



СПОСОБ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Тенденция цифровизации управленческой деятельности для повышения её качества и оперативности создаёт предпосылки для решения проблемы управления железнодорожными перевозками в режиме реального времени. Повышение требований структурных подразделений горнодобывающих предприятий к своевременности перевозок и стремление к сокращению транспортно-складских затрат в результате уменьшения размера транспортной партии приводят к усложнению как состава поездов, так и технологии их переработки на промышленных железнодорожных станциях. Становится критически актуальной задача оптимизации переработки поездов и перемещения отцепов вагонов на путях необщего пользования крупных горнодобывающих предприятий со сложной схемой путевого развития. В статье предлагается способ цифровизации железнодорожных перевозок, основанный на автоматизации формирования и выбора оптимальной последовательности маневровых операций как на отдельной промышленной железнодорожной станции, так и на путях необщего пользования в целом. Показано, что реализация разработанного способа возможна путём описания схемы путевого развития железнодорожной станции двухвершинным графом. Приводится краткий анализ применения известных видов графов для описания схем путевого развития железнодорожной станции. Разработан новый вид графа – двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и рёбрами. Показаны достоинства и недостатки применения простых, двухвершинных и ресурсных графов для оптимизации маневровых маршрутов, состоящих из нескольких маневровых полурейсов. Предлагается способ оптимизации маневровых передвижений на основе описания схемы путевого развития в виде двухвершинного графа, часть рёбер которого соединена под острым углом. Доказана возможность и эффективность цифровизации железнодорожных перевозок в результате автоматизированного построения оптимальных маневровых маршрутов с использованием алгоритма оптимизации двухвершинного графа. Разработанный способ позволяет вырабатывать оптимальные решения по управлению маневровой работой на железнодорожных станциях и предлагается к реализации в составе имитационных моделей и интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: цифровизация железнодорожных перевозок, пути необщего пользования, горнодобывающее предприятие, железнодорожная станция, транспортная сеть, технологическая операция, маневровый маршрут, маневровый полурейс, поезд, двухвершинный граф, биективная вершина графа, имитационная модель

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.

© Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н., 2025

Для цитирования

Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н. Способ цифровизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования горнодобывающих предприятий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 5-17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-5-17>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DIGITIZATION METHOD OF RAILWAY TRANSPORTATION FOR MINING ENTERPRISES

Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The trend towards digitalization of management activities to improve their quality and efficiency creates prerequisites for solving the problem of real-time management of railway transportation. Increasing requirements of structural subdivisions of mining enterprises to the timeliness of transportation and the desire to reduce transportation and storage costs as a result of reducing the size of the transportation lot lead to the complication of both the composition of trains and the technology of their processing at industrial railway stations. The task of optimizing the processing of trains and the movement of car uncouples on the public tracks of large mining enterprises with a complex scheme of track development becomes critically important. **Objectives.** The design of the method of digitalization of railway transportation is based on the automation of formation and selection of the optimal sequence of shunting operations both at a separate industrial railway station and on the railroad transportation of industrial enterprises. **Methods Applied.** It is shown that the realization of the developed method is possible by describing the scheme of track development of a railway station by a two-vertex graph. **Originality** is a new mathematical object - a two-vertex graph with separate bijective vertices and edges, which provides a correct representation of the railway station track scheme in the simulation model as a result of additional consideration of the angle between the graph edges. **Result.** The possibility and efficiency of digitalization of railway transportation as a result of automated construction of optimal shunting routes using the algorithm of two-vertex graph optimization is proved. This feature of the proposed graph allows to correctly describe railroad switches in the simulation model. In addition, using the proposed graph to provide an effective search for optimal (shortest) paths using known methods without the need to perform additional calculations for the correct modeling of train routes along the tracks of the railway station. **Practical Relevance.** The developed method allows working out optimal decisions on management of shunting work at railway stations and is offered for implementation as a part of simulation models and intelligent transportation systems.

Keywords: digitalization of railway transportation, non-public tracks, mining enterprise, railway station, transport network, technological operation, shunting route, shunting half-way, train, two-vertex graph, bijective vertex graph, simulation model

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.

For citation

Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Digitization Method of Railway Transportation for Mining Enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 5-17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-5-17>

Введение

Железнодорожный транспорт необщего пользования является важнейшим элементом промышленных производств. В частности, на крупных горнодобывающих предприятиях основные объёмы рудной массы, отходов производства, материалов, сырья, полуфабрикатов и готовой продукции перевозятся железнодорожным транспортом [1]. В настоящее время одним из основных факторов, ограничивающих повышение качества транспортного обслуживания структурных подразделений горнодобывающих предприятий, является расширение сортамента готовой продукции и, как следствие, усложнение структуры перевозок [2, 3]. Это связано с формированием поездов с большим числом групп вагонов разного назначения из-за принадлежности вагонов операторским компаниям и стремления грузовладельцев к уменьшению размера транспортно-грузовых партий, со снижением ритмичности отгрузки из-за ча-

стных изменений производственных программ [4, 5], а также с недостатками пропускной и перерабатывающей способностей железнодорожной инфраструктуры. Например, практика обработки вагонопотоков на промышленных железнодорожных станциях показывает значительное уменьшение коэффициента двоярных операций (выгрузка – погрузка) с вагонами из-за ограничений на погрузку порожних вагонов, принадлежащих разным собственникам.

Наблюдается увеличение дополнительных операций с вагонами в результате активного использования усреднительных складов и складов различных фракций готовой продукции или полуфабрикатов [6]. Кроме того, имеет место несвоевременная подготовка перевозочных документов, ошибки при размещении грузов в вагонах, рассогласованность решений по очередности подачи вагонов на грузовые фронты и т.д. Повышение требований структурных подразделений горнодобыва-

ющих предприятий к своевременности перевозок для сокращения транспортно-складских затрат усложняют принятие оперативных решений по управлению маневровой работой на промышленных железнодорожных станциях в условиях необходимости переработки поездов, состоящих из вагонов разных назначений [7].

Одним из основных структурных подразделений горнодобывающих предприятий являются обогатительные фабрики, поскольку затраты на их эксплуатацию и потери от простоя составляют, как правило, большую часть себестоимости продукции предприятия. Принятие неоптимальных управленческих решений в сложных условиях неравномерности и сложной структуры вагоно- и грузопотоков на железнодорожном транспорте приводит к возникновению простоев обогатительных фабрик и потерям у горнодобывающих предприятий в целом. Значимость принятия в оперативном режиме оптимальных решений по управлению железнодорожными перевозками горнодобывающих предприятий усиливается по мере усложнения условий их работы [8].

Одним из эффективных направлений решения перечисленных проблем является интеллектуализация и цифровизация управления внутризаводскими железнодорожными перевозками. Автоматизация процесса выработки решений по согласованной работе транспорта с остальными подразделениями горнодобывающего предприятия в режиме реального времени составляет основу цифровизации железнодорожных путей необщего пользования. В качестве инструмента реализации предлагаемого способа цифровизации в настоящем исследовании использована система имитационного моделирования. Предполагается, что модель будет выполнять имитацию железнодорожных перевозок, включая сложные маневровые операции на железнодорожных станциях. Имитационные прогоны в ускоренном режиме позволяют производить оценку принимаемых решений и выбирать наилучшую последовательность управленческих действий [9].

Исследования в области использования имитационных моделей в оперативном управлении железнодорожными перевозками на путях горнодобывающих предприятий [10] показали необходимость предварительного решения задачи низкоуровневой оптимизации и планирования маршрутов движения поездов и маневровых подач. С одной стороны, это позволяет снизить информационную нагрузку на диспетчеров, поскольку исключает необходимость принятия рутинных решений, поддающихся автоматизации. С другой стороны, модели оптимизации маршрутов позволяют реализовать с их использованием более сложные методы и алгоритмы прогнозирования оперативной ситуации и оптимизации технологии работы железнодорожного транспорта.

Проблема управления железнодорожными перевозками в режиме реального времени в настоящее время решается различными способами: корректировкой скорости движения поездов [11], приоритетности их движения [12] или времени выполнения маневровых операций [13]. Основным ограничением выполнения таких

корректировок является пропускная способность железнодорожной инфраструктуры, главным образом путей и стрелочных переводов. Поддержка оперативных управленческих решений с использованием информационных систем и имитационных моделей основана на описании схем путевого развития железнодорожных станций в форме графа. Вершинами графа описываются отдельные стрелочные переводы, группы стрелок или целые станции, рёбрами графа – железнодорожные пути, межстанционные перегоны.

Использование традиционных методик маршрутизации перевозок железнодорожной станции на основе графов ограничено рядом условий, которые определяют маршрут движения поезда. Например, если маршрут состоит из нескольких маневровых полурейсов, то необходимо менять направление движения поезда. На порядок выполнения маневровых полурейсов также оказывает влияние их вид – осаживанием, толчками, групповыми толчками [14]. Перечисленные факторы определяют способ формирования графа железнодорожной станции. Исследование существующих способов описания схем путевого развития железнодорожных станций и узлов в составе как имитационных, так и математических моделей позволило выявить три способа представления на графе железнодорожных стрелочных переводов: одной вершиной, двумя вершинами или рёбрами графа.

Первый, наиболее распространённый способ предполагает описание железнодорожной инфраструктуры простым неориентированным графом [15]. Недостатком способа является невозможность его использования для программного расчёта маршрута, состоящего из нескольких полурейсов с угловыми заездами для смены направления движения поезда. Другими словами, такой граф не учитывает невозможность поворота поезда на стрелке из-за того, что происходит формирование маршрута по соседним рёбрам графа, образующим острый угол друг с другом [16].

Второй способ основан на описании стрелочного перевода двумя соединёнными между собой вершинами графа. Рёбрами графа являются железнодорожные пути, которые соединяют одну пару вершин с другой парой и образуют двухвершинный граф [17, 18]. В этих работах двухвершинный граф впервые предложено использовать при решении относительно простой задачи пропуска транзитных поездов по станции без выполнения сложных маневровых операций. Достоинством данного способа является исключение (блокирование) угловых заездов поезда [19–21], недостатком – формирование маршрута движения поезда в одном направлении.

Третий способ основан на использовании так называемого «рёберного графа» [22], идея которого заключается в описании рёбер исходного графа вершинами рёберного графа. Тогда рёбра рёберного графа отображают связи между рёбрами исходного графа. Рёберный граф потенциально может использоваться при формировании маневрового маршрута, состоящего из нескольких полурейсов [23]. Однако использование

рёберного графа для описания схемы путевого развития требует сложных вычислений по переносу оценок рёбер исходного графа на рёберный граф.

Эксперименты по использованию рассмотренных известных способов для описания схем путевого развития железнодорожных станций в составе имитационных моделей показали их неэффективность. Это связано с тем, что способы не являются универсальными и, как следствие, их использование требует выполнения дополнительных вычислений и преобразований графа для учёта различных вариантов схем путевого развития станций. Выполнение таких вычислений приводит как к усложнению состава самой модели, так и к снижению её вычислительной эффективности, что не позволяет использовать имитационные модели в режиме реального времени для решения сложных управленческих задач.

Для устранения данных ограничений авторами предложен новый математический объект для описания путевого развития железнодорожных станций – двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и рёбрами. Особенностью предложенного двухвершинного графа является его совместимость со всеми известными методами поиска кратчайших путей на графе, использование которых позволяет автоматизировать работу по планированию сложных маршрутов движения поездов в имитационной модели. В состав таких сложных маршрутов может входить неограниченное число маневровых полурейсов. Предлагаемый двухвершинный граф обеспечивает «бесшовное» соединение полурейсов в составе маршрута при помощи двойной вершины графа, связывающей два ребра, расположенные под острым углом друг относительно друга.

Цель исследований

Целью исследования является разработка способа цифровизации работы промышленных железнодорожных станций со сложной схемой путевого развития и маневровой работой на основе использования

имитационных моделей и нового алгоритма маршрутизации на двухвершинном графе с раздельными биективными вершинами и рёбрами, описывающего схему путевого развития станции.

Особенностью нового предлагаемого математического объекта – двухвершинного графа с раздельными биективными вершинами и рёбрами – является учёт дополнительного ограничения на величину угла между соседними рёбрами. Расположение подмножества рёбер графа под острым углом друг относительно друга соответствует конструкции стрелочного перевода. Эти ограничения не позволяют эффективно использовать известные виды графов в составе имитационных моделей для оптимизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования промышленных и горнодобывающих предприятий.

Материалы и методы

Исследование существующих и предлагаемого способов описания схем путевого развития железнодорожных станций в имитационных моделях проводилось на примере промышленной железнодорожной станции крупного горнодобывающего предприятия (рис. 1). Основные параметры схемы путевого развития моделируемой станции представлены в табл. 1.

В качестве программного инструмента для построения имитационной модели использовалась программная среда AnyLogic [24–26]. Исходная схема путевого развития импортирована в имитационную модель с использованием открытых данных геоинформационной системы в формате Shape-файла. Такой способ обеспечивает поддержку реального масштаба и использование в модели фактических длин железнодорожных путей для принятого в AnyLogic способа автоматического расчёта времени движения поездов с заданной скоростью.

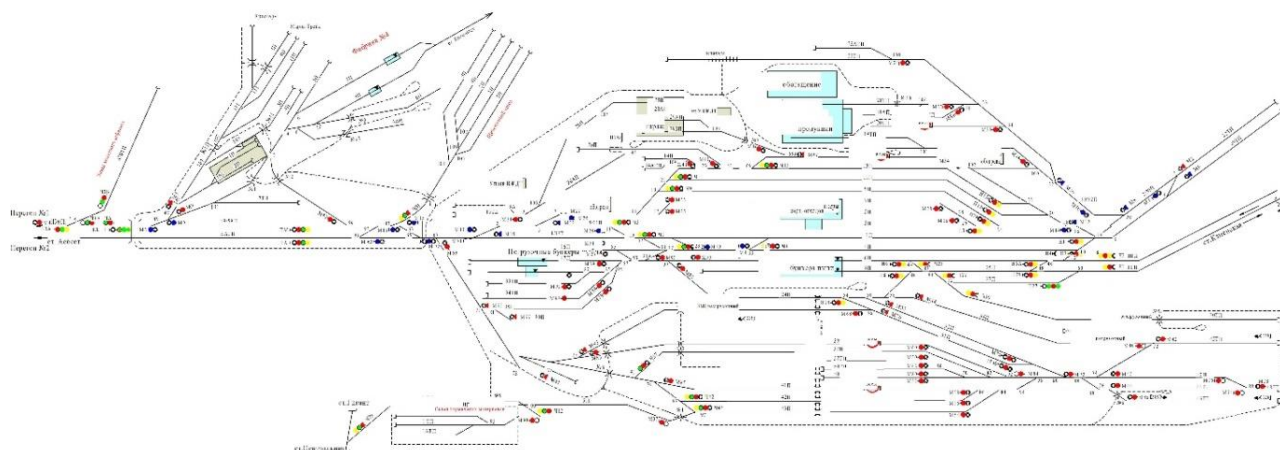


Рис. 1. Схема путевого развития моделируемой промышленной железнодорожной станции горнодобывающего предприятия

Fig. 1. Track plan of the modeled industrial railway station in the mining enterprise

Таблица 1. Основные параметры схемы путевого развития моделируемой промышленной железнодорожной станции

Table 1. Track plan main parameters for simulated industrial railway station

Элемент путевого развития	Количество
Приемо-отправочные пути	7
Вытяжные пути	8
Погрузо-выгрузочные пути	44
Соединительные пути	19
Примыкающие перегоны	4
Стрелочные переводы	115
Глухое пересечение	1

Для решения задач низкоуровневой оптимизации маневровых передвижений используется быстрый эвристический «sweep algorithm» [19], который позволяет находить множество всех оптимальных путей на графе от начальной заданной вершины до остальных вершин графа или возможные маршруты движения поезда по железнодорожной станции или в транспортном узле. Идея алгоритма основана на последовательной проверке для всех рёбер, исходящих из всех i -х вершин графа следующего условия:

$$L_{i=0,i} < L_{i=0,\lambda_i}, \quad (1)$$

где $L_{i=0,i}$, $L_{i=0,\lambda_i}$ – длины рёбер графа соответственно от начальной вершины ребра $i=0$ до последующей i -й и предшествующей λ_i .

Вершина i включается в состав оптимального пути при выполнении условия (1).

Имитационная модель построена с использованием дискретно-событийного и агентного подходов в рамках одной модели [26]. Такое решение позволило реализовать в составе имитационной модели алгоритм оптимизации графа, а также алгоритмы управления движением поездов и маневровых составов без усложнения процессных диаграмм, составляющих основу дискретно-событийных имитационных моделей.

Результаты исследования

Результаты проведённых экспериментов на построенной имитационной модели показали принципиальные особенности поиска оптимального манев-

рового маршрута в зависимости от вида графа, используемого для описания схемы путевого развития в составе имитационных моделей.

Простой направленный граф. Пусть $G(P, L)$ – простой, неориентированный, не имеющий петель граф. Например, на рис. 1 показана схема стрелочного перевода, представленного в форме неориентированного графа G . Рёбра графа характеризуются начальной P_i , конечной P_j вершинами и длиной L_{ij} . Движение поезда из вершины (1) в вершину (4) выполняется по маршруту $R1$, который состоит двух полуурейсов, рёбра (1; 2) и (2; 4) образуют острый угол друг с другом. Первый полуурейс выполняется по маршруту {1; 2; 3}. Затем происходит изменение направления движения и поезд движется по маршруту {3; 2; 4}. В таблице оптимальных маршрутов (рис. 2) величина λ_i равна номеру вершины, которая предшествует i -й, а $L_{\lambda_i,i}$ – длина ребра между вершинами λ_i и i .

Поиск оптимального маршрута из вершины (1) в вершину (4) с использованием простого неориентированного графа приведёт к получению ошибочного маршрута движения поезда с поворотом на стрелочном переводе из-за расположения рёбер (1; 2) и (2; 4) под острым углом относительно друг друга. При движении локомотива или маневровой подачи из вершины (1) в вершину (2) необходимо на практике совершить «угловой заезд» – маневровую операцию с вытягиванием на путь (2; 3) с последующим изменением направления движения в сторону вершины (4). Таким образом, использование графа, в котором не учитывается ограничение на включение в оптимальный путь двух соседних рёбер, расположенных под острым углом относительно друг друга, не позволяет планировать корректные маршруты движения локомотивов и маневровых составов в составе имитационных моделей и информационных систем. В таком случае необходимо либо преобразовывать исходный граф, описывающий схему путевого развития, с последующим использованием известных методов поиска кратчайших путей на таком преобразованном графе, либо разрабатывать новый алгоритм поиска оптимальных путей, учитывающий ограничение на величину угла между ребрами графа. В данном исследовании мы выбрали первый вариант, позволяющий использовать для оптимизации графа любые известные методы.

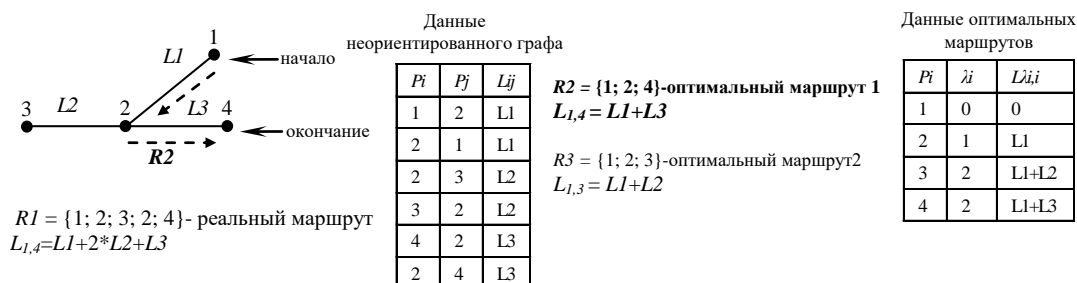


Рис. 2. Традиционный способ описания железнодорожного стрелочного перевода в виде части графа маршрутизации

Fig. 2. Traditional way of representing a railway switch as a part of the routing graph

Двухвершинный граф с соединёнными биективными вершинами. Двухвершинный граф $D(G, P^0)$ состоит из обычного графа G и его биективными (дублирующими) отображениями вершин P^0 [18]. У каждой вершины есть один дубликат, её биективное отображение (вершина). Вершина и её биективная вершина образуют пару без ребра между ними, такая пара называется соединёнными вершинами. Одна пара вершин соединена с другой парой ребром графа (рис. 3).

На рис. 3 показан пример двухвершинного графа с соединёнными биективными вершинами. Рёбра графа характеризуются начальной парой вершин P_i и P_i^0 , конечной парой вершин P_j , P_j^0 и длиной L_{ij} . Движение поезда из вершины (1) в вершину (4) выполняется по маршруту $R1$, который состоит из двух полурейсов, а рёбра $(1^0; 2^0)$ и $(2; 4)$ образуют острый угол друг с другом. Первый полурейс выполняется по маршруту $\{5^0; 1^0; 2^0; 3^0\}$. Затем происходит изменение направления движения и поезд движется по маршруту $\{3; 2; 4; 6\}$ (второй полурейс). Блокирование поворота поезда осуществляется выполнением «правила пути» – поезд до начала движения должен переместиться в вершину – дубликат (биективную вершину) P_i , P_i^0 , затем начать своё движение по ребру L_{ij} [17].

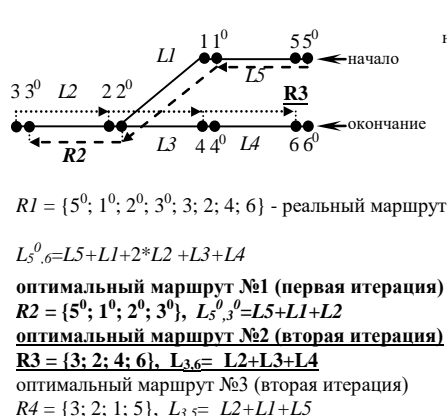
Использование данного правила позволит отслеживать направление движения поезда и исключить (блокировать) его угловой заезд при формировании маршрута. Например, поезд, который начинает движение в вершине (1), должен двигаться вправо по направлению к биективной вершине (1^0), в то время как поезд, который начинает движение в вершине (1^0), должен двигаться влево по направлению к вершине (1). Найденный маршрут второго полурейса $\{3; 2; 4; 6\}$ из вершины (3) в вершину (6) не входит в состав оптимального маршрута $R2$. Поэтому для изменения направления движения поезда и его движения по второму полурейсу необходимо выполнить дополнительную итерацию по поиску оптимального пути от начальной вершины (3).

Рассмотрим вариант определения оптимального маршрута, в состав которого входит железнодорожный

путь, используемый для смены направления движения поезда. Предположим, что вершина (3) идентифицирована как место остановки поезда для смены направления его движения (рис. 4). В данном варианте вершина (3) является начальной, а её биективная вершина (3^0) – конечной. Поиск оптимальных маршрутов движения поезда происходит параллельно из вершин (5^0) и (3). Из вершины (5^0) до вершины (3^0) для первого полурейса, из вершины (3) до вершины (6) для второго полурейса. Полученные полурейсы складываются в маневровый маршрут.

Рёберный граф. Пусть $G(P, L)$ – неориентированный, не имеющий петель простой граф, тогда его рёберный граф – $L(G)$. Рёбра графа характеризуются начальной P_i , конечной P_j вершинами и длиной L_{ij} [9]. Рёберный граф $L(G)$ – это преобразованный простой граф таким образом, что любая вершина графа $L(G)$ представляет ребро графа G , и две вершины графа $L(G)$ соединены ребром в том случае, если соответствующие рёбра графа G имеют общую вершину. Движение поезда из вершины (4,1) в вершину (2,1) выполняется по маршруту $R1$, который состоит из двух полурейсов (рис. 5). Первый полурейс выполняется по маршруту $\{(4,1); (1,3)\}$. Затем происходит изменение направления движения и поезд движется по маршруту $\{(1,3); (2,1)\}$.

Основными ограничениями использования рёберного графа при описании железнодорожной станции является невозможность корректного определения длин ребер, расположенных под острым углом относительно друг друга. На рис. 5 показаны оптимальные маршруты на рёберном графе $L(G)$ при условии, если $L5 < L1 + L3$ или $L5 > L1 + L3$. В первом случае оптимальный маршрут $R2$ содержит рёбра графа G , которые расположены под острым углом друг относительно друга. Рёберный граф потенциально может использоваться при формировании маневрового маршрута, состоящего из нескольких полурейсов при соблюдении условия $L5 > L1 + L3$. В данном случае в состав оптимального маршрута $R3$ входит железнодорожный путь, используемый для смены направления движения поезда.



Данные неориентированного графа

P_i	P_j	L_{ij}
1	5	L5
5 ⁰	1 ⁰	L5
2	1	L1
1 ⁰	2 ⁰	L1
3	2	L2
2 ⁰	3 ⁰	L2
2	4	L3
4 ⁰	2 ⁰	L3
4	6	L4
6 ⁰	4 ⁰	L4

Данные оптимальных маршрутов первая итерация (нач. верш. 5⁰)

P_i	i_i	$L_{i,i}$
1	1	нет маршрута
1 ⁰	5 ⁰	L5
2	2	нет маршрута
2 ⁰	1 ⁰	L5+L1
3	3	нет маршрута
3 ⁰	2 ⁰	L5+L1+L2
4	4	нет маршрута
4 ⁰	4 ⁰	нет маршрута
5	5	нет маршрута
5 ⁰	0	0
6	6	нет маршрута
6 ⁰	6 ⁰	нет маршрута

оптимальный маршрут

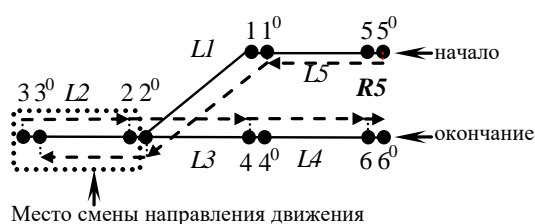
$$R0 = R2 + R3 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0\} + \{3; 2; 4; 6\}, L_{5^0,6} = L5 + L1 + L2 + L2 + L3 + L4$$

Данные оптимальных маршрутов вторая итерация (нач. верш. 3)

P_i	i_i	$L_{i,i}$
1	2	L2+L1
1 ⁰	1 ⁰	нет маршрута
2	3	L2
2 ⁰	2 ⁰	нет маршрута
3	0	0
3 ⁰	3 ⁰	нет маршрута
4	2	L2+L3
4 ⁰	4 ⁰	нет маршрута
5	1	L2+L1+L5
5 ⁰	5 ⁰	нет маршрута
6	4	L2+L3+L4
6 ⁰	6 ⁰	нет маршрута

Рис. 3. Двухвершинный граф с соединёнными биективными вершинами

Fig. 3. Two-vertex graph with connected bijective vertices



$R1 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0; 3; 2; 4; 6\}$ - реальный маршрут

$$L_{5^0,6^0} = L5 + L1 + 2 * L2 + L3 + L4$$

$R2 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0\}$ - оптимальный маршрут для маневрового полурея №1

$$L_{5^0,3^0} = L5 + L1 + L2$$

$R3 = \{5^0; 1^0; 1\}$ - оптимальный маршрут для маневрового полурея №2

$$L_{3,6^0} = L2 + L3 + L4$$

Данные неориентированного графа

P_i	P_j	L_{ij}
1	5	L5
5 ⁰	1 ⁰	L5
2	1	L1
1 ⁰	2 ⁰	L1
3	2	L2
2 ⁰	3 ⁰	L2
2	4	L3
4 ⁰	2 ⁰	L3
4	6	L4
6 ⁰	4 ⁰	L4

Данные оптимальных маршрутов

P_i	λ_i	L_{ii}
1	2	$L5 + L1 + 2 * L2 + L1$
1 ⁰	5 ⁰	L5
2	3	$L5 + L1 + 2 * L2$
2 ⁰	1 ⁰	$L5 + L1$
3	3 ⁰	$L5 + L1 + L2 + 0$
3 ⁰	2 ⁰	$L5 + L1 + L2$
4	2	$L5 + L1 + 2 * L2 + L3$
4 ⁰	4	0
5	1	$L5 + L1 + 2 * L2 + L5$
5 ⁰	0	0
6	4	$L5 + L1 + 2 * L2 + L3 + L4$

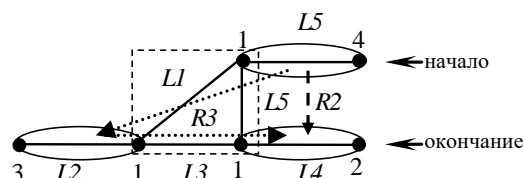
$R5 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0; 3; 2; 4; 6\}$

- оптимальный маршрут

$$L_{5^0,6^0} = L5 + L1 + 2 * L2 + L3 + L4$$

Рис. 4. Маршруты маневрового состава на двухвершинном графе с начальными вершинами (5⁰) и (3)

Fig. 4. Shunting train routes on a two-vertex graph with initial vertices (5⁰) and (3)



● вершина простого графа G
 ○ вершина рёберного графа $L(G)$

$R1 = \{(4,1); (1,3); (1,2)\}$ - реальный маршрут

$$L_{(4,1),(2,1)} = L1 + L3$$

$R2 = \{(4,1); (2,1)\}$ - оптимальный маршрут при условии $L5 < L1 + L3$

$$L_{(4,1),(2,1)} = L5$$

$R3 = R1 = \{(4,1); (1,3); (2,1)\}$ - оптимальный маршрут при условии

$$L5 > L1 + L3$$

$$L_{(4,1),(2,1)} = L1 + L3$$

Данные графа

P_i	P_j	L_{ij}
(4,1)	(1,3)	L1
(1,3)	(4,1)	L1
(1,3)	(2,1)	L3
(2,1)	(1,3)	L3
(4,1)	(2,1)	L5
(2,1)	(4,1)	L5

Данные оптимальных маршрутов при условии $L5 < L1 + L3$

P_i	λ_i	L_{ii}
(4,1)	0	0
(1,3)	(4,1)	L1
(2,1)	(4,1)	L5

Данные оптимальных маршрутов при условии $L5 > L1 + L3$

P_i	λ_i	L_{ii}
(4,1)	0	0
(1,3)	(4,1)	L1
(2,1)	(1,3)	$L1 + L3$

Рис. 5. Представление железнодорожного стрелочного перевода в виде дуг рёберного графа

Fig. 5. Representation of railroad switches as arcs of an edge graph

Ограничения существующих способов формирования графа железнодорожной станции. Проведённый анализ способов формирования графа железнодорожной станции показывает различную адаптивность их использования при оптимизации маневровых передвижений на железнодорожной станции. Потенциал использования простого графа при формировании маневрового маршрута ограничен наличием рёбер, образующих острый угол друг с другом, что приводит к формированию маневровых маршрутов, которые противоречат технологии работы железнодорожной станции.

Попытки учесть в имитационных моделях особенности этой технологии с использованием двухвершинного графа с соединёнными биактивными вершинами позволили исключить разворот поезда на стрелочном переводе. С другой стороны, блокирование разворота поезда привело к формированию в мо-

дели только простых однонаправленных маршрутов, что не позволяет корректно использовать методы поиска оптимальных путей на графах.

В рёберном графе железнодорожный стрелочный перевод представляется тремя вершинами, соединёнными между собой тремя условными рёбрами, показывающими связи между ребрами исходного графа. Корректное движение поезда в модели по стрелочному переводу, описанному реберным графом, возможно при соблюдении дополнительного условия, учёт которого усложняет модель и снижает её эффективность.

Вычислительная эффективность имитационных моделей, в которых применяются проанализированные способы описания схемы путевого развития, снижается по мере усложнения как схемы путевого развития, так и вариантов маневровых операций. Это связано с увеличением алгоритмической сложности использования методов оптимизации из-за необходи-

мости соблюдения дополнительных условий, отслеживания направлений движения и длин поезда, а также выполнения расчетов по преобразованию оценок ребер исходного графа.

Предлагаемый двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и рёбрами. Разработанный нами способ представления схемы путевого развития железнодорожной станции в составе имитационной модели основан на использовании двухвершинного графа раздельными биективными вершинами и рёбрами. Такой граф позволяет находить кратчайшие пути с дополнительным ограничением на углы между ребрами с использованием любых известных методов без необходимости выполнения промежуточных преобразований в процессе оптимизации. Применительно к технологии работы железнодорожного транспорта предлагаемый граф позволяет рассчитывать оптимальные маневровые маршруты, состоящие из нескольких полурайсов (рис. 6).

Основная идея предлагаемого графа заключается в построении неориентированного, не имеющего петель двухвершинного графа $D(G, P^0, L^0)$ со множеством биективных отображений вершин P^0 и рёбер L^0 .

Каждому стрелочному переводу ставится в соответствие две вершины графа. Вершина (2) и её биективная вершина (2^0) образуют раздельную пару вершин без ребра между ними. Железнодорожные пути, которые образуют острый угол друг с другом, отображаются двумя рёбрами графа. Ребро $L1$ и его биективное отображение $L1^0$ образуют пару с общей биективной вершиной (2^0), а ребро $L3$ и его биективное отображение $L3^0$ образуют пару с общей вершиной (2). Железнодорожные пути, которые не образуют острый угол с другими путями, отображаются ребром и его тремя биективными отображениями таким образом, чтобы вершины графа и их биективные отображения не были соединены рёбрами. Ребро $L2$ соединяет вершины (2) и (3), биективными рёбрами являются ребра ($2^0, 3^0$), ($2^0, 3$) и ($2, 3^0$), в состав ограничивающих вершин которых входит биективная вершина графа [14]. В результате описанного одно-

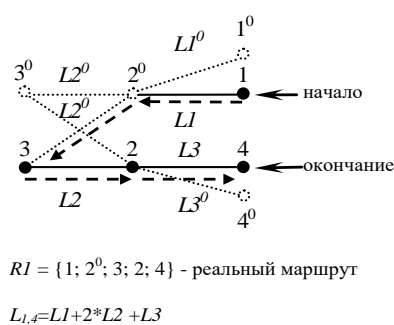
кратного преобразования исходного графа путевого развития появляется возможность поиска кратчайшего пути (маршруты) известными методами. В примере таким маршрутом будет $R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$.

Предлагаемое представление путевого развития железнодорожной станции позволяет отказаться от использования в имитационной модели дополнительных правил и исключений для отслеживания направления движения поезда. Направление движения маневрового состава в модели определяется автоматически, на основании сформированного оптимального маневрового маршрута [14].

Полученные результаты и их обсуждение

Оценка работоспособности алгоритма поиска оптимальных путей на предлагаемом двухвершинном графе с раздельными биективными вершинами и рёбрами проводилась в два этапа. На первом этапе рассмотрен пример движения поезда по путям условной железнодорожной станции с простой схемой путевого развития (рис. 7). В примере решалась задача проверки возможности поиска оптимального и корректного маршрута движения поезда с пути №1 на путь №3. Кроме того, выполнено сравнение эффективности предлагаемого способа описания схемы путевого развития с тремя известными: простым и рёберным графами, двухвершинным графом с соединёнными биективными вершинами.

Движение поезда с пути №1 на путь №3 выполняется по маршруту, который состоит из двух полурайсов, а ребра (1; 3) и (2; 3) образуют острый угол друг с другом. Результатом использования алгоритма маршрутизации на простом графе является маршрут $\{(2; 3), (1; 3), (4; 1)\}$, в состав которого входят последовательно расположенные пути (2; 3) и (1; 3), образующие острый угол друг с другом. Такой маршрут нарушает требование технологии работы железнодорожного транспорта, поскольку поезд не заезжает на путь (3, 5).



Данные графа		
P_i	P_j	L_{ij}
1	2^0	L1
2^0	1	L1
1^0	2^0	L1
2^0	1^0	L1
3^0	2^0	L2
2^0	3^0	L2
2^0	3	L2
3	2^0	L2
3^0	2	L2
2	3^0	L2
3	2	L2
2	3	L2
2	4^0	L3
4^0	2	L3
2	4	L3
4	2	L3

Данные оптимальных маршрутов		
P_i	λ_i	L_{λ_i}
1^0	0	0
1	0	0
2	3	$L1 + 2*L2$
2^0	1	L1
3	2^0	$L1 + L2$
3^0	2	$L1 + L2$
4	2	$L1 + 2*L2 + L3$
4^0	2	$L1 + 2*L2 + L3$

$R2 = R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$ – оптимальный маршрут №1
 $L1,4 = L1 + 2*L2 + L3$

$R3 = \{1; 2^0; 3^0\}$ – оптимальный маршрут №2, $L1,4 = L1 + L2$

$R4 = \{1; 2^0; 3; 2; 4^0\}$ – оптимальный маршрут №3, $L1,4 = L1 + 2*L2 + L3$

Рис. 6. Предлагаемый двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и ребрами

Fig. 6. Proposed two-vertex graph with disjoint bijective vertices and edges

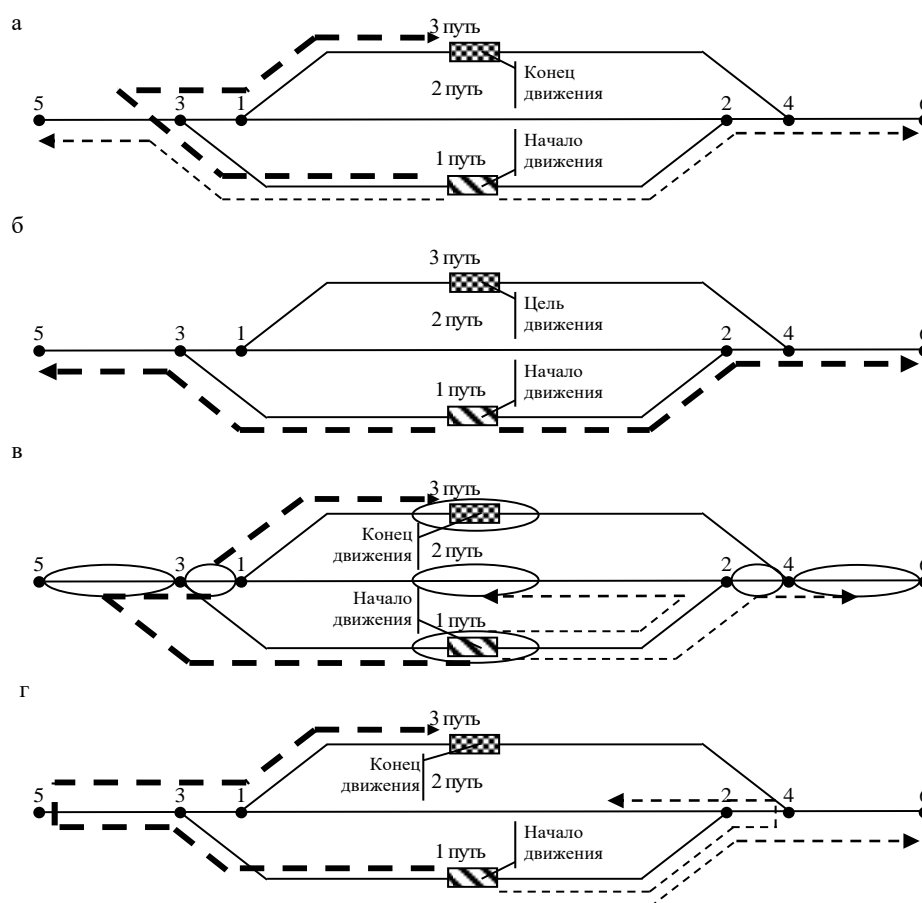


Рис. 7. Варианты оптимальных маршрутов движения поезда по условной железнодорожной станции:

а – простой граф; б – двухвершинный граф с соединенными биективными вершинами; в – рёберный граф; г – разработанный двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и рёбрами

Fig. 7. Variants of optimal routes of train movement along the conditional railway station: а is simple graph; б is two-vertex graph with connected bijective vertices; в is edge graph; г is developed two-vertex graph with separated bijective vertices and edges

Маршруты, сформированные с использованием двухвершинного графа с соседними биективными вершинами, определяются в имитационной модели на AnyLogic согласно «правилу пути» [17], которое блокирует смену направления поезда и заезд на путь (1, 3). В результате определения оптимальных путей получаем, что путь назначения (путь №3) не входит в состав оптимального маршрута, что некорректно отображает реальную работу станции.

Результатом использования алгоритма маршрутизации на рёберном графе является маршрут $\{(2; 3), (3; 5), (1; 3), (4; 1)\}$ при выполнении условия наибольшей оценки ребра, связывающего железнодорожные пути (2; 3) и (1; 3). Согласно технологии, поезд при смене направления движения на пути (3; 5) заезжает на этот путь, останавливается и далее начинает движение в обратном направлении. Однако путь (3; 5) добавляется только один раз в оптимальный маршрут, рассчитанный с использованием рёберного графа, хотя по технологии поезд должен двигаться по пути (3; 5) два раза – сначала в прямом направлении, затем в обратном.

Поиск оптимальных путей с использованием разработанного двухвершинного графа с раздельными биективными вершинами и рёбрами показывает корректный и лучший результат. Направление движения поезда определяется автоматически в зависимости от сформированного оптимального маневрового маршрута $\{(2; 3), (3; 5), (3; 5), (1; 3), (4; 1)\}$ [14]. Оптимальный маршрут включает в себя пути, не образующие острый угол с соседними путями, а также обеспечивает двойное последовательное прохождение поездом в модели путей, необходимых для смены направления.

На втором этапе исследования проводилась оценка эффективности использования разработанного двухвершинного графа с раздельными биективными вершинами и рёбрами в составе имитационной модели работы промышленной железнодорожной станции крупного горнодобывающего предприятия. Результаты проведённых экспериментов на построенной имитационной модели показали принципиальные особенности формирования разработанного двухвер-

шинного графа и маршрута поезда. Выявлены два варианта формирования транспортной сети железнодорожной станции в зависимости от расположения соседних биективных вершин – с симметричным расположением соседних биективных вершин относительно друг друга (рис. 8) и асимметричным расположением таких вершин (рис. 9).

Результаты проведённых экспериментов на имитационной модели показывают гибкость и универсаль-

ность использования разработанного двухвершинного графа при решении задачи оптимизации перевозок на железнодорожной станции для всех возможных схем путевого развития. Результатом применения эвристического алгоритма поиска оптимальных путей с использованием разработанного двухвершинного графа являются все возможные корректные варианты маршрутов движения поезда (рис. 10) [14].

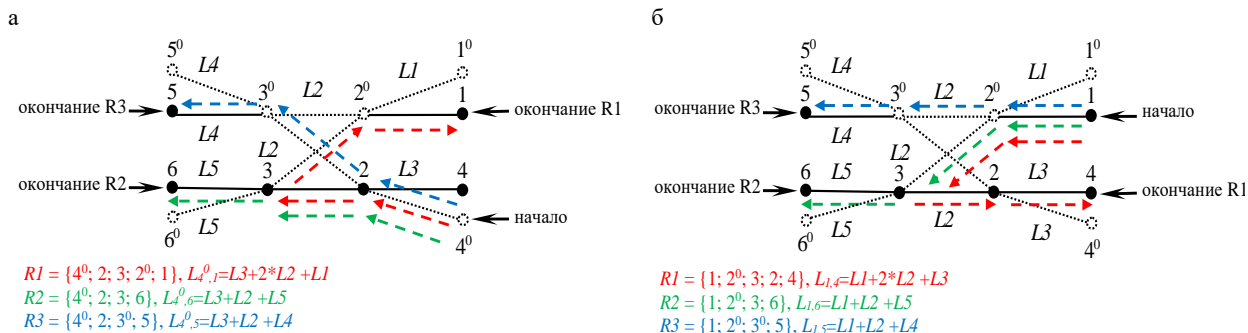


Рис. 8 Схемы маневровых маршрутов при симметричном расположении биективных вершин в разработанном двухвершинном графе: а – начало движения поезда – биективная вершина (4^0); б – начало движения поезда – вершина (1)

Fig. 8. Diagrams of shunting routes at symmetric arrangement of bijective vertices in the developed two-vertex graph: а is train movement start – bijective vertex (4^0); б is train movement start - vertex (1)

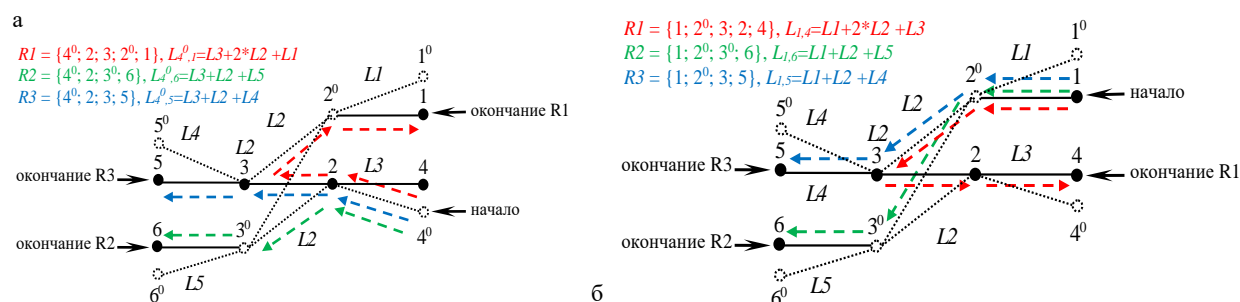
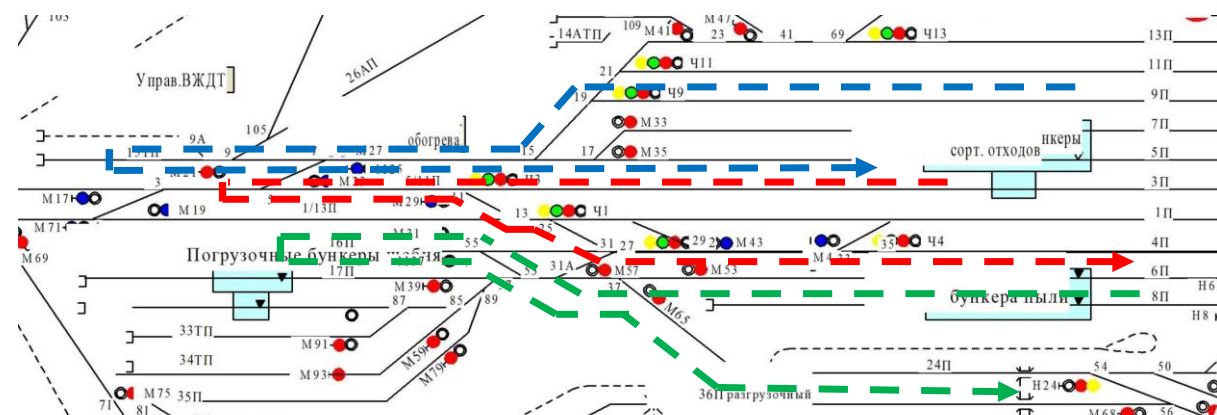


Рис. 9. Схемы маневровых маршрутов при асимметричном расположении биективных вершин в разработанном двухвершинном графе: а – начало движения поезда – биективная вершина (4^0); б – начало движения поезда – вершина (1)

Fig. 9. Diagrams of shunting routes at asymmetric arrangement of bijective vertices in the developed two-vertex graph: а is train movement start – bijective vertex (4^0); б is train movement start – vertex (1)



Оценка сокращения затрат времени диспетчером на планирование маневровых перемещений по железнодорожной станции в случае применения предлагаемого двухвершинного графа и алгоритма его оптимизации составляет до 25–30%. Кроме этого эффекта, появляется возможность использовать результаты оптимизации для генерации вариантов управленческих решений с последующей оценкой их результативности и выбора наилучшего варианта.

Заключение

Автоматизация процесса выработки решений по согласованной работе транспорта с остальными подразделениями горнодобывающего предприятия в режиме реального времени составляет основу цифровизации железнодорожных путей необщего пользования. В настоящее время известно множество алгоритмов решения задачи маршрутизации на графах, которые активно применяются как при планировании, так и при управлении перевозками в режиме реального времени. Адаптивность таких алгоритмов достигается использованием различных способов представления железнодорожной инфраструктуры в виде графов.

Выполненный анализ существующих методов формирования графов для железнодорожных перевозок позволяет говорить о преимуществах специализированных двухвершинных и рёберных графов железнодорожной станции. Однако потенциал использования представленных графов при цифровизации железнодорожных перевозок снижается по мере усложнения схем путевого развития и увеличения вариантов последовательностей маневровых операций при планировании работы железнодорожной станции. Это связано с увеличением алгоритмической сложности использования методов оптимизации графов из-за необходимости соблюдения дополнительных условий, ограничений и исключений, связанных с направлением движения и длиной поездов в имитационной модели станции.

Предложенный в работе новый способ формирования двухвершинного графа расширяет адаптивность использования методов оптимизации в имитационных моделях железнодорожных станций. Способ обеспечивает моделирование движения поездов по длинным маршрутам между любыми двумя железнодорожными путями без необходимости использования дополнительных правил и исключений, что увеличивает вычислительную эффективность имитационной модели и делает её пригодной для использования в режиме реального времени. Результаты проведённых экспериментов на имитационной модели показывают гибкость и универсальность использования разработанного двухвершинного графа с отдельными биективными вершинами и рёбрами при решении задачи оптимизации перевозок на железнодорожной станции для всех возможных схем путевого развития станций.

Будущие исследования направлены на оценку эффективности использования предлагаемого двухвершинного графа в качестве исходных данных для пространственно-временной оптимизации перевозочного процесса.

Выводы

1. Представлено описание способа цифровизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования горнодобывающих предприятий, основанного на использовании имитационных моделей в режиме реального времени для оценки вариантов решений по управлению технологией перевозочного процесса.

2. Показано, что основным ограничением на использование имитационных моделей в оперативном режиме являются недостатки существующих графовых способов описания разветвлённых схем путевого развития промышленных железнодорожных станций со сложной маневровой работой.

3. Предложен новый математический объект – двухвершинный граф с отдельными биективными вершинами, особенностью которого является учёт величины угла между рёбрами графа. Данная особенность позволяет корректно описывать в имитационной модели железнодорожные стрелочные переводы. Кроме того, использование предложенного графа обеспечивает эффективный поиск оптимальных (кратчайших) путей известными методами без необходимости выполнения дополнительных вычислений для корректного моделирования маршрутов движения поездов по путям железнодорожной станции.

4. Доказана универсальность описания путевого развития железнодорожных станций разработанным двухвершинным графом с отдельными биективными вершинами для формирования транспортной сети железнодорожных перевозок на примере промышленной железнодорожной станции горнодобывающего предприятия со сложной схемой путевого развития.

5. Результаты исследования рекомендуют использовать при построении имитационных моделей как основного инструмента цифровизации процесса управления железнодорожными перевозками на путях необщего пользования, а также при построении высокоточных имитационных моделей железнодорожных станций.

Список источников

1. Kalinowski T., Matthews J., Waterer H. Scheduling of maintenance windows in a mining supply chain rail network // *Computers & Operations Research*. 2020, vol. 115, 104670. DOI: 10.1016/j.cor.2019.03.016.
2. Mining and Technical System Sustainable Development Strategy Selection Using MABAC Method / K.V. Burmistrov, S.E. Gavrishchev, N.A. Osintsev, I.A. Pytalev // *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 268–283.
3. A comprehensive interdisciplinary review of mine supply chain management / L. Zeng, S.Q. Liu, E. Kozan [и др.] // *Resources Policy*. 2021, vol. 74, 102274.
4. Radebe, N. Mining industry risks, and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets / N. Radebe, N. Chipangamate // *Resources Policy*. 2024, vol. 91, 104887.
5. Digital Transformation: a Prerequisite and Foundation for Sustainable Development of Mining Operations / M.V. Rylnikova, K.I. Strukov, D.N. Radchenko, E.N. Esina // *Mining Industry Journal*. 2021, no. 3, pp. 74–78.

6. Hypotheses on optimization of mining systems operating parameters using predictive analytics / V.N. Zakharov, M.V. Rynnikova, D.A. Klebanov, D.N. Radchenko // *Mining Industry Journal*. 2023, no. 5, pp. 38-42.
7. Mannhardt F., Landmark A.D. Mining railway traffic control logs // *Transportation Research Procedia*. 2019, vol. 37, pp. 227-234.
8. Setyaji A., Pamursari N., Sari N. Traffic Capacity Analysis of Existing Conditions with the Effect of Additional Coal Transportation Targets on The Tanjung Enim – Tarahan Railway Line // *Journal of Science and Applicative Technology*. 2024, vol. 8, no. 1, p. 15.
9. Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications / D.J. Wagg, K. Worden, R.J. Barthorpe, P. Gardner // *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*. 2020, vol. 6, no. 3, 030901.
10. Simulation models in digital twins of railway junctions / A.N. Rakhmangulov, S.N. Kornilov, P.N. Mishkurov, D.V. Alexandrin // *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2022. №3. С.43-59.
11. 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. 4, №60. С. 65-72.
12. Колокольников В.С., Слободянюк И.Г. Технология макромоделирования полигонов // *Транспорт Урала*. 2019. Т.3, №62. С.48-51.
13. Шмелевич М.И., Стариков А.Е. Особенности нормирования маневровой работы в имитационной модели станции // *Мир транспорта*. 2015. Т.5, №60. С.198-212.
14. Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н., Фридрихсон О.В. Методика формирования транспортной сети железнодорожной станции // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2021. Т. 3, №51. С.50-64.
15. Völz W.-D. Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie: Vorträge der Jahrestagung 1977 / *Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR. – Heidelberg: Physica-Verlag HD*, 1978, pp. 440-449.
16. Aliakbari M., Geunes J., Sullivan K.M. The single train shortest route problem in a railyard // *Optimization Letters*. 2021, vol. 15, no. 8, pp. 2577-2595.
17. Markus Montigel. Time-triggered exchange of train route data between train control systems // *Computers in Railways VIII: WIT Press*, 2002. Pp. 33-41.
18. Montigel M. Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs // *Computers in Railways III: Proceedings of the Third International Conference on Computer Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (Comprail 92): Computers in Railways III: WIT Press*, 1992. C. 359-370.
19. Gillett B.E., Miller L.R. A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem // *Operations Research*. 1974, vol. 22, no. 2, pp. 340-349.
20. Schedit M. Proposal For a Railway Layer Model // *COMPRAIL 2018: Computers in Railways XVI : Railway Engineering Design and Operation: WIT PressSouthampton UK*, 2018, pp. 157-168.
21. Development of a railway junction simulator for evaluation of control strategies and capacity utilization optimization / S. Shekhar, A. Singh, M.N. Belur, N. Rangaraj // 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC): 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC): IEEE, 2019. Pp. 260-265.
22. Edge-locating coloring of graphs / M. Korivand, D.A. Mojdeh, E.T. Baskoro, A. Erfanian // *Electronic Journal of Graph Theory and Applications*. 2024, vol. 12, no. 1, p. 55.
23. Aliakbari M., Geunes J. Multiple Train Repositioning Operations in a Railyard Network // *Operations Research Forum*. 2022, vol. 3, no. 4, p. 61.
24. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software / S. Abar, G.K. Theodoropoulos, P. Lemarinier, G.M. O'Hare // *Computer Science Review*. 2017, vol. 24, pp. 13-33.
25. Разработка имитационной дискретно-событийной модели транспортной инфраструктуры с использованием инструментов оптимизации / Кузьмин Д.В., Багинова В.В., Краснобаев Д.А., Мусатов Д.В. // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Т.17, №2. С. 42-48.
26. 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.

References

1. Kalinowski T., Matthews J., Waterer H. Scheduling of maintenance windows in a mining supply chain rail network. *Computers & Operations Research*. 2020;115:104670. DOI: 10.1016/j.cor.2019.03.016.
2. Burmistrov K.V., Gavrishev S.E., Osintsev N.A., Pytalev I.A. Mining and Technical System Sustainable Development Strategy Selection Using MABAC Method. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021;4(1):268-83. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-268-283.
3. Zeng L., Liu S.Q., Kozan E., et al. A comprehensive interdisciplinary review of mine supply chain management. *Resources Policy*. 2021;74:102274. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102274.
4. Radebe N., Chipangamate N. Mining industry risks, and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets. *Resources Policy*. 2024;91:104887. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.104887.
5. Rynnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina E.N. Digital Transformation: a Prerequisite and Foundation for Sustainable Development of Mining Operations. *Mining Industry Journal*. 2021;(3):74-8. DOI: 10.30686/1609-91922021-3-74-78.
6. Zakharov V.N., Rynnikova M.V., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Hypotheses on optimization of mining systems operating parameters using predictive analytics. *Mining Industry Journal*. 2023;(5):38-42. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5-38-42.
7. Mannhardt F., Landmark A.D. Mining railway traffic control logs. *Transportation Research Procedia*. 2019;37:227-34. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.187.
8. Setyaji A., Pamursari N., Sari N. Traffic Capacity Analysis of Existing Conditions with the Effect of Additional Coal Transportation Targets on The Tanjung Enim – Tarahan Railway Line. *Journal of Science and Applicative Technology*. 2024;8(1):15. DOI: 10.35472/jsat.v8i1.1753.
9. 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 Journal of Risk and Uncertainty in Engineer-*

- ing Systems, Part B: Mechanical Engineering. 2020;6(3):030901. DOI: 10.1115/1.4046739.
10. Rakhmangulov A.N., Kornilov S.N., Mishkurov P.N., Alexandrin D.V. Simulation models in digital twins of railway junctions. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2022;(3):43-59. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.
 11. Aleksandrov A.E., Surin A.V., Shipulin A.V. The use of simulation models in operational planning of train operations. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2015;4(60):65-72. (in Russ.).
 12. Kolokol'nikov V.S., Slobodyanyuk I G. Technology of polygons macromodelling. *Transport Urala*. 2019;3(62):48-51. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51. (in Russ.).
 13. Shmulevich M.I., Starikov A.E. Osobennosti normirovaniya manevrovoy raboty v imitacionnoy modeli stancii. *Mir transporta*. 2015;5(60):198-212. (in Russ.).
 14. Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N., Fridrihson O.V. Methodology of forming the transport network of a railway station. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2021;3(51):50-64. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64. (in Russ.).
 15. Völz W-D. Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie. *Vorträge der Jahrestagung 1977 / Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR*. Heidelberg: Physica-Verlag HD; 1978, p. 440-449.
 16. Aliakbari M., Geunes J., Sullivan K.M. The single train shortest route problem in a railyard. *Optimization Letters*. 2021;15(8):2577-95. DOI: 10.1007/s11590-021-01761-w.
 17. Montigel M. Time-triggered exchange of train route data between train control systems. *Computers in Railways VIII*: WIT Press; 2002, p. 33-41. Online verfügbar unter <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107640905>.
 18. Montigel M. Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs, *Computers in Railways III*. Washington, DC, U.S.A., 18-20 August, WIT Press, 1992, pp. 359-370.
 19. Gillett B.E., Miller L.R. A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Operations Research*. 1974;22(2):340-9. DOI: 10.1287/opre.22.2.340.
 20. Schedit M. Proposal For a Railway Layer Model. *COMPRAIL 2018: Computers in Railways XVI : Railway Engineering Design and Operation*. Lisbon, Portugal, 02.07.2018 - 04.07.2018, WIT PressSouthampton UK; 2018, p. 157-68.
 21. Shekhar S., Singh A., Belur M.N., Rangaraj N. Development of a railway junction simulator for evaluation of control strategies and capacity utilization optimization. *2019 Fifth Indian Control Conference (ICC)*. New Delhi, India, 09.01.2019 - 11.01.2019, IEEE; 2019, p. 260-5.
 22. Korivand M., Mojdeh D.A., Baskoro E.T., Erfanian A. Edge-locating coloring of graphs. *Electronic Journal of Graph Theory and Applications*. 2024;12(1):55. DOI: 10.5614/ejgta.2024.12.1.6.
 23. Aliakbari M., Geunes J. Multiple Train Repositioning Operations in a Railyard Network. *Operations Research Forum*. 2022;3(4):61. DOI: 10.1007/s43069-022-00171-7.
 24. Abar S., Theodoropoulos G.K., Lemarini P., O'Hare G.M. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*. 2017;24:13-33. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001.
 25. Kuzmin D.V., Baginova V.V., Krasnobayev D.A., Musatov D.V. Development of a discrete-event simulation model of transport infrastructure using optimization tools. *T-Comm: Telekommunikacii i transport*. 2023;17(2):42-48. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-42-48. (in Russ.).
 26. Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Construction Features of Railway Station Agent-based Simulation Model. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of Russian Transport Complex]. 2021;11(1):29-40. (in Russ.).

Поступила 09.12.2024; принята к публикации 10.02.2025; опубликована 30.06.2025
Submitted 09/12/2024; revised 10/02/2025; published 30/06/2025

Мишкuroв Павел Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами, институт горного дела и транспорта, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: p.mishkurov@magtu.ru. ORCID 0000-0001-9886-0575

Рахмангулов Александр Нельевич – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, институт горного дела и транспорта, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743

Pavel N. Mishkurov – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Institute of Mining and Transport, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: p.mishkurov@magtu.ru. ORCID 0000-0001-9886-0575

Aleksandr N. Rakhmangulov – DrSc (Eng.), Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Institute of Mining and Transport, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743