменяется на «истина» после окончания движения по маршруту или после выполнения полурейса.

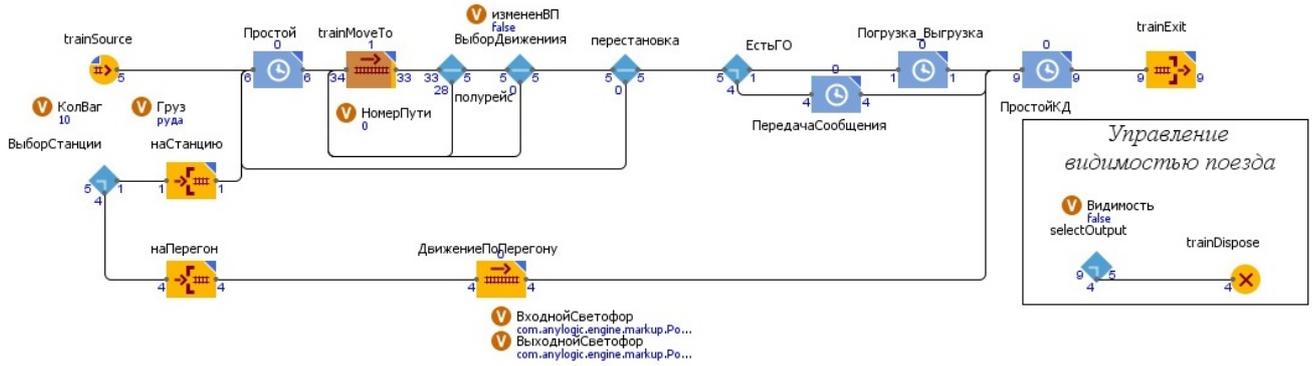


Рис. 6. Фрагмент потоковой диаграммы AnyLogic, имитирующей работу локомотиво-составительской бригады в агенте типа «Поезд»

Fig. 6. Fragment of the AnyLogic flowchart simulating the work of a shunting crew in an “Train” type agent

В разработанной потоковой диаграмме используются следующие блоки AnyLogic: «trainMoveTo» – имитирует движение поезда или маневрового состава по маршруту, заданному списком путей; «Delay» – имитирует задержку состава поезда под грузовыми операциями, а также различные простои; «selectOutput» – определяет место агента «Поезд» в потоковой диаграмме в зависимости от значений переменных «маршрутЗавершен» и «полуреисЗавершен» передаёт агент-поезд в блок «Delay» для имитации простоя или возвращает его в блок «trainMoveTo» для продолжения движения по маршруту [10].

Вложенными агентами потоковой диаграммы являются: «текущаяСтанция» – станция нахождения поезда; «маршрутПоСтанции» – оптимальный маршрут на виртуальной транспортной сети. Поточковая диа-

грамма также содержит список рёбер маршрута от пути отправления до пути назначения и данные о полуреисах, вытяжных путях, входящих в оптимальный маршрут (рис. 7).

Представленный способ описания маневровой работы на железнодорожной станции является универсальным и позволяет моделировать сложные маневровые перемещения с изменением направления движения поездов.

3. Результаты

Данный подход к построению имитационных моделей железнодорожных станций реализован на примере работы железнодорожного транспорта необщего пользования металлургического и горно-обогатительного предприятий (рис. 8).



Рис. 7. Фрагмент структуры данных агента «маршрутПоСтанции»
маршрутПоСтанции” data structure

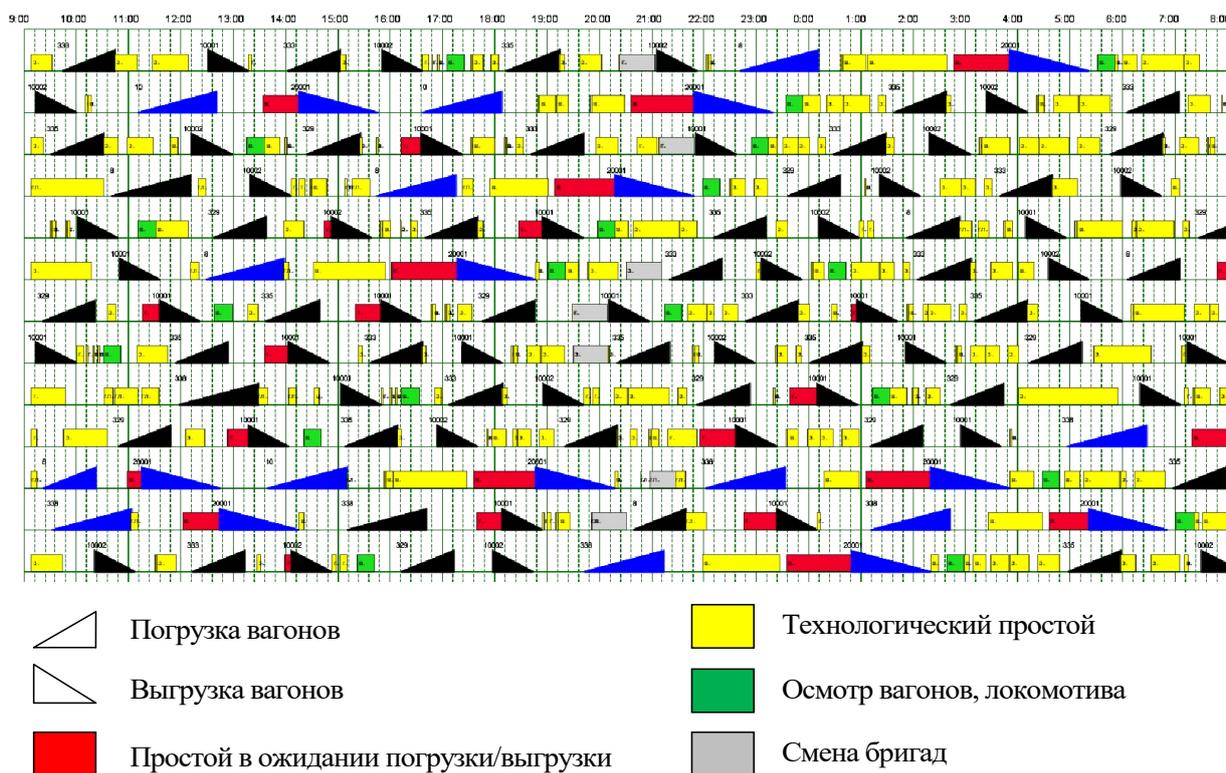


Рис. 8. Пример представления результатов имитационного моделирования работы железнодорожной станции
 Fig. 8. An example of the presentation of the rail yard' simulation modeling results

Результаты проведенных экспериментов на построенных имитационных моделях железнодорожных станций показали адекватное движение железнодорожных составов при выполнении маневровых и поездных операций, а также позволили выявить преимущества агентного подхода при построении имитационных моделей железнодорожных станций (табл. 1). В таблице предлагаемый агентный подход сравнивается с двумя известными подходами. Основное различие между подходами заключается в способе описания задач технологического процесса железнодорожной

станции. Традиционный подход основан на подробном описании каждой операции технологического процесса. Такой подход реализован в универсальных программах моделирования. Улучшенный подход основан на описании технологических процессов в форме набора технологических карт. Этот подход реализуется специализированными программами для моделирования работы железнодорожного транспорта, например [23, 19], а также использовался в ранних версиях представленной имитационной модели [2].

Таблица 1. Результаты анализа подходов к построению имитационных моделей железнодорожных станций
 Table 1. Approaches to the design of simulation models of rail yards

Особенность	Предлагаемый подход	Улучшенный подход	Традиционный подход
Содержание технологических карт	Постоянное	Переменное (зависит от числа технологических операций)	Переменное (зависит от числа технологических операций)
Число операций в составе технологического процесса	Переменное	Постоянное	Постоянное
Последовательность операций технологического процесса	Переменная	Переменная	Постоянная
Описание процесса формирования – расформирования составов	Автоматическое	Ручное (исходные данные)	Ручное (исходные данные)
Формирование маршрутов движения поездов	Автоматическое (оптимальные маршруты)	Автоматическое (оптимальное для отдельных маршрутов)	Ручное (таблица маршрутов)
Изменение маршрутов в процессе моделирования	Автоматическое	Ручное	Отсутствует

4. Заключение

Авторы предложили агентный подход для описания схемы путевого развития железнодорожных станций и технологии выполнения маневровых работ. Показан пример реализации предложенного подхода в составе имитационной модели железнодорожного пути необщего пользования, построенной с использованием программной платформы AnyLogic.

Использование агентного подхода к построению имитационных моделей железнодорожной станции и разработанный способ описания путевого развития

железнодорожных станций в составе имитационных моделей расширяет возможность комплексного применения имитационного моделирования и методов оптимизации при построении автоматизированных систем управления работой железнодорожного транспорта. Реализация данного подхода в рамках информационно-управляющих систем на железнодорожном транспорте позволит снизить вероятность возникновения ошибок и задержек при управлении перевозочным процессом.

Список литературы

1. Осокин О.В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте: дис. ... д-ра техн. наук. М. 2014. 355 с.
2. Рахмангулов А.Н., Копылова О.А., Мишкuroв П.Н. Железнодорожные транспортно-технологические системы: организация функционирования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. 300 с.
3. Michal G., Huynh N., Shukla N., Munoz A., Barthelemy J. RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight // *Transportation Research Procedia*. 2017. Т. 25. С. 461-473. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.426>.
4. Rakhmangulov A., Śladkowski A., Osintsev N., Mishkurov P., Muravev D. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes. // *Rail Transport—Systems Approach / A. Śladkowski*. Cham: Springer International Publishing, 2017. С. 405-456. https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-51502-1_10.
5. Персианов В.А., Курбатова А.В., Липатов А.Г. Информатизация управления и автоматизированного решения проектно-плановых задач на транспорте. М.: ООО «Транслит», 2017. 176 с.
6. Козлов П.А., Козлова В.П., Осокин О.В. Об экономической сущности транспорта // *Транспорт: наука, техника, управление*. Научный информационный сборник. 2020. № 2. С. 57-59. <https://www.doi.org/10.36535/0236-1914-2020-02-10>.
7. Сорочкина И.С., Числов О.Н. Методы системного анализа и имитационного моделирования в работе предприятий промышленного железнодорожного транспорта // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2014. № 2. С. 115-120.
8. Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А., Осокин О.В. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2019. № 1. С. 60-69. <https://www.doi.org/10.20291/2079-0392-2019-1-60-69>.
9. Сай В.М., Кочнева Д.И. Моделирование оценки потребности региона в контейнерных перевозках // *Мир транспорта*. 2018. Т. 16. № 4. С. 160-178.
10. Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н. Динамическая оптимизация вагонопотоков. М.: Русайнс, 2017. 110 с.
11. Muravev D., Hu H., Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port // *International Journal of Information Management*. 2021. Т. 57. С. 102133. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
12. Li S., Lv H., Xu C., Chen T., Zou C. Optimized Train Path Selection Method for Daily Freight Train Scheduling // *IEEE Access*. 2020. Т. 8. С. 40777-40790. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976904>.
13. Moeinaddini A., Shafahi Y., Hasany R. M. A simulation model for train movements in the rail network // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. 2019. Т. 172. № 3. С. 152-163. <https://www.doi.org/10.1680/jtran.16.00082>.
14. Alexandrov A., Bannikov D., Sirina N. Agent-based modeling of service maintenance and repair of rolling stock // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Т. 403. № 1. С. 12193. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012193>.
15. Wang J., Ghanem A., Rakha H., Du J. A rail transit simulation system for multi-modal energy-efficient routing applications // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2021. Т. 15. № 3. С. 187-202. <https://www.doi.org/10.1080/15568318.2020.1718809>.
16. Joffe A. D., Wiggins M. W. Cross-task cue utilisation and situational awareness in learning to manage a simulated rail control task // *Applied ergonomics*. 2020. Т. 89. С. 103216. <https://www.doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103216>.

17. Bažant M., Kavička A., Diviš R., Varga M. Simulation-Based Rail Traffic Optimizations Applying Multicriterial Evaluations of Variants // MENDEL. 2019. Т. 25. № 1. С. 139-146. <https://www.doi.org/10.13164/mendel.2019.1.139>.
18. Козлов П.А., Вакуленко С.П., Колокольников В.С. О построении интеллектуальных систем управления железнодорожными станциями // Наука и техника транспорта. 2019. № 2. С. 70-76.
19. Колокольников В.С., Слободянюк И.Г. Технология макромоделирования полигонов // Транспорт Урала. 2019. № 3. С. 48-51. <https://www.doi.org/10.20291/1815-9400-2019-3-48-51>.
20. Лукьянов В.А., Мишкuroв П.Н., Копылова О.А. Логистическая модель транспортно-технологической системы промышленного предприятия // Бюллетень транспортной информации. 2019. Т. 293. № 11. С. 19-30.
21. Chislov O., Zadorozhnyi V., Lomash D., Chebotareva E., Solop I., Bogachev T. Methodological Bases of Modeling and Optimization of Transport Processes in the Interaction of Railways and Maritime Transport. // Modern Traffic Engineering in the System Approach to the Development of Traffic Networks / E. Macioszek [и др.]. Cham: Springer International Publishing, 2020. С. 79-89. https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-34069-8_7.
22. Шмулевич М.И., Стариков А.Е. Особенности нормирования маневровой работы в имитационной модели станции // Мир транспорта. 2015. Т. 13. С. 198-212.
23. Александров А.Э., Сурин А.В., Шипулин А.В. Использование имитационных моделей в оперативном планировании поездной работы // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. Т. 60. № 4. С. 65-72.
24. Yang Z., Xiang D., Cheng Y. VR Panoramic Technology in Urban Rail Transit Vehicle Engineering Simulation System // IEEE Access. 2020. Т. 8. С. 140673-140681. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009326>.
25. Хабаров В.И., Красникова К.В. Создание имитационной модели движения поездов с использованием мультиагентного и дискретно-событийного подходов на примере ЗападноСибирской железной дороги // Journal of Transsib Railway Studies. 2017. Т. 31. № 3. С. 143-154.
26. Калинина А.Р. Разработка имитационной модели узловой технической станции // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. Т. 4. № 2.
27. Меркулов А.В., Годяев А.И. Некоторые аспекты имитационного моделирования инфраструктуры железнодорожного участка // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2015. Т. 39. № 4. С. 109-116.
28. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications // ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg. 2020. Т. 6. № 3. <https://www.doi.org/10.1115/1.4046739>.
29. Gillet B. E., Miller L. E., Johnson J. G. Vehicle dispatching — Sweep algorithm and extensions. // Disaggregation / L. P. Ritzman [и др.]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1979. С. 471-483. https://www.doi.org/10.1007/978-94-015-7636-9_30.
30. Багинова В.В., Рахмангулов А.Н., Мишкuroв П.Н. Методика оценки организационной структуры оперативного управления вагонопотоками на путях необщего пользования // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2012. Т. 2. С. 19-22.
31. Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Управление вагонопотоками в промышленных транспортных системах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1. С. 16-20.

References

1. Osokin O.V. *Intelligent Support of Production Processes in Railway Transport: Dr. Tech. Thesis*. Moscow: Russian University of Transport. 2014. 355 p. (In Russ.).
2. Rakhmangulov A.N., Kopylova O.A., Mishkurov P.N. *Railway transport and technological systems: organization of functioning*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2014. 300 p. (In Russ.).
3. Michal G., Huynh N., Shukla N., Munoz A., Barthelemy J. *RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight* // Transportation Research Procedia. 2017, vol. 25, pp. 461–473. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.426>.
4. Rakhmangulov A., Sładkowski A., Osintsev N., Mishkurov P., Muravev D. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes // Rail Transport—Systems Approach: Studies in Systems, Decision and Control]. 2017. vol. 87, Cham: Springer International Publishing, pp. 405–456.
5. Persianov V.A., Kurbatova A.V., Lipatov A.G. *Informatization of management and automated solution of design and planning tasks in transport*. Moscow: Translit. 2017. 176 p. (In Russ.).

6. Kozlov P.A., Kozlova V.P., Осокин О.В. *About the Economic Essence of Transport* // Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection. 2020, no. 2, pp. 57–59. <https://www.doi.org/10.36535/0236-1914-2020-02-10>. (In Russ.).
7. Sorochkina I.S., Chislov O.N. *Methods of System Analysis and Simulation in the Work of Industrial Railway Enterprises* // Proceedings of the Rostov State Transport University. 2014, no. 2, pp. 115–120. (In Russ.).
8. Kozlov P.A., Kolokol'nikov V. S., Tushin N.A., Osokin O.V. *On Using Effective Management Models for Transport Flows* // Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2019, no. 1, pp. 60–69. <https://www.doi.org/10.20291/2079-0392-2019-1-60-69>. (In Russ.).
9. Say V.M., Kochneva D.I. *Modeling of Assessment of a Region's Need for Container Transportation* // World of Transport and Transportation. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 160–178. (In Russ.).
10. Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. *Dynamic Optimization of Railcar Flows*. Moscow: RuScience. 2017. 110 p. (In Russ.).
11. Muravev D., Hu H., Rakhmangulov A., Mishkurov P. *Multi-agent Optimization of the Intermodal Terminal Main Parameters by Using AnyLogic Simulation Platform: Case Study on the Ningbo-Zhoushan Port* // International Journal of Information Management. 2021, vol. 57, p. 102133. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
12. Li S., Lv H., Xu C., Chen T., Zou C. *Optimized Train Path Selection Method for Daily Freight Train Scheduling* // IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 40777–40790. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976904>.
13. Moeinaddini A., Shafahi Y., Hasany R. M. *A simulation model for train movements in the rail network* // Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport. 2019, vol. 172, no. 3, pp. 152–163. <https://www.doi.org/10.1680/jtran.16.00082>.
14. Alexandrov A., Bannikov D., Sirina N. *Agent-based Modeling of Service Maintenance and Repair of Rolling Stock* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 403, no. 1, p. 12193. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012193>.
15. Wang J., Ghanem A., Rakha H., Du J. *A rail transit simulation system for multi-modal energy-efficient routing applications* // International Journal of Sustainable Transportation. 2021, vol. 15, no. 3, pp. 187–202. <https://www.doi.org/10.1080/15568318.2020.1718809>.
16. Joffe A.D., Wiggins M.W. *Cross-task Cue Utilisation and Situational Awareness in Learning to Manage a Simulated Rail Control Task* // Applied ergonomics. 2020, vol. 89, p. 103216. <https://www.doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103216>. (eng).
17. Bažant M., Kavička A., Diviš R., Varga M. *Simulation-Based Rail Traffic Optimizations Applying Multicriterial Evaluations of Variants* // MENDEL. 2019, vol. 25, no. 1, pp. 139–146. <https://www.doi.org/10.13164/mendel.2019.1.139>.
18. Kozlov P.A., Vakulenko S.P., Kolokolnikov V.S. *About Design Intelligent Control Systems for Railway Yards* // Science and Technology in Transport. 2019, no. 2, pp. 70–76. (In Russ.).
19. Kolokolnikov V.S., Slobodyanyuk I.G. *Technology of Polygons Macromodelling* // Transport of the Urals. 2019, no. 3, pp. 48–51. <https://www.doi.org/10.20291/1815-9400-2019-3-48-51>. (In Russ.).
20. Lukyanov V.A., Mishkurov P.N., Kopylova O.A. *The Logistics Model of a Transport Technological System of the Industrial Enterprise* // the Bulletin of Transport Information. 2019, vol. 293, no. 11, pp. 19–30. (In Russ.).
21. Chislov O., Zadorozhnyi V., Lomash D., Chebotareva E., Solop I., Bogachev T. *Methodological Bases of Modeling and Optimization of Transport Processes in the Interaction of Railways and Maritime Transport* // Modern Traffic Engineering in the System Approach to the Development of Traffic Networks: Advances in Intelligent Systems and Computing]. 2020. vol. 1083, Cham: Springer International Publishing, pp. 79–89.
22. Shmulevich M.I., Starikov A.E. *Features of Regulation of Shunting Operations in the Station Simulation Model* // World of Transport and Transportation. 2015, vol. 13, pp. 198–212. (In Russ.).
23. Aleksandrov A.E., Surin A.V., Shipulin A.V. *The Use of Simulations Models In Operational Planning of Train's Operation* // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. 2015, vol. 60, no. 4, pp. 65–72. (In Russ.).
24. Yang Z., Xiang D., Cheng Y. *VR Panoramic Technology in Urban Rail Transit Vehicle Engineering Simulation System* // IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 140673–140681. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009326>.
25. Khabarov V.I., Krasnikova K.V. *Creating a Simulation Model of Traffic With Using Multi-agent and Discrete Event Approaches by the Example of the West-Siberian Railway Traffic* // Известия Транссиба. 2017, vol. 31, no. 3, pp. 143–154. (In Russ.).
26. Kalinina A.R. *The Development of Technical Junction Stationsimulation Model* // Pacific Rim Countries Transportation System. 2015, vol. 4, no. 2. (In Russ.).
27. Merkulov A.V., Godyaev A.I. *Some Aspects of Simulation Modeling of the Railway Section Infrastructure* // Bulletin of PNU. 2015, vol. 39, no. 4, pp. 109–116. (In Russ.).

28. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. *Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications* // ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg. 2020, vol. 6, no. 3. <https://www.doi.org/10.1115/1.4046739>.
29. Gillet B.E., Miller L.E., Johnson J.G. Vehicle dispatching — Sweep algorithm and extensions // *Disaggregation*. 1979. vol. 20, Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 471–483.
30. Baginova V.V., Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N. *Technique of Assessing the Organizational Structure of On-Line Traffic Control on The Railways Belonging to Industrial Enterprises* // *Transport: Science, Equipment, Management*. Scientific Information Collection. 2012, vol. 2, pp. 19–22. (In Russ.).
31. Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. *Railcar Flow Management in Industrial Transport Systems* // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013, no. 1, pp. 16–20. <https://www.doi.org/10.6084/m9.figshare.14134568.v1>. (In Russ.).