УДК 658.51

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГРУЗОВ КАК УСЛОВИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

IMPROVING OPERATIONAL PLANNING OF CUSTODIAL TRANSPORTATION PROCESSES AS A CONDITION FOR ENSURING THE QUALITY OF METALLURGICAL PRODUCTS

Кольчурина М.А., аспирант, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (Новокузнецк, Россия)

Макаров Г.В., канд. техн. наук, доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (Новокузнецк, Россия)

Кольчурина И.Ю., канд. техн. наук, заведующий кафедрой менеджмента качества и инноваций, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (Новокузнецк, Россия)

Kolchurina M.A., postgraduate student, Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)

Makarov G.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Quality Management and Innovation, Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)

Kolchurina I.Y., Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Quality Management and Innovation, Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)

Цель исследования – совершенствование оперативного планирования процессов внутренней железнодорожной транспортировки грузов промышленного предприятия, которые функционируют в рамках системы менеджмента качества. В качестве примера использован процесс перевозки чугуна в условиях металлургического предприятия, для которого требуется обеспечить ритмичность подачи чугуна и снизить простои и потери.

Для достижения цели используются методы математического моделирования, обработки данных, методов теории автоматического управления, алгоритмизации, натурно-математического моделирования.

По результатам исследования разработан подход к снижению колебаний темпа производственного потока и его стабилизации за счет разработки методики оперативного отслеживания производственного потока и внесения корректировок в скорость подачи локомотивов и организации перевозок. Предложена дискретная система управления качеством процессов перевозок чугуна в условиях металлургического предприятия, основанная на положениях теории автоматического управления и натурно-математического моделирования. Определены три горизонта планирования и управления: рейсы текущей смены, смены до конца месяца, следующий плановый период (месяц). В работе выделены управляющие воздействия, контролируемые возмущения в рамках описанной производственной системы. Разработан и описан алгоритм регуляции замкнутой динамической системы с отрицательной обратной связью и интегральным законом регулирования, включающий оценку накопленного отклонения фактического потока от планового потока, определение достижимой компенсации отклонений и перераспределение компенсируемой части ошибки на оставшийся горизонт планирования. Представлены результаты экспериментов и тестирования решения на модельном и натурно-модельном

The aim of the study is to improve the operational planning of internal railway freight transportation processes at an industrial enterprise operating within a quality management system. The transportation of hot metal at a metallurgical enterprise is used as an example, where it is necessary to ensure a stable and rhythmic supply of hot metal and to reduce downtime and losses.

To achieve this aim, methods of mathematical modeling, data processing, automatic control theory, algorithm development, and physical-mathematical modeling are used.

As a result of the study, an approach was developed to reduce fluctuations in the production flow rate and stabilize it by introducing a methodology for operational monitoring of the production flow and making adjustments to locomotive dispatching speed and transportation organization. A discrete quality management system for hot metal transportation processes at a metallurgical enterprise was proposed, based on the principles of automatic control theory and physical-mathematical modeling. Three planning and control horizons were identified: trips during the current shift, shifts until the end of the month, and the next planning period (month). The study identifies control actions and controlled disturbances within the described production system. An algorithm for regulating a closed-loop dynamic system with negative feedback and an integral control law was developed and described. The algorithm includes assessment of the accumulated deviation of the actual flow from the planned flow, determination of the achievable compensation for deviations, and redistribution of the compensable part of the error over the remaining planning horizon. The results of experiments and solution testing using both mathematical and physical-mathematical models are presented. The effectiveness of the proposed solution and its applicability for achieving the stated objective under the specified constraints were confirmed, namely increasing the regularity of hot metal supply and reducing downtime and losses. The efficiency of

примерах, подтверждена эффективность решения и его применимость для достижения поставленной цели в условиях заданных ограничений – повышения ритмичности подачи чугуна и снижения простоев и потерь. Достигнут рост эффективности процессов перевозок на 33%, снижена ошибка выполнения плана на 54%.

Ключевые слова: планирование перевозочного процесса, дискретная система управления, замкнутая динамическая система, натурно-математическое моделирование.

Для цитирования: Кольчурина М.А., Макаров Г.В., Кольчурина И.Ю. Совершенствование оперативного планирования процессов транспортирования грузов как условие обеспечения качества продукции металлургического производства // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2026. № 5(92). С. 56–66.

transportation processes increased by 33%, while the plan execution error was reduced by 54%.

Keywords: transportation process planning, discrete control system, closed-loop dynamic system, physical-mathematical modeling.

For citation: Kolchurina M.A., Makarov G.V., Kolchurina I.Y. Improving operational planning of custodial transportation processes as a condition for ensuring the quality of metallurgical products. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2026; 5(92): 56–66. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из объектов управления в системе менеджмента качества предприятия являются процессы транспортировки грузов [1]. Показатели качества процессов перевозки исходного сырья, материалов, незавершенного производства и готовой продукции влияют на ритмичность работы предприятия, выполнение плановых показателей по выпуску продукции и, как следствие, удовлетворенность потребителей качеством продукции, которое обеспечивается видом используемого для перевозки транспорта, графиком движения, скоростью и используемой на предприятии инфраструктурой согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 9001.

Для металлургического предприятия, жизненный цикл продукции которого включает производство металлов и сплавов, характерно применение железнодорожного транспорта. Железнодорожный транспорт используется в том числе и для транспортировки опасных грузов: металлов и сплавов в жидком состоянии.

При этом обеспечение качества продукции, залогом которого является доставка грузов «в нужное время, в нужном количестве и требуемого качества», невозможно без эффективного планирования перевозочного процесса, которое, в свою очередь, связано с задачами прогнозирования и моделирования сценариев выполнения транспортной работы в условиях ограничений и требований клиентов. Результатом решения данных задач является формирование устойчивого и эффективного расписания движения локомотивов между пунктами отправления и назначения [2].

Объектом исследования является процесс железнодорожных перевозок внутри производственного предприятия, где использование данного вида транспорта позволяет транспортировать сырье, материалы, полуфабрикаты и готовую продукцию между участками основного производственного процесса.

Планирование и реализация железнодорожных перевозок на производственных предприятиях имеет ряд существенных отличий от типовых задач маршрутизации и составления расписаний. В первую очередь это связано с отсутствием этого самого «расписания» на какой-либо долговременный период по причине гибкого изменения производственных планов, переменной структуры производства и количества подвижного состава на смене [3]. Другое отличие, связанное с особенностями некоторых производств (металлургических, обогатительных и др.), заключается в том, что не всегда имеется возможность загрузки и выгрузки ровно того количества материала, которое было запланировано. Например, при подаче угля на переработку в зависимости от его качества и управляющих параметров получится разное количество продукции, а при получении чугуна в доменной печи количество выплавленного чугуна может значительно различаться, как и само время его «выдачи» [4]. Дополнительную неопределенность вносит отсутствие непрерывного контроля положения подвижного состава и, как правило, сложная сеть железнодорожных путей, что в отсутствие централизованного автоматизированного центра управления приводит к конфликтам расписаний, перегрузке отдельных веток, внеплановому простою локомотивов с грузом и без и т. д.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Авторами настоящего исследования было сделано предположение, что для оптимизации железнодорожных перевозок на металлургическом предприятии необходимо решить «задачу коммивояжера (Traveling Salesman Problem)». Указанная «задача» относится к подзадачам комбинаторной оптимизации, сфокусированной на поиске наиболее выгодного маршрута, включающего в себя все заданные для единоразового посещения точки [5]. Задача может быть асимметричной, где длина маршрута и вес отдельных участков пути не изменяются в зависимости от направления движения, и асимметричной, для которой направление движения является одним из факторов, определяющих длину маршрута. Также выделяют динамическую задачу коммивояжера, особенностью которой является изменение положения точек маршрута с течением времени [6].

В настоящее время в научной литературе и практических примерах существует ряд подходов, которые позволяют решить проблему поиска оптимального пути. Рассмотрим их подробнее.

Первой группой методов является графовый метод, в рамках которого маршрут представляется как полный взвешенный граф. В качестве узлов графа выбираются точки маршрута, а в качестве ребер – путь между точками. Каждое из ребер имеет определенный вес, выбор которого чаще всего основан на длине пути между узлами или времени его прохождения, исходя из которого возможно подобрать оптимальный маршрут [7].

В точных графовых методах решение задачи заключается в поиске полного «Гамильтонова цикла» минимального веса с исключением подциклов. Ключевым плюсом метода является его доказательность и точность получения оптимального решения, что позволяет использовать его в качестве бенчмарка для других методов. Однако вычислительная сложность точных графовых методов растет экспоненциально при увеличении числа вершин, что делает их недоступными к применению в практических ситуациях с большим числом точек маршрута из-за низкой эффективности [8]. К точным методам относятся метод прямого перебора вариантов динамического программирования Хелда-Карпа [9], метод ветвей и границ и иные вариации метода прямого перебора [5].

Аппроксимационный графовый метод также базируется на представлении маршрута в форме графа, однако данные методы не гарантируют выбор оптимального маршрута; а обеспечивают возвращение решения, которое менее чем на коэффициент аппроксимации отличается от оптимального. Аппроксимационные методы имеют более низкую точность, однако и обладают меньшей вычислительной сложностью, что позволяет без потерь решать задачи со значительным числом узлов. К данной группе методов относится, например, алгоритм Кристофидеса. Недостатками методов аппроксимации являются ограниченние практического применения отдельными частными случаями «задачи коммивояжера», а также сохраняющаяся вычислительная сложность по сравнению с иными методами [10].

В декомпозиционных графовых методах изначальная задача разделяется на несколько подзадач, решаемых последовательно. Первично решается основная задача поиска оптимального маршрута, а далее полученное решение передается как вводные данные для решения подзадачи проверки ограничений. Если ограничения не выполняются, то в условие основной задачи добавляются условия, соответствующие ограничениям, и решение основной задачи повторяется. Декомпозиционные методы позволяют решать задачи с множеством точек и условий, например, при планировании движения автономного транспорта или организации транспортных систем, однако точность конечного результата зависит от корректности ограничений, что усложняет подготовку к решению задачи [11].

Общим недостатком всех графовых методов является невозможность учета изменений в пути из-за внешних факторов, а также привязки оптимального решения к времени старта обхода маршрута для нескольких исполнителей, участвующих в транспортной системе.

Объект настоящего исследования характеризуется большим количеством ограничений и регламентированностью процесса, важным является учет параметров старта маршрутов для различных локомотивов, используемых на предприятии, поэтому использование графовых методов не является приоритетным методом решения данной задачи.

Также для решения «задачи коммивояжера» применяются динамические модели маршрутизации, в которых оптимальный маршрут не просчитывается изначально, а определяется в ходе «n» операций по принятию решений о дальнейших перемещениях исходя из текущей точки нахождения объекта и условий, где n – число точек маршрута. Динамические модели позволяют учитывать ограничения предшествия [12], возможные неучтенные случайные отклонения фактического времени перемещения от прогнозного и иные факторы среды [13], что делает их более применимыми для решения практических задач маршрутизации и логистики. Однако данные модели обладают высокой математической сложностью при отсутствии гарантий достижения локального оптимума, требуют предварительного сбора данных об изменениях во времени движения.

Стохастические модели маршрутизации позволяют учитывать случайные параметры в условиях задачи, например задержки транспорта, непостоянство точек маршрута при различном спросе, инциденты. Это делает их более применимыми в условиях промышленного предприятия. В стохастических моделях выполнение того или иного условия, размеры отдельных параметров имеют ряд значений с оцененной вероятностью появления конкретной величины. Примерами стохастических моделей являются: модель, построенная по методу Probabilistic Traveling Salesman Problem (PTSP), где у каждой из точек маршрута есть назначенная вероятность посещения [14]; модели со стохастическим временем движения, в которых фактическое время перемещения между точками оценивается через распределение вероятностных величин [15, 16]; модели оптимизации со случайной вероятностью выполнения ограничений и ряд других вариаций методов, где параметры не определены точно [17]. Главным недостатком методов является невозможность получить точные оценки оптимального пути, высокая вычислительная сложность. Однако стохастические методы за счет обеспечения учета вероятностей и рисков отклонения от точного прогнозного маршрута позволяют получить практически применимый результат.

С развитием технологий машинного обучения и искусственного интеллекта появились новые способы решения «Задачи коммивояжера» путем разработки алгоритмов на основе больших данных. Модели машинного обучения не оценивают длины маршрутов напрямую, а прогнозируют тот или иной временной результат в заданной плоскости ограничений на основе обучающих фактических исторических данных с учетом сложной совокупности факторов [18].

Для решения задачи поиска оптимального пути возможно использование таких моделей, как end-to-end алгоритмы, гибридные алгоритмы deep learning [19], графовые нейросети, модели на основе архитектуры трансформера [20], модели обучения с подкреплением, например Policy Gradient методы [21], а также модели на основе симуляторов условий движения.

Недостатком моделей машинного обучения является необходимость проведения подготовительных операций, таких как сбор сбалансированной выборки, очистка, нормализация, устранение выбросов и пропущенных значений для формирования массива обучающих данных, что требует наличия соответствующей вычислительной инфраструктуры и компетентных специалистов. Также при отсутствии достаточного числа примеров редких ситуаций точность прогноза может быть низкой. Несмотря на представленные недостатки, методы машинного обучения позволяют создавать динамически изменяющиеся расписания даже для случаев с числом возможных точек маршрута выше 50–100, что достаточно важно для оперативного управления транспортными потоками [18]. При этом описанные выше минусы подхода не позволяют в чистом виде использовать его для решения задачи, представленной в настоящем исследовании.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В качестве примера рассмотрено металлургическое производство; особенности планирования подвижного состава рассмотрены ранее в работе И.Ю. Кольчуриной, Г.В. Макарова, М.А. Кольчуриной. По результатам проведенных работ по управлению процессом железнодорожных перевозок разработан программный продукт «Калькулятор расчета подвижного состава железнодорожной станции», который позволяет амортизировать расчеты необходимого (и достаточного) количества единиц подвижного состава [22].

Необходимо отметить, что важной особенностью предмета исследования является приоритизация задач в условиях ограничений. Наивысший приоритет имеет уборка ковшей с жидким чугуном и шлаком; средний приоритет – подача сырья (скрапа, ферросплавов); низкий приоритет – перестановка порожних составов, подача вагонов под погрузку готовой продукции (если склад временно имеет запас) [23].

На основании приоритетности границы процесса транспортировки грузов определены этапами налива чугуна и сливом чугуна потребителю.

Блок-схема процесса транспортировки чугуна представлена на рис. 1.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

На основании приведенного выше литературного обзора можно сделать вывод о том, что готовых решений, которые возможно применить в условиях объекта, не существует, – возможно пойти путем реорганизации текущей IT-архитектуры предприятия и интегрировать в одну систему или программный комплекс все имеющиеся системы и решения, отвечающие за решение задач производственных цехов, складского хозяйства, логистики и планирования железнодорожного транспорта, с доработками и расширением функционала уже работающих решений, однако данное решение требует значительных материальных и временных затрат, а также связано с реинжинирингом бизнес-процессов организации. Поэтому для достижения цели и решения поставленной задачи управления описанным объектом была предложена разработка



Рис. 1. Блок-схема процесса транспортировки чугуна представлена

новой дискретной системы управления качеством потокового процесса, направленной на стабилизацию показателей потока перевозок чугуна.

В представленной задаче определены:

1) точки отправки материала;

2) точки приема материала;

3) транспортная сеть;

4) статистические данные выполнения маршрутов;

5) план потребления чугуна потребителем:

– месячный $Q_{\text{мес}}^{\text{план}}$; $Q_{\text{мес}}^{\text{план}}$

– суточный $Q_{\text{сут}}^{\text{план}} = \frac{n_{\text{сут}}}{Q_{\text{сут}}^{\text{план}}}$, где $n_{\text{сут}}$ – число дней в месяце;

– сменный $Q_{\text{смен}}^{\text{план}} = \frac{2}{}$.

В качестве ограничений в настоящем исследовании определено следующее:

1) отсутствие контроля промежуточных положений;

2) в точках отправки загружается «не плановое» значение материала (объемы определяются в процессе погрузки/выгрузки);

3) время перевозки чугуна варьируется;

4) отсутствует буферная емкость для временного хранения излишков привезенного чугуна, но расплавленный чугун в чугуновозах может ожидать следующую плавку без потери качества;

5) снижение и повышение производительности доменной печи инерционно и нестабильно, поэтому не может быть использовано в качестве оперативного управляющего воздействия.

Одним из главных условий является обеспечение требований потребителя: потребность конвертерного цеха в жидком чугуне требуемого количества и качества (под показателем качества в данном случае понимается температура чугуна, которая должна быть обеспечена при транспортировке).

Решение базируется на применении методов теории автоматического управления, алгоритмизации, натурно-математического моделирования. В системе была введена оценка достижимой компенсации отклонений на конечном горизонте, позволяющая разделять компенсируемую и переносимую составляющие ошибки.

Опишем содержание решения и механизм его работы. На основе оценки производственного процесса и решений-аналогов было решено выделить в системе 3 уровня управления планом в зависимости от горизонта планирования:

– последующие рейсы до конца смены;

– последующие смены до конца месяца;

– смены на следующий месяц.

Управляющие воздействия на рейсы – время рейса для обеспечения заданного производственного потока материала.

В зависимости от уровня управления планом отличаются стратегии обработки и перераспределения накопленного отклонения. Так, накопленное отклонение планового потока на текущий момент распределяется на оставшиеся до конца смены рейсы. Накопленное к концу смены отклонение пересчитывается в объем и распределяется на заданный объем оставшихся до конца месяца смен. Накопленное к концу месяца отклонение объема переносится на следующий месяц.

Опишем математическую модель. В соответствии с планом производства потребитель должен получать определенное количество материала (чугуна) с определенным интервалом, определяемым графиком выплавки стали в кислородном конвертере. То есть для каждого маршрута в соответствии с общим числом подвижного состава на смене можно определить количество рейсов за смену $N_{\text{смен}}$, количество материала и время, за которое этот материал должен быть доставлен. Исходя из этого можно выделить 2 проблемы:

1) количество материала не будет соответствовать плановому из-за особенностей доменного производства;

2) время выполнения маршрута сильно зависит от всевозможных простоев и внеплановых перемещений, обусловленных множеством неконтролируемых факторов [23].

Рассмотрим решение задачи обеспечения планового количества материала, которая следует из первой задачи.

На основе количества подвижного состава на смене и плана производства потребителя имеем 2 показателя:

$T^{\text{план}}$ – плановое время одного маршрута;

$Q^{\text{план}}$ – плановый объем перевозки одного маршрута.

На основании этого вычисляется плановый поток материала (1):

$$F^{\text{план}} = \frac{Q^{\text{план}}}{T^{\text{план}}}. \quad (1)$$

Однако совокупность влияющих факторов, вызывающих возмущения W, влияет на отклонения фактически перевезенного груза Q и времени маршрута T, создавая фактический поток F. Т.е. если для переработки планового объема $Q^{\text{план}}$ требовалось время переработки $t_{\text{п}}^{\text{план}}$, то для переработки меньшего объема потребуется меньше времени, что вызовет простой производства, а если большего – то больше, и новая партия материала может вызвать переполнение конвертера либо охлаждение чугуна в ковшах (миксерах).

Таким образом, модель объекта управления в операторной форме представляет собой пропорциональное звено с запаздыванием (комплексная переменная Лапласа s в дальнейшем упускается) (2):

$$\varphi(s) = F \cdot e^{-\tau s}. \quad (2)$$

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Задача управления сводится к задаче стабилизации (3), то есть частному случаю регулирования

$$F \to F^{\text{план}} \text{ и } \delta F \to 0. \quad (3)$$

Для решения данной задачи было предложено сформировать замкнутую динамическую систему (ЗДС) с отрицательной обратной связью, схема которой приведена на рис. 2. Данная система показывает оператору необходимое время следующего маршрута для обеспечения бесперебойной работы потребителя исходя из его потребностей.

В основе закона управления в соответствии с методами синтеза [24] должен лежать интегральный закон регулирования, на основе которого был сформирован алгоритм многоуровневой системы планирования в дискретной форме, представленный ниже.

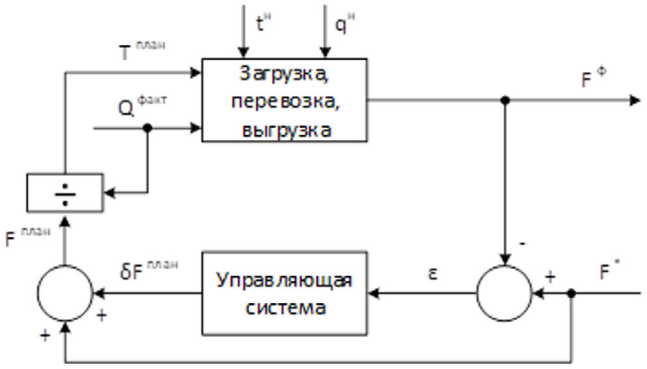


Рис. 2. Схема замкнутой динамической системы

Заданный целевой поток F^* для одного рейса (4) в соответствии с (1):

$$F^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{смен}}} Q_i^{\text{б}}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{смен}}} T_i^{\text{б}}}, \quad (4)$$

где $Q_i^{\text{б}}$ – базовый плановый объем на рейс, $T_i^{\text{б}}$ – базовое плановое время рейса.

Входными воздействиями являются планируемый объем производства в конкретном случае ($Q_i^{\text{план}}$) и планируемое время рейса ($T_i^{\text{план}}$).

В рассматриваемой задаче значение $Q_i^{\text{план}}$ изменяется в очень ограниченном диапазоне (домна выдает столько, сколько хочет), поэтому его целесообразно отнести в дальнейшем к контролируемому возмущению.

Ограничения на реализацию входных воздействий (5):

$$\begin{aligned} Q^{min} \le Q_i^{\text{план}} \le Q^{max}, \\ T_i^{\text{план}} \ge T_i^{min} \ge T^{min}. \end{aligned} \quad (5)$$

Значение Q^{min} определяется минимальным достаточным объемом для плавки, Q^{max} – максимальным объемом конвертера; T_i^{min} – временем плавки объема материала предыдущего рейса, T^{min} – минимальное время транспортировки по кратчайшему маршруту (с учетом ограничений скорости перевозки).

Однако приведенные ко входам возмущения фактические управляющие значения равны (6):

$$Q_i^{\text{ф}} = Q_i^{\text{б}} + q_i^{\text{н}}, T_i^{\text{ф}} = T_i^{\text{б}} + t_i^{\text{н}}, \quad (6)$$

где $q_i^{\text{н}}$ – неконтролируемые возмущения по объему, $t_i^{\text{н}}$ – неконтролируемые возмущения по времени.

Фактический поток (7):

$$F_i^{\text{ф}} = \frac{Q_i^{\text{ф}}}{T_i^{\text{ф}}} \quad (7)$$

Ошибка регулируемой переменной (8):

$$\varepsilon_i = F^* - F_i^{\text{ф}}. \quad (8)$$

Для определения накопленной ошибки на текущий момент времени (9):

$$E_i = \sum_{k=1}^{i} \varepsilon_k. \quad (9)$$

Для компенсации накопленной ошибки воспользуемся степенным выражением распределения весов на оставшееся число рейсов ($N_{\text{смен}} - i$) (10, 11):

$$w_{i,j} \ge 0, \sum_{j=i+1}^{N\text{смен}} w_{i,j} = 1, \quad (10)$$

$$w_{i,j} = \frac{1}{T_j^{min} \cdot \sum_{k=i+1}^{N\text{смен}} \frac{1}{T_k^{min}}}. \quad (11)$$

Для рекуррентного алгоритма достаточно знать вес на шаге $i+1$ и пересчитывать его с каждым повторением. Однако распределение весов и прогнозируемых плановых значений времени оставшихся рейсов до конца смены полезно для планирования работы оператора.

Значение планового потока с корректировкой на накопленную ошибку (12):

$$F_{i+1}^{\text{план}} = F^* + \delta F_{i+1}^{\text{план}}, \quad (12)$$

где

$$\delta F_{i+1}^{\text{план}} = \delta F_i^{\text{план}} + k_{\text{и}} \cdot w_{i+1} \cdot E_i.$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент И-закона регулирования [25].

И для всего горизонта планирования до конца смены (13)

$$F_j^{\text{план}} = F^* + k_{\text{и}} \cdot w_{i,j} \cdot E_i, \text{ для } j = i+1, \dots, N_{\text{смен}}. \quad (13)$$

Далее мы должны получить плановое время, т.к. им мы можем управлять, а объем для нас контролируемое возмущение (14):

$$T_i^{\text{план}} = \frac{Q_i^{\text{ф}}}{F_i^{\text{план}}}. \quad (14)$$

Опишем итерационный алгоритм.

Задаем нулевые начальные условия.

Далее при $\mathrm{i} > 0$ получаем фактические значения: Q_i^{Φ}, T_i^{Φ}.

Фактический поток (15)

$$F_i^{\Phi} = \frac{Q_i^{\Phi}}{T_i^{\Phi}}. \quad (15)$$

Ошибка определяется по формуле (8). Тогда накопленная ошибка для итерационной формы (16)

$$E_i = E_{i-1} + \varepsilon_i. \quad (16)$$

Веса вычисляются по выражению (11), а вырабатываемое управляющее воздействие – по выражению (13).

В случае, когда насыщение к концу смены не удалось свести к 0, насыщение «возмущенной» части переносится в «базовую» (плановую) часть следующей смены (17):

$$Q_{j+1}^{\text{смены}} = Q_{\text{б}}^{\text{смены}} + E_i. \quad (17)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ НА МОДЕЛЬНОМ ПРИМЕРЕ

Для модельного примера взяты нулевые начальные условия. Параметры модели следующие: число рейсов $\mathrm{N} = 20$; план на смену $\mathrm{Q} = 6000$ тонн.

В качестве модели возмущений применяется аддитивный нормированный по среднему квадратическому отклонению нормально распределенный белый шум. В фактическом объеме Q_i^{Φ} заложена ошибка (уровень шума) в 10%, для фактического времени T_i^{Φ} заложена ошибка в 20%. Линии Q_i^{Φ} и T_i^{Φ} изображены на графиках рис. 3.

Ограничения на реализацию времени маршрута $\mathrm{T_{min}/T} = 0{,}75$.

На рис. 3 представлены результаты моделирования эксперимента с отражением графиков зависимости произведенного объема (Q), времени рейса (T), потока материала (F) и накопленной ошибки по объему ($\Sigma\Delta$Q).

На основе результатов моделирования можно отметить, что:

– фактический объем выпускаемого материала нестабилен (см. рис. 3а), что и приводит к дальнейшим отклонениям от плановых показателей (см. рис. 3б);

– без регулирования время рейса не учитывает колебания потока (см. рис. 3в). При использовании алгоритмов регулирования график рейсов пересматривается (см. рис. 3г), что позволяет обработать накопленную ошибку и снизить эффект непостоянства объема на выполнение плана (см. рис. 3д);

– без регулирования среднее модульное отклонение потока материала $Q_1^{\text{СМО}} = 1{,}14$ т/мин, а при введении управляющего воздействия $Q_2^{\text{СМО}} = 0{,}49$ т/мин (для значений величин $\mathrm{F_{fact}}$ (без) и $\mathrm{F_{fact}}$ (с) (рис. 3). То есть введение системы

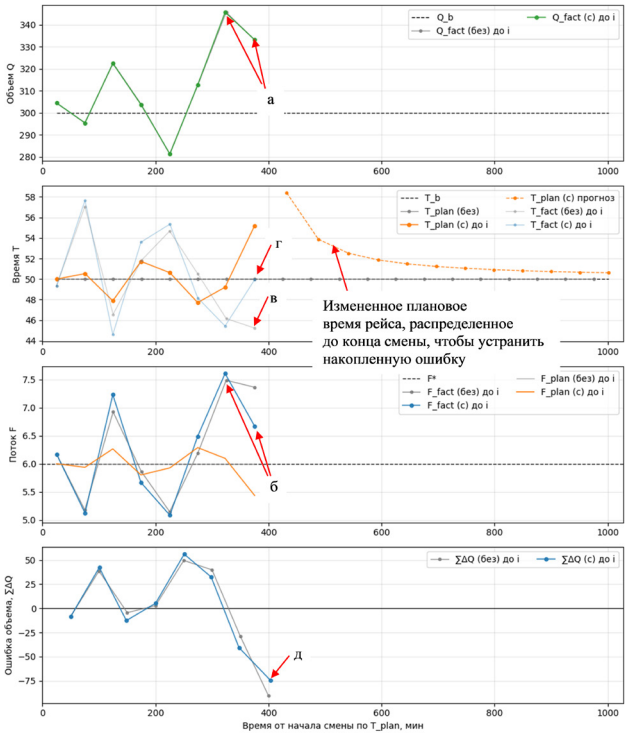


Рис. 3. Модельный пример

управления повысило эффективность процесса на 57% в модельном примере.

– при $i = 20$ накопленная ошибка к концу смены без регулирования составила $E_i = 137{,}67$ т, с регулированием $E_i = 74{,}85$ т.

Также в условиях модельного примера итоговая ошибка выполнения плана снизилась на 54%.

РЕЗУЛЬТАТЫ НА НАТУРНО-МОДЕЛЬНОМ ПРИМЕРЕ

Произведем анализ ситуации на натурном примере на основе данных, полученных за одну смену при плане на смену 6000 т. На рис.4 представлено соотношение планового и фактического потока материала во время смены.

На рис. 4 можно выделить следующие участки:

1 – слишком низкий фактический поток;



Рис. 4. График натурных значений за смену

2 – оператор пытается вручную исправить поток, из-за чего происходит перекомпенсация;

3 – оператор пытается сократить время маршрута;

4 – поток уменьшается из-за значительного ожидания продукции;

5 – оператор пытался скомпенсировать просадку потока и подал слишком много материала;

6 – слишком низкий поток.

В результате работы оператора поток неравномерный и далек от заданного, среднее медианное значение отклонения потока от заданного равно 3,5 т/мин. Это приводит к проблемам – простой производства из-за отсутствия материала, ожидание наполненных вагонов в цеху, что приводит к охлаждению чугуна.

На рис. 5 показано сравнение графиков фактического потока от времени и графика смоделированного потока, который был бы возможен при использовании системы, а также рассмотрены накопленные ошибки в обоих случаях.

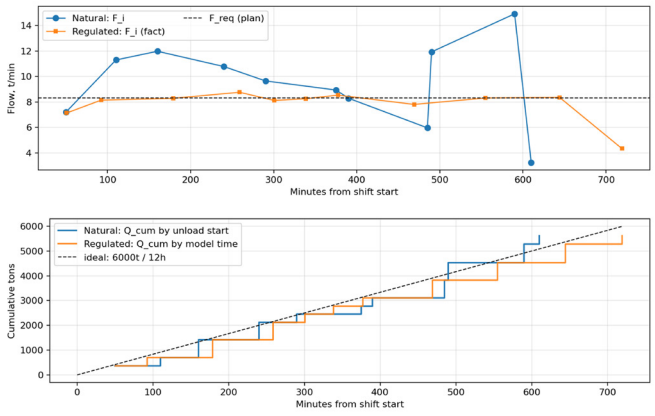


Рис. 5. Графики натурно-модельного эксперимента

При моделировании были учтены натурные значения загруженного чугуна и дополнительно введена ошибка реализации управляющего воздействия, т. е. времени рейса.

Среднее модульное отклонение фактического значения от планируемого в случае примера с натурными данными – $Q_1^{\text{СМО}} = 3{,}50$ т/мин, в натурно-модельном примере среднемодульное отклонение составило $Q_2^{\text{СМО}} = 2{,}35$ т/мин. То есть введение системы управления повысило эффективность процесса на 33% в натурно-модельном примере. При этом исключены точки, где были возможны простой производства или охлаждение чугуна из-за ожидания вагонов в цехе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена проблема обеспечения качества продукции металлургического производства на этапе транспортировки чугуна из доменного цеха в конвертерный. Отмечено, что показатели качества транспортируемой продукции зависят от соблюдения сроков отгрузки и продолжительности перевозки между производственными участками.

На основе результатов анализа предметной области и текущего состояния процессов перевозки чугуна в статье была сформулирована задача обеспечения качества процессов перевозки жидкого чугуна в цеху в условиях отсутствия закрепленного расписания отгрузок и подачи локомотивов под запрос и наличия случайных отклонений по объему перевозимого чугуна и времени от момента загрузки грузов до момента отгрузки чугуна потребителю процесса. Для решения поставленной задачи была предложена дискретная система управления качеством потокового процесса, направленная на стабилизацию показателя потока.

Разработанная система была основана на применении методов теории автоматического управления, алгоритмизации, натурно-математического моделирования. Ключевая идея системы состоит в регулярной оценке накопленного отклонения фактического показателя потока от планируемого и формировании рекомендаций по стабилизации потока и снижению накопленной ошибки фактического объема перевезенных грузов от планируемого в рамках смены. Предложено три горизонта управления планированием транспортировок, на которых предлагается регуляция показателей потока и показателей плана по выпуску продукции для достижения управляемости процесса и требуемого уровня качества.

Применимость решения и его практическая значимость были подтверждены по результатам экспериментов. Отмечено, что использование предложенного подхода позволяет повысить равномерность потока материала на 33% в натурно-модельном примере, тем самым повысив качество производимой продукции за счет минимизации ситуаций снижения температуры чугуна при ожидании.

Рекомендовано внедрение системы в качестве инструмента управления для процессов перевозки чугуна.

Рецензент: Бурый Алексей Сергеевич, *доктор технических наук, заместитель начальника научного отдела ФГБУ «Институт стандартизации», Москва, Российская Федерация. E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru*

Список литературы

1. Стародубов Д.С., Трошкова Е.В. Совершенствование инструментов управления качеством в части планирования и оценки логистических процессов / III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки», приуроченная ко Всемирному дню стандартов, Москва, 15 октября 2025 г. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6(87). С. 270–275.
2. W. Lenze, N. Nieben, Quality in rail timetabling – A detailed review of stakeholders' interests compared with current practices in Germany, Journal of Rail Transport Planning & Management, Vol. 20, 2021, 100282, ISSN 2210-9706, https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100282.
3. Кольчурина И.Ю. Совершенствование системы оперативного планирования железнодорожных перевозок на промышленном предприятии // И.Ю. Кольчурина, Г.В. Макаров, М.А. Кольчурина / III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки», приуроченная ко Всемирному дню стандартов, Москва, 15 октября 2025 г. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6(87). С. 687–693.
4. Основы металлургического производства : учебник для вузов / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев [и др.]. — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 616 с. — ISBN 978-5-507-47607-7. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/397271
5. Киселева А. А. Обзор методов решения задачи коммивояжера / А. А. Киселева // Информатика: проблемы, методология, технологии: Сборник материалов XIX международной научно-методической конференции, Воронеж, 14–15 февраля 2019 года / Под ред. Д.Н. Борисова. – Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации» (ООО «Вэлборн»), 2019. – С. 1338–1341.
6. M., Van, S., Yang. Pheromone modification strategy for the dynamic travelling salesman problem with weight changes. 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). IEEE, 2017
7. Мильяненко И.Э. Теория графов в логистике / И.Э. Мильяненко А.П. Дмитриев // Образование и наука в развитии технологий, экономики, общества: Материалы докладов 58-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 60-летию УО «ВГТУ». В 2-х томах, Витебск, 16–17 апреля 2025 года. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2025. – С. 411–414. – EDN DNVBKE.
8. Y., Warif, A., Ghassan, M., Al-Neama, A., Hasan Traveling Salesman Problem Methods of Solution Survey. International Journal of Psychosocial Rehabilitation. V. 24, p. 8565-85816 2020 doi 10.37200/IJPR/V24I5/PR2023807.

References

1. Starodubov, D.S., Troshkova, E.V. Improving quality management tools in terms of planning and evaluating logistics processes / III Scientific and Practical Conference "Standardization: the trajectory of science," dedicated to World Standards Day, Moscow, October 15, 2025 // Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025. No. 6(87). Pp. 270–275.
2. W. Lenze, N. Nieben, Quality in rail timetabling - A detailed review of stakeholders' interests compared with current practices in Germany, Journal of Rail Transport Planning & Management, Vol. 20, 2021, 100282, ISSN 2210-9706, https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100282.
3. Kolchurina, I.Y. Improvement of the Operational Planning System for Railway Transportation at an Industrial Enterprise / I.Yu. Kolchurina, G.V. Makarov, M.A. Kolchurina // III Scientific and Practical Conference "Standardization: The Trajectory of Science", dedicated to World Standards Day, Moscow, October 15, 2025 // Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025. No. 6(87). P. 687–693.
4. Fundamentals of Metallurgical Production: Textbook for Universities / V.A. Bigeev, K.N. Vdovin, V.M. Kolokoltsev et al. 5th ed., stereotyped. St. Petersburg: Lan, 2024. 616 p. ISBN 978-5-507-47607-7. Electronic text // Lan: Electronic Library System. URL: https://e.lanbook.com/book/397271
5. Kiseleva, A.A. Review of Methods for Solving the Traveling Salesman Problem / A.A. Kiseleva // Computer Science: Problems, Methodology, Technologies: Proceedings of the XIX International Scientific and Methodological Conference, Voronezh, February 14-15, 2019 / Ed. by D.N. Borisov. Voronezh: Research Publications Publishing House, Welborn LLC, 2019. P. 1338–1341.
6. M., Van, S., Yang. Pheromone modification strategy for the dynamic travelling salesman problem with weight changes. 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). IEEE, 2017.
7. Milyanenko, I.E. Graph Theory in Logistics / I.E. Milyanenko, A.P. Dmitriev // Education and Science in the Development of Technology, Economy, and Society: Proceedings of the 58th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students Dedicated to the 60th Anniversary of Vitebsk State Technological University. In 2 vols., Vitebsk, April 16-17, 2025. Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2025. P. 411-414. EDN DNVBKE.
8. Y., Warif, A., Ghassan, M., Al-Neama, A., Hasan. Traveling Salesman Problem Methods of Solution Survey. International Journal of Psychosocial Rehabilitation. Vol. 24, 2020, P. 8565-85816. DOI 10.37200/IJPR/V24I5/PR2023807.

9. Кальметьев Э.И. Анализ алгоритмов кратчайшего пути: сравнительный обзор методов маршрутизации / Э.И. Кальметьев, А.Е. Сергеева // Международный студенческий научный вестник. – 2025. – № 3. – С. 65.
10. S.Saller, J. Koehler, A. Karrenbauer A survey on approximability of traveling salesman problems using the TSP-T3CO definition scheme. Ann Oper Res 351, P. 2129–2190 (2025). https://doi.org/10.1007/s10479-025-06641-5
11. C. Zhang, Y. Wu, T. Feng, Benders decomposition for traveling salesman problem with drone: A space-time-state network perspective, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 179, 2025, 105255, ISSN 0968-090X, https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105255.
12. Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Динамическое программирование и декомпозиция в задачах маршрутизации с ограничениями предшествования // Дифференциальные игры, теория управления и оптимизация (DGCTO-2025): Материалы Всероссийской конференции, посвященной памяти профессора В.И. Ухоботова, Челябинск, 19–21 мая 2025 года. – Челябинск: Челябинский государственный университет, 2025. – С. 265-268. – EDN QXGLWO.
13. J. Dibangoye, C. Solnon, Exact and anytime approach for solving the time dependent traveling salesman problem with time windows, European Journal of Operational Research, Volume 311, Issue 3, 2023, P. 833-844, ISSN 0377-2217, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.001.
14. Wissink, P.L.J. The Traveling Salesman Problem with Stochastic and Correlated Customers / P. L. J. Wissink // Transportation Science. – 2023. – Vol. 57, No. 5. – P. 1321-1339. – DOI 10.1287/trsc.2022.0005. – EDN NEXNCO.
15. T. Adamo, M. Gendreau, G. Ghiani, A review of recent advances in time-dependent vehicle routing, European Journal of Operational Research, Volume 319, Issue 1, 2024, P. 1-15, ISSN 0377-2217, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.016
16. Тюрин А.Ю. Анализ моделей построения маршрутов перевозок грузов со случайными данными / А.Ю. Тюрин // Россия молодая: Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года / Редколлегия: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 52410.1-52410.6. – EDN LUIABI.
17. Съедин Д.Ю. Разработка модификации стохастического алгоритма глобальной оптимизации PCA, обеспечивающей приближенное решение задачи коммивояжера // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2024. – № 1. – С. 1-10. – DOI 10.36535/0548-0027-2024-01-1. – EDN JIJRMV.
18. Игнатьев Ю.В., Афанасьев Г.И. Методы искусственного интеллекта для краткосрочного планирования на примере процесса отпуска нефтепродукта // Computational

9. Kalmetyev, E.I. Analysis of Shortest Path Algorithms: A Comparative Review of Routing Methods / E.I. Kalmetyev, A.E. Sergeeva // International Student Scientific Bulletin. 2025. No. 3. P. 65.
10. S. Saller, J. Koehler, A. Karrenbauer. A survey on approximability of traveling salesman problems using the TSP-T3CO definition scheme. Annals of Operations Research, 351, P. 2129-2190, 2025. https://doi.org/10.1007/s10479-025-06641-5
11. C. Zhang, Y. Wu, T. Feng, Benders decomposition for traveling salesman problem with drone: A space-time-state network perspective, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 179, 2025, 105255, ISSN 0968-090X, https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105255.
12. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A. Dynamic Programming and Decomposition in Routing Problems with Precedence Constraints // Differential Games, Control Theory and Optimization (DGCTO-2025): Proceedings of the All-Russian Conference Dedicated to the Memory of Professor V.I. Ukhobotov, Chelyabinsk, May 19-21, 2025. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University, 2025. P. 265-268. EDN QXGLWO.
13. J. Dibangoye, C. Solnon, Exact and anytime approach for solving the time dependent traveling salesman problem with time windows, European Journal of Operational Research, Volume 311, Issue 3, 2023, P. 833-844, ISSN 0377-2217, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.001.
14. Wissink, P.L.J. The Traveling Salesman Problem with Stochastic and Correlated Customers / P.L.J. Wissink // Transportation Science. 2023. Vol. 57, No. 5. P. 1321-1339. DOI 10.1287/trsc.2022.0005. EDN NEXNCO.
15. T. Adamo, M. Gendreau, G. Ghiani, A review of recent advances in time-dependent vehicle routing, European Journal of Operational Research, Volume 319, Issue 1, 2024, P. 1-15, ISSN 0377-2217, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.016.
16. Tyurin, A.Y. Analysis of Freight Transportation Route Planning Models with Random Data / A.Yu. Tyurin // Young Russia: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Kemerovo, April 20-23, 2021 / Editorial Board: K.S. Kostikov, Editor-in-Chief, et al. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2021. P. 52410.1-52410.6. EDN LUIABI.
17. Syedin, D.Y. Development of a Modification of the PCA Stochastic Global Optimization Algorithm Providing an Approximate Solution to the Traveling Salesman Problem // Scientific and Technical Information. Series 2: Information Processes and Systems. 2024. No. 1. P. 1–10. DOI 10.36535/0548-0027-2024-01-1. EDN JIJRMV.
18. Ignatiev, Y.V., Afanasyev, G.I. Artificial Intelligence Methods for Short-Term Planning: The Case of the Petroleum Product Dispatch Process // Computational Nanotechnology. 2025. Vol. 12, No. 2. P. 37-47. DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-37-47. EDN QHHQAP.

Nanotechnology. – 2025. – Т. 12, № 2. – С. 37–47. – DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-37-47. – EDN QHHQAP.
19. Sui, J., Ding, S., Huang, X. et al. A survey on deep learning-based algorithms for the traveling salesman problem. Front. Comput. Sci. 19, 196322 (2025). https://doi.org/10.1007/s11704-024-40490-y.
20. H. Yang, M. Zhao, L. Yuan, Memory-efficient Transformer-based network model for Traveling Salesman Problem, Neural Networks, Volume 161, 2023, P. 589-597, ISSN 0893-6080, https://doi.org/10.1016/j.neunet.2023.02.014.
21. D. Chen, C. Imdahl, D. Lai, The Dynamic Traveling Salesman Problem with Time-Dependent and Stochastic travel times: A deep reinforcement learning approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 172, 2025, 105022, ISSN 0968-090X, https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105022.
22. Макаров Г.В., Кольчурина И.Ю., Кольчурина М.А. Программа «Калькулятор расчета подвижного состава железнодорожной станции» : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026615363, Российская Федерация. № 2026614025 ; заявл. 13.02.2026 ; опубл. 25.02.2026, Бюл. № 3 / правообладатель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».
23. Цепаев Р.Е. К вопросу об обеспечении тяговыми ресурсами железнодорожного пути необщего пользования / Р.Е. Цепаев, Д.Ю. Гришкова // Актуальные проблемы транспорта в XXI веке: труды V Международной научно-практической конференции / Сибирский государственный индустриальный университет; под ред. Т.Н. Борисова, О.В. Князькина, И.Ю. Кольчурина, О. П. Черникова. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2026. – Ч. 1. – С. 363–369. – ISSN 2949-0804.
24. Кольчурина И.Ю., Кольчурина М.А. Анализ потока создания ценности процесса перевозки грузов в производственной системе металлургического предприятия // Технологии менеджмента в современной экономике: тенденции и перспективы: материалы VI Международной научной конференции (Ростов-на-Дону, 13–14 марта 2026 г.): в 3 т. / отв. ред. М.В. Чараева, Е.Н. Карпова; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательско-полиграфический комплекс Южного федерального университета, 2026. – Ч. 1. – С. 349–356.
25. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.

19. Sui, J., Ding, S., Huang, X. et al. A survey on deep learning-based algorithms for the traveling salesman problem. Frontiers of Computer Science 19, 196322, 2025. https://doi.org/10.1007/s11704-024-40490-y.
20. H. Yang, M. Zhao, L. Yuan, Memory-efficient Transformer-based network model for Traveling Salesman Problem, Neural Networks, Volume 161, 2023, P. 589-597, ISSN 0893-6080, https://doi.org/10.1016/j.neunet.2023.02.014.
21. D. Chen, C. Imdahl, D. Lai, The Dynamic Traveling Salesman Problem with Time-Dependent and Stochastic travel times: A deep reinforcement learning approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 172, 2025, 105022, ISSN 0968-090X, https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105022.
22. Makarov, G.V., Kolchurina, I.Y., Kolchurina M.A. Software Program “Railway Station Rolling Stock Calculation Calculator”: Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2026615363, Russian Federation. Application No. 2026614025; filed February 13, 2026; published February 25, 2026, Bulletin No. 3 / Rights holder: Siberian State Industrial University.
23. Tsepaev, R.E. On the Provision of Traction Resources for Non-Public Railway Tracks / R.E. Tsepaev, D.Yu. Grishkova // Current Transport Issues in the 21st Century: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference / Siberian State Industrial University; ed. by T.N. Borisov, O.V. Knyazkina, I.Yu. Kolchurina, O.P. Chernikova. Novokuznetsk: Publishing Center of Siberian State Industrial University, 2026. Part 1. P. 363-369. ISSN 2949-0804.
24. Kolchurina, I.Y., Kolchurina, M.A. Value Stream Analysis of the Freight Transportation Process in the Production System of a Metallurgical Enterprise // Management Technologies in the Modern Economy: Trends and Prospects: Proceedings of the VI International Scientific Conference, Rostov-on-Don, March 13-14, 2026: in 3 vols. / Executive Editors M.V. Charaeva, E.N. Karpova; Southern Federal University. Rostov-on-Don; Taganrog: Publishing and Printing Complex of Southern Federal University, 2026. Part 1. P. 349-356.
25. Rotach, V.Y. Automatic Control Theory: Textbook for Universities. 5th ed., revised and enlarged. Moscow: MEI Publishing House, 2008. 396 p.