

М.А. Власов, Р.С. Большаков

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Аннотация. В связи с необходимостью модернизации объектов железнодорожной инфраструктуры, особенно на территориях, расположенных в границах Байкало-Амурской магистрали, требуется применение новых методов и способов решения проблем по увеличению пропускной и провозной способностей. Перспективным направлением в области улучшения эксплуатационных показателей железнодорожной сети служит использование методов имитационного моделирования, которые позволяют прогнозировать изменение объёмов перевозок и предлагать способы и средства улучшения технологии работы объектов железнодорожной инфраструктуры.

Объекты инфраструктуры являются совокупностью устройств и представляют собой сложную техническую систему со множеством параметров. Для обеспечения безаварийного функционирования этой системы, а также для функционирования различных частей железнодорожного транспорта необходимо обеспечивать постоянный контроль за их работой и улучшать её, что может быть достигнуто за счет применения программно-аппаратных комплексов. Представлено использование среды AnyLogic для моделирования работы железнодорожных станций.

Ключевые слова: имитационное моделирование, транспортное моделирование, объекты железнодорожной инфраструктуры, программный комплекс AnyLogic, пропускная и провозная способности.

М.А. Vlasov, R.S. Bolshakov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

REVIEW OF THE CURRENT STATE OF DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF RAILWAY STATION MODELING

Abstract. In connection with the need to modernize railway mobility facilities, especially in areas operating on the borders of the Baikal-Amur Mainline, the use of new methods and methods for solving problems to increase throughput and carrying capacity is required. A promising direction in the field of improving the performance of the railway network is the use of simulation research methods, which make it possible to predict changes in traffic volumes and propose methods and means for improving the operating technologies of railway network facilities.

Objects are complex devices and represent a complex technical system with many parameters. To ensure trouble-free shutdown of this system, as well as to shut down various parts of railway transport, it is necessary to ensure constant monitoring of their operation and improve it, which can be achieved through the use of software and hardware systems. The use of the Anylogic environment for modeling the operation of railway facilities is presented.

Key words: simulation modeling, transport modeling, railway infrastructure facilities, AnyLogic software package, throughput and carrying capacity.

Введение

В целях эффективного развития в холдинге ОАО «РЖД» определены следующие задачи по улучшению железнодорожной инфраструктуры: повышение возможностей создания новых перевозочных и логистических продуктов (скорость, надежность оказания услуг инфраструктуры, повышение провозных способностей); снижение издержек инфраструктуры; модернизация путевого развития объектов железнодорожной сети; строительство дополнительных главных путей для наращивания объемов перевозок. Данное развитие определяется в [1].

Решение этих проблем направлено на увеличение пропускной и провозной способностей, определение и устранение «узких мест» работы станций и прилегающим к ним участкам, уменьшение простоя железнодорожного транспорта на объектах инфраструктуры и т.д. В области эксплуатационной работы, а именно в построении, расчете, оптимизации транспортных узлов, размещении станций в узлах, совершенствовании их схем, повышении эффективности

перевозочного процесса стоит выделить основополагающие работы отечественных ученых – [2-7], посвященные исследованию и моделированию железнодорожных станций.

В области транспортного моделирования можно выделить следующие труды, посвященные применению теории систем массового обслуживания оценки функционирования транспортных объектов, в том числе применительно к железнодорожным перевозкам – [8-14].

Целями транспортного моделирования являются оценка современных реалий и тенденций развития транспорта, планирование развития транспортной инфраструктуры, улучшение организации движения и управление транспортной отраслью [15].

Реализацию стратегических задач, связанных с улучшением пропускной способности транспортной инфраструктуры холдинга ОАО «РЖД» и увеличением количественных показателей работы сети железных дорог, может способствовать применение компьютерного моделирования [16].

В современном мире использование компьютерного моделирования неразрывно связано с созданием имитационных моделей железнодорожных станций, что направлено на оптимизацию их работы, а также на проектирование или реконструкцию объектов инфраструктуры (железнодорожные станции, участки, перегоны, разъезды и т.п.) [17].

Одним из инструментов моделирования объектов транспортной инфраструктуры является программный комплекс AnyLogic [18], который позволяет упростить имитационное моделирование, при котором модель железнодорожной станции станет проще и удобнее для исследования, чем исходный объект (процесс, система).

В предлагаемой статье рассматривается современное состояние разработок в области создания и применения имитационных моделей.

Общие положения. Постановка задачи исследования

Необходимость применения методов имитационного моделирования обусловлена их высокой точностью, касательно получения результатов моделирования реальных объектов и систем. Это означает, что исследователь может создать такую модель железнодорожной станции, в которой есть возможность изменения различных параметров (задержки, простои поездов и др.) с учетом наличия случайных процессов, присущих для реальных объектов инфраструктуры [19].

Существенным преимуществом использования имитационного моделирования является потенциальное прогнозирование работы исследуемых объектов. Благодаря данному свойству, имитационная модель обладает способностью показать, как работает система с влиянием на неё факторов, которые исследователь хотел бы применить к реальному объекту инфраструктуры.

Использование подхода имитационного моделирования – это соответствие как параметрам, так и структуре исследуемого объекта. Поэтому цель исследования заключается в анализе современного состояния разработок и моделей в сфере имитационного моделирования.

Обзор методов моделирования

Как известно, имитационное моделирование исследуемых объектов строится на понятии терминов математического моделирования [20]. В результате чего, стоит выделить четыре основополагающих метода моделирования транспортных систем: аналитический детерминированный, аналитический вероятностный, графический, имитационное моделирование.

Аналитический детерминированный метод предполагает использование аналитических формул, которые способствуют вычислению характеристик системы (расчет пропускной способности, оптимальное количество путей) [21]. Однако, существенным недостатком такого подхода является наличие неточности расчетов, что может повлиять на исследуемую систему.

Аналитический вероятностный метод – это прежде всего использование методов теории массового обслуживания, вероятности, случайных процессов [22]. Данный подход требует тщательной проработки, так как расчеты на его основе являются трудоемкими и исследуемый объект может оказаться слишком сложным для изучения.

Графический метод базируется на принципах построения плана-графика движения поездов, а также теории графов [23]. Характерным преимуществом метода является возможность

определения «узких мест» и структуры железнодорожной инфраструктуры. Но в то же время у исследуемой системы отсутствует вероятность учета случайных событий, оказывающих влияние на неё.

Имитационное моделирование является наиболее современным методом изучения транспортных систем. Оно позволяет учесть характеристики, необходимые исследователю в области транспортного моделирования:

- составить актуальную схему путевого развития;
- оптимизировать технологический процесс работы железнодорожных станций;
- учесть влияние случайных факторов;
- определить эффективность проводимых мероприятий.

В имитационном моделировании используются разнообразные программно-аппаратные комплексы: Arena, eM-Plant Simulation, NetLogo, VisualBots, REPAST, OpenTrack, Villon, AnyLogic и др.

Arena – инструмент моделирования систем массового обслуживания [24]. В этом инструменте эксперимент моделирования имеет наличие случайных величин, в результате которого происходит возникновение очередей. Главный недостаток системы Arena – отсутствие понятия сложной инфраструктуры железнодорожной станций.

eM-Plant Simulation – среда разработки имитационного моделирования, включающая в основу системы массового обслуживания [25]. Статистическими результатами экспериментов являются производительность, время использования, заполненность. Однако несоответствие требованиям железнодорожной инфраструктуры, как и у инструмента Arena, является существенным недостатком среды.

NetLogo, VisualBots, REPAST – так называемые мультиагентные или многоагентные системы [26]. Принцип работы построен на одновременной работе нескольких агентов, присутствует независимость, ограниченность, децентрализация работы агентов.

OpenTrack – программный комплекс, решающий проблемы составления расписания поездов и их передвижения в соответствии с работой устройств сигнализации, централизации и блокировки [27]. Недостаток системы – отсутствие наличия русскоязычного интерфейса.

Villon – система, имеющая характеристики схожие с отечественным комплексом AnyLogic. Присутствует возможность моделирования различных объектов инфраструктуры (станции, терминалы, склады и т.д.). Недостаток системы – отсутствие наличия русскоязычного интерфейса и отсутствие учёта централизованного диспетчерского управления [28].

Данная статья рассматривает отечественный программный комплекс AnyLogic, позволяющий строить имитационные модели и наиболее подходящий для моделирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта [29]. В AnyLogic исследователь решает проблемы построения сложных систем, которыми являются железнодорожные станции при помощи уже встроенной Железнодорожной библиотеки (Rail Library), имеющей ряд блоков, упрощающих моделирование.

Моделирование железнодорожной станции с использованием программно-аппаратного комплекса AnyLogic

Как было указано выше, комплекс AnyLogic позволяет моделировать объекты железнодорожной инфраструктуры. Поэтому в статье предлагается создать имитационную модель работы железнодорожной станции с помощью AnyLogic.

Основной задачей построения модели станции является реализация проверки нахождения железнодорожного состава на путях (при наличии занятости пути происходит выбор другого маршрута движения железнодорожного состава согласно свободным путям станции). Рассматриваемая железнодорожная станция, которая имеет один главный путь и четыре боковых пути. Схема железнодорожной станции представлена на рисунке 1.

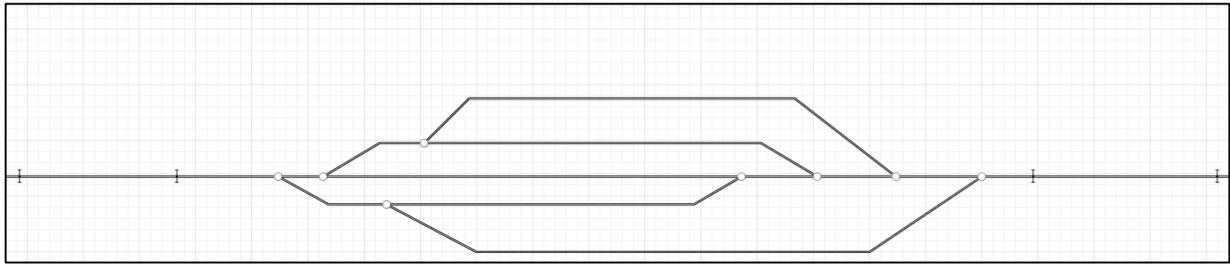


Рис. 1. Схема железнодорожной станции

Процесс моделирования построен таким образом – поезд прибывает с перегона на главный путь и останавливается, затем следующий за ним поезд следует на свободный путь и останавливается, процесс продолжается, до тех пор, пока четыре пути не будут заняты, и поезд, прибывший раньше всех на станцию, не уйдет на перегон.

Процесс моделирования работы станции представлен на рисунке 2, где используются соответствующие блоки, переменные и условия, необходимые для моделирования.

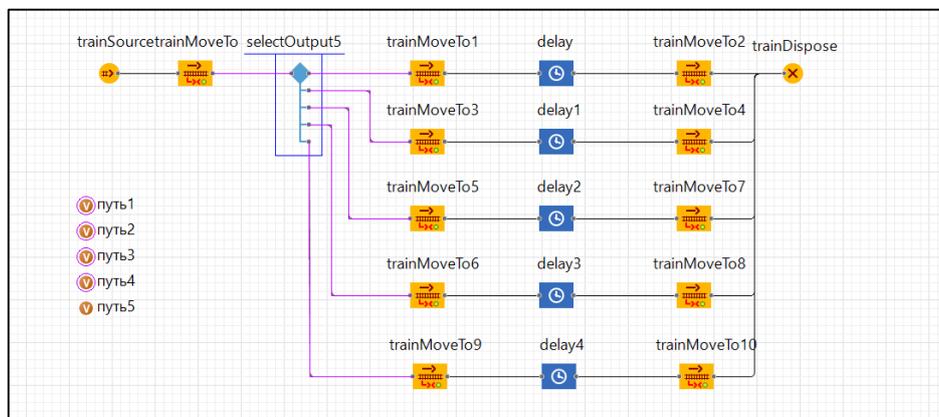


Рис. 2. Процесс моделирования работы станции

Так за создание железнодорожных составов отвечает блок TrainSource, управление движением состава задается с помощью блоков TrainMoveTo, условия моделирования выбираются согласно блоку SelectOutput5, блоки Delay определяют время нахождения поездов на станции, а блок TrainDispose удаляет железнодорожные составы из модели.

Обратимся подробнее к блоку SelectOutput5. Условия работы блока построены с помощью заданных переменных. То есть переменные – это соответствующие пути станции (I, II, III, IV, V). Им присваиваются условия true, это необходимо для того, чтобы при занятости пути составом, ему присваивалось значение false, а как только путь освобождается, ему вновь присваивалось значение true.

Согласно построенной логике работы станции, получается результат моделирования, показанный на рисунке 3.

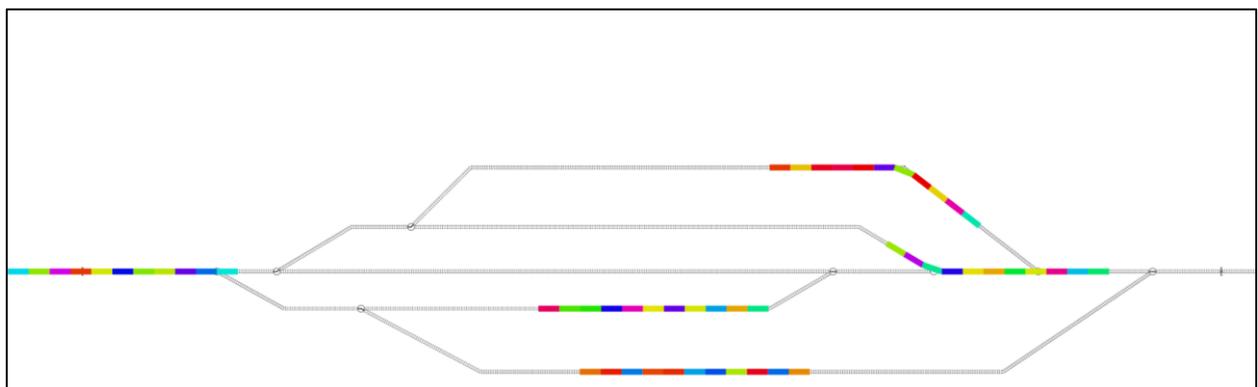


Рис. 3. Результат моделирования

Исходя из этого, исследователь, владеющий умением моделировать объекты железнодорожной инфраструктуры, может решить широкий круг задач – задать текущие и основополагающие параметры, оказывающие влияние на работу железнодорожной станции и участков (прибытие поезда (движение и занятость горловины)), проследование на пути (номер пути, проверка на занятость), проведение операций с составом (данные параметры могут быть гибко настроены в зависимости от типа поезда и операций), отправление поезда (проверка свободности перегона)) и т.п.

Заключение

Создание имитационных моделей – это трудоемкий процесс, требующий от исследователя максимума знаний в проектировании сложной железнодорожной сети, так как в любой транспортной системе всегда присутствует наличие случайных факторов, влияющих друг на друга и оказывающих воздействие на систему. Таким образом, понимание современных тенденций в области транспортного моделирования является основополагающим параметром для решения различных проблем [30].

Проведенное исследование показывает, что имитационное моделирование является эффективным средством описания и понимания работы объектов железнодорожной инфраструктуры среди существующих методов и способов моделирования.

Так для оценки работы объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта наиболее подходящим оказывается программный комплекс AnyLogic.

Использование AnyLogic дает возможность создавать, проектировать, оптимизировать эксплуатационную работу станций благодаря развитому интерфейсу программного комплекса.

Применение комплекса AnyLogic позволило решить следующие задачи, применительно для моделирования железнодорожной станции:

- представлена работа промежуточной станции, расположенной на однопутном участке железной дороги;
- рассмотрена работа станции, как элемента железнодорожного участка, влияющего на пропускную способность;
- решена задача проверки занятости путей;
- реализован выбор оптимального маршрута движения и остановки поезда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2018 г. № 877-р;
2. Козлов П.А., Вакуленко С.П., Козлова В.П. Железнодорожные узлы с позиций системного подхода / П.А. Козлов, С.П. Вакуленко, В.П. Козлова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (83). С. 124-130;
3. Осьминин А.Т., Баушев А.Н., Осьминина И.И. О возможности применения в управлении железнодорожными транспортными системами и перевозочным процессом искусственного интеллекта / А.Т. Осьминин, А.Н. Баушев, И.И. Осьминина // В сборнике: Инновационные технологии на железнодорожном транспорте. Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. Москва, 2022. С. 332-343;
4. Пазойский Ю.О., Абдуллаев И.С. Применение технологических мероприятий в проектировании объектов строительства железнодорожной инфраструктуры / Ю.О. Пазойский, И.С. Абдуллаев // В сборнике: Проблемы безопасности на транспорте. Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2-х частях. Под общей редакцией Ю.И. Кулаженко. Гомель, 2022. С. 143-146;
5. Железнодорожные станции и узлы: Учебник / Апатцев В.И.; под ред. Апатцева В.И. – Москва: УМЦ ЖДТ, 2014. – 855 с.: ISBN 978-5-89035-674-1;
6. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы): учебник / Н.В. Правдин, С.П. Вакуленко, А.К. Головнич и др.; под ред. Н.В. Правдина и С.П. Вакуленко. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по

образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 1086 с.: ISBN 978-5-89035-619-2;

7. Акулиничев В.М. Математические методы в эксплуатации железных дорог – М.: Транспорт. – 1981. – 223 с.;

8. Козлов П.А. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей / П.А. Козлов, В.С. Колокольников, В.И. Сорокин // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 3-8;

9. Козлов П.А. Структурно-функциональная оптимизация больших полигонов железнодорожного транспорта / П.А. Козлов, В.С. Колокольников // Транспорт Урала. 2018. №3 (58). С. 3-7;

10. Поттгофф Г. Учение о транспортных потоках / Поттгофф Г. Транспорт, Москва, 1975;

11. Казаков А.Л., Лемперт А.А., Жарков М.Л. Моделирование транспортно-пересадочных узлов на основе систем массового обслуживания – многофазных и с ВМАР-потокком / А.Л. Казаков, А.А. Лемперт, М.Л. Жарков // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4. С. 4-14;

12. Казаков А.Л., Павидис М.М., Жарков М.Л. Применение многофазных систем массового обслуживания для моделирования сортировочной станции / А.Л. Казаков, М.М. Павидис, М.Л. Жарков // Вестник УрГУПС. 2018. № 2 (38). С. 4–14;

13. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of railway stations based on queuing networks // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Т. 11. № 5;

14. Казаков А.Л., Маслов А.М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции / А.Л. Казаков, А.М. Маслов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 27-32;

15. Мамаев Э.А. Моделирование транспортных систем: выбор системы поддержки принятия решений / Э. А. Мамаев, А. И. Хашев // В сборнике: Международная научно-практическая конференция «Транспорт и логистика: инновационное развитие в условиях глобализации технологических и экономических связей». – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. – С. 172–176;

16. Ветрогон А.А., Крипак М.Н. Транспортное моделирование как инструмент для эффективного решения задач в области управления транспортными потоками / А.А. Ветрогон, М.Н. Крипак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 3. С. 82-91;

17. Супруновский А.В., Большаков Р.С. К вопросу о построении имитационных моделей перевозочных процессов в программной среде AnyLogic / А.В. Супруновский, Р.С. Большаков // Т-СОММ: телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 3. С. 31-35;

18. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 (+ CD) / Ю.Г. Карпов. – М.: БХВ-Петербург, 2016. – 400 с.;

19. Колокольников В.С. Структурно-функциональная оптимизация полигонов на сети железных дорог: диссертация доктора технических наук: 05.22.08 / Колокольников Виталий Сергеевич. – Екатеринбург, 2021. – 302 с.;

20. Миротин Л. Б. Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах / Л. Б. Миротин, В. А. Гудков, В. В. Зырянов; под редакцией Л. Б. Миротина. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2014. — 704 с. — ISBN 978-5-9912-0133-9;

21. Власов Д.Н. Транспортно-пересадочные узлы крупнейшего города (на примере Москвы) / Д.Н. Власов. – М. АСВ, 2009. – 96 с.;

22. Смехов А.А. Математические модели процессов грузовой работы / А.А. Смехов. – М.: Транспорт, 1982. – 256 с.;

23. Жарков М.Л., Парсюрлова П.А., Казаков А.Л. Моделирование работы станций и участков железнодорожной сети на основе изучения отклонений от графика движения / М.Л. Жарков, П.А. Парсюрлова, А.Л. Казаков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 6 (89). С. 23-31;

24. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Мокшин В.В., Костюхина Г.В., Шигаева Т.А. Комплексный подход к моделированию сложных систем в системе VRwin-Arena / И.М. Якимов,

- А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин, Г.В. Костюхина, Т.А. Шигаева // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 287-292;
25. Steffen Bangsow. Tecnomatix Plant Simulation. Modeling and Programming by Means of Examples / Steffen Bangsow – Switzeland: Springer International Publishing, 2015;
26. Jacques Ferber, Multi-Agent Systems: An Introduction to Artificial Intelligence, Addison-Wesley, 1999;
27. OpenTrack – Моделирование железнодорожных сетей [электронный ресурс] http://www.opentrack.ch/opentrack/downloads/OpenTrack.Info_RU.pdf (дата обращения: 27.01.2024);
28. Кощев А.А. Методика принятия решений при согласовании параметров структуры и технологии работы железнодорожных станций: диссертация кандидата технических наук: 05.22.08 / Кощев Антон Алексеевич. – Екатеринбург, 2021. – 155 с.;
29. Dudakova A.V., Goncharova N.Yu., Kazakov A.L., Bolshakov R.S. The modeling of technological processes of a railway marshalling yard using Any Logic // В сборнике: International Scientific and Practical Conference "Railway Transport and Technologies" (RTT-2021). Collection of conference materials. Volume 2624. USA, 2023. С. 040049;
30. Казаков А.Л., Упырь Р.Ю., Доможирова А.Д. Нейросетевой подход к изучению функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов / А.Л. Казаков, Р.Ю. Упырь, А.Д. Доможирова // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82. № 2. С. 158-167.

REFERENCES

1. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by Order of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2018 No. 877-r;
2. Kozlov P.A., Vakulenko S.P., Kozlova V.P. Railway junctions from the standpoint of a systematic approach / P.A. Kozlov, S.P. Vakulenko, V.P. Kozlova // Vestnik of the Rostov State Transport University. 2021. No. 3 (83). P. 124-130;
3. Osminin A.T., Baushev A.N., Osminina I.I. On the possibility of using artificial intelligence in the management of railway transport systems and the transportation process / A.T. Osminin, A.N. Baushev, I.I. Osminina // In the collection: Innovative technologies in railway transport. Collection of proceedings of a scientific and practical conference with international participation. Moscow, 2022. P. 332-343;
4. Pazoisky Yu.O., Abdullaev I.S. Application of technological measures in the design of railway infrastructure construction projects / Yu.O. Pazoisky, I.S. Abdullaev // In the collection: Problems of transport safety. Materials of the XII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 160th anniversary of the Belarusian Railway. In 2 parts. Under the general editorship of Yu.I. Kulazhenko. Gomel, 2022. P. 143-146;
5. Railway stations and junctions: Textbook / Apattsev V.I.; edited by Apattseva V.I. – Moscow: UMC ZhDT, 2014. – 855 p.: ISBN 978-5-89035-674-1;
6. Design of railway transport infrastructure (stations, railway and transport hubs): textbook / N.V. Pravdin, S.P. Vakulenko, A.K. Golovnich et al.; edited by N.V. Pravdin and S.P. Vakulenko. – M.: Federal State Budgetary Educational Institution «Training and Methodological Center for Education in Railway Transport», 2012. – 1086 p.: ISBN 978-5-89035-619-2;
7. Akulinichev V.M. Mathematical methods in the operation of railways - M.: Transport. – 1981. – 223 p.;
8. Kozlov P.A. Shared use of analytical methods and simulation models / P.A. Kozlov, V.S. Kolokolnikov, V.I. Sorokin // Transport of the Urals. 2016. No. 3 (50). P. 3-8;
9. Kozlov P.A. Structural functional optimization of large railway testing grounds / P.A. Kozlov, V.S. Kolokolnikov // Transport of the Urals. 2018. No. 3 (58). P. 3-7;
10. Pottgoff G. The doctrine of transport flows / Pottgoff G. Transport, Moscow, 1975;
11. Kazakov A.L., Lempert A.A., Zharkov M.L. Modeling transport transfer hubs on the basis of multiphase and BMAP-flow mass transit systems / A.L. Kazakov, A.A. Lempert, M.L. Zharkov //

Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2016. No. 4. P. 4-14;

12. Kazakov A.L., Pavidis M.M., Zharkov M.L. Multiphase systems of mass service in switchyard modelling / A.L. Kazakov, M.M. Pavidis, M.L. Zharkov // Herald of UrGUPS. 2018. No. 2 (38). P. 4–14;

13. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of railway stations based on queuing networks // Applied Sciences (Switzerland). 2021. T. 11. No. 5;

14. Kazakov A.L., Maslov A.M. Construction of a model of uneven traffic flow using the example of a railway freight station / A.L. Kazakov, A.M. Maslov // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2009. No. 3 (23). P. 27-32;

15. Mamaev E.A. Modeling of transport systems: choose of decision support / E. A. Mamaev, A. I. Khashev // In the collection: International scientific and practical conference «Transport and logistics: innovative development in the context of globalization of technological and economic connections». – Rostov-on-Don: RGUPS, 2017. – P. 172–176;

16. Vetrogon A.A., Kripak M.N. Transport modeling as a tool for efficient solutions of the traffic flow management problems / A.A. Vetrogon, M.N. Kripak // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2018. No. 3. P. 82-91;

17. Suprunovsky A.V., Bolshakov R.S. On the issue of building simulation models of transportation processes in the AnyLogic software environment / A.V. Suprunovsky, R.S. Bolshakov // T-COMM: telecommunications and transport. 2022. T. 16. No. 3. P. 31-35;

18. Karpov Yu.G. Simulation modeling of systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5 (+ CD) / Yu.G. Karpov. – M.: BHV-Petersburg, 2016. – 400 p.;

19. Kolokolnikov V.S. Structural and functional optimization of polygons on the railway network: dissertation of Doctor of Technical Sciences: 05.22.08 / Vitaly Sergeevich Kolokolnikov. – Ekaterinburg, 2021. – 302 p.;

20. Mirotin L. B. Management of cargo flows in transport and logistics systems / L. B. Mirotin, V. A. Gudkov, V. V. Zyryanov; edited by L. B. Mirotin. – Moscow: Hotline-Telecom, 2014. – 704 p. – ISBN 978-5-9912-0133-9;

21. Vlasov D.N. Transport hubs of the largest city (using the example of Moscow) / D.N. Vlasov. – M. DIA, 2009. – 96 p.;

22. Smekhov A.A. Mathematical models of cargo work processes / A.A. Smekhov. – M.: Transport, 1982. – 256 p.;

23. Zharkov M.L., Parsyurova P.A., Kazakov A.L. Modeling operation of railway stations and rail network sections based on studying train schedule deviations / M.L. Zharkov, P.A. Parsyurova, A.L. Kazakov // Vestnik of the Irkutsk State Technical University. 2014. No. 6 (89). P. 23-31;

24. Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Mokshin V.V., Kostyukhina G.V., Shigaeva T.A. An integrated approach to modeling complex systems in the BPwin-Arena system / I.M. Yakimov, A.P. Kirpichnikov, V.V. Mokshin, G.V. Kostyukhina, T.A. Shigaeva // Vestnik of the Kazan Technological University. 2014. T. 17. No. 6. P. 287-292;

25. Steffen Bangsow. Tecnomatix Plant Simulation. Modeling and Programming by Means of Examples / Steffen Bangsow – Switzerland: Springer International Publishing, 2015;

26. Jacques Ferber, Multi-Agent Systems: An Introduction to Artificial Intelligence, Addison-Wesley, 1999;

27. OpenTrack – Modeling of railway networks [electronic resource] http://www.opentrack.ch/opentrack/downloads/OpenTrack.Info_RU.pdf (access date: 27.01.2024);

28. Koshcheev A.A. Methodology for decision-making when coordinating the parameters of the structure and operating technology of railway stations: dissertation of a candidate of technical sciences: 05.22.08 / Koshcheev Anton Alekseevich. – Ekaterinburg, 2021. – 155 p.;

29. Dudakova A.V., Goncharova N.Yu., Kazakov A.L., Bolshakov R.S. The modeling of technological processes of a railway marshalling yard using Any Logic // In the collection: International Scientific and Practical Conference "Railway Transport and Technologies" (RTT-2021). Collection of conference materials. Volume 2624. USA, 2023. P. 040049;

30. Kazakov A.L., Upyr R.Yu., Domozhirova A.D. Neuronal network approach to study the

operation of shuttle-service trains / A.L. Kazakov, R.Yu. Ghoul, A.D. Dozhirova // Russian Railway Science Journal. 2023. Т. 82. No. 2. P. 158-167.

Информация об авторах

Власов Матвей Алексеевич – аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vlasovmatvey.2001@yandex.ru

Большаков Роман Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: bolshakov_rs@mail.ru

Information about the authors

Vlasov Matvey Alekseevich – postgraduate at the Subdepartment of «Operational Work Management», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vlasovmatvey.2001@yandex.ru

Bolshakov Roman Sergeevich – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Subdepartment of «Operational Work Management», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bolshakov_rs@mail.ru