

УДК 656.2.025.4 + 004.891

# МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИОРИТЕТОВ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ САМОХОДНЫХ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

ГОНЧАРОВА Наталья Александровна, инженер<sup>1</sup>; аспирант<sup>2</sup>; e-mail: nataliegoncharova@list.ru

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Лаборатория № 6 НИО-101, Москва

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Высшая школа транспорта, Санкт-Петербург

Рассматривается применение аппарата нечеткой логики в задачах оптимизации последовательности выполнения операций, требующих задействования самоходных подвижных единиц на промышленном железнодорожном транспорте. Проанализированы последствия использования в качестве приоритетов операций константных значений, вычисленных аналитическим путем. Описываются тип дисциплины очереди и специфика ограничений на пребывание заявок в очереди, характерные для железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем. Исследуются преимущества и недостатки существующих методов выстраивания в очередь грузовых операций, предусмотренных суточным планом работы, в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Выявлены ограничения, возникающие при использовании методов классической теории расписаний. Нахождение оптимальной последовательности операций в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах предполагает планирование движения для нескольких подвижных единиц одновременно, что не рассматривается в классической теории графов. Классическая задача нахождения кратчайшего пути и ее известные алгоритмы решения работают только со статичными графами, а для железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем характерны быстрые изменения состояния графа. Проанализированы проблемы, вызванные динамичностью состояния графа в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Применение методов нечеткой логики позволит выстраивать оптимальную последовательность выполнения операций на базе неполной и неточной информации и решать ряд задач оперативного планирования грузовых операций без точных вычислений. Ожидаемым результатом применения метода нахождения динамических приоритетов операций, реализованного в нейро-нечетком модуле, является повышение адаптивности оперативного планирования грузовой работы и сокращение времени задействования и потребного количества самоходных подвижных единиц.

**Ключевые слова:** оперативное управление вагонопотоком; время ожидания в очереди; дисциплина очереди; назначение приоритетов; оптимизация задействования подвижных единиц; нейро-нечеткий модуль.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-274-282

## ▼ Введение

Несогласованность ритмов производственных и транспортных процессов создает дополнительную сложность в прогнозировании интенсивности потока событий в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Кроме того, растет степень влияния дестабилизирующих факторов на работу таких систем. Постоянно нарастающая неравномерность образования вагонопотоков делают актуальным поиск эффективных

методов планирования грузовой работы [1–3]. Наиболее важным, по мнению автора, является качество оперативного планирования. Одно из направлений повышения его качества — совершенствование методов выстраивания в очередь технологических операций, предусмотренных суточным планом работы. В современных условиях адаптивность методов планирования грузовой работы является необходимым условием устойчивости системы к влиянию дестабилизирующих факторов.

В большинстве железнодорожных интеллектуальных транспортных систем основным информационным объектом до сих пор остается вагон [4–7], а выполняемые с ним операции представлены в базах данных как реквизиты (параметры) этого объекта. В то же время первое место в рейтинге причин нарушения сроков доставки грузов (46,1 % от общего количества просрочек) занимают причины, связанные с недостаточностью собственного парка локомотивов предприятия, отсутствием или ожиданием локомотива и (или) локомотивной бригады перевозчика [8]. Сложности в процессе своевременной обработки вагонопотоков во многом являются следствием проблем неэффективного использования локомотивов и локомотивных бригад. Проблемы нерационального использования локомотивного парка создают риски неравномерного поступления порожних вагонов под погрузку, сгущенного прибытия порожних вагонов на станционные пути, непроизводительных простоев в ожидании подачи вагонов на пути необщего пользования. Для обеспечения ритмичности работы железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем необходим поиск адаптивных технологий планирования работы локомотивного парка.

### **1. Проблемы и ограничения существующих подходов к определению оптимальной очередности технологических операций на промышленном железнодорожном транспорте**

Задачи определения оптимальной очередности операций, выполняемых в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах, традиционно исследуются в теории массового обслуживания, теории управляемых марковских процессов и теории расписаний.

Рассматриваемые в данной статье железнодорожные промышленные транспортно-технологические системы относятся к многоканальным системам массового обслуживания с очередью. В современных технических системах встречается три вида дисциплины очереди — со случайным выбором заявки из

очереди на обслуживание, с выбором заявки из очереди в зависимости от ее приоритета и с выбором заявки в зависимости от порядка ее поступления в очередь [9]. В железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах используется дисциплина очереди, комбинирующая второй и третий виды. В большинстве систем на пребывание заявок в очереди накладывается ряд ограничений по длине очереди, времени пребывания заявки в очереди, общему времени пребывания заявки в системе и т. п. В железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах эти ограничения обусловлены требованиями по соблюдению сроков доставки, штрафами за сверхнормативный простой вагонов, нормативами времени выполнения грузовых операций.

Наиболее часто для решения задач определения оптимальной очередности выполнения технологических операций используются методы сокращенного перебора (методы ветвей и границ). Широко распространено применение метаэвристических алгоритмов, которые находят решение, близкое к оптимальному, за приемлемое время. Недостатком таких алгоритмов является отсутствие оценок качества полученного решения [10].

Анализ существующих подходов выявил ряд ограничений в решении задач определения оптимальной очередности выполнения технологических операций на промышленном железнодорожном транспорте. Согласно теории расписаний, эта задача относится к типу «Построение расписания для приборов» (Machine Scheduling) с назначением требований исполнителям, в то же время классическая теория расписаний не рассматривает задачи минимизации количества исполнителей. Решение рассматриваемой задачи предполагает планирование движения для нескольких подвижных единиц одновременно, что не рассматривается в классической теории графов. Классическая задача нахождения кратчайшего пути и ее известные алгоритмы решения (алгоритм Дейкстры и др.) работают только со статическими графами, а для железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем характерны быстрые изменения состояния графа.

Железнодорожный путь может многократно в течение короткого промежутка времени менять статус занятости, и текущая занятость пути не отменяет возможности его скорого дальнейшего использования [11]. Динамичность и изменение состояния графа создают дополнительную вычислительную нагрузку. Задачи поиска некоторых оптимальных путей в нечетком графе исследованы в [12].

В задаче определения оптимальной очередности выполнения технологических операций используется большое количество критериев, что увеличивает размерность задачи. Задачи дискретной оптимизации при количестве требований более 60 относятся к трудным и экстремально трудным недетерминированным полиномиальным задачам в терминах теории расписаний. Если вычислительных средств недостаточно для решения задачи, то следует реформировать не задачу (терять ее адекватность), а совершенствовать программно-техническое обеспечение процесса моделирования [13].

В большинстве методов совершенствования оперативного управления вагонопотоками в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах в качестве приоритетов операций используются константные значения, вычисленные аналитическим путем. Использование констант в качестве приоритетов приводит к постоянному откладыванию задач, не обладающих высокой приоритетностью, но добавленных в очередь давно. Это создает риск невыполнения таких операций в условиях постоянного поступления более значимых задач.

Недостаточность функционала существующих стационарных систем управления движением для решения задач организации, планирования, контроля и коррекции транспортных технологических процессов отмечается в [14, 15]. В зарубежных странах нейросетевое моделирование активно используется для совершенствования работы железнодорожных транспортно-технологических систем [16–20]. В последние годы оно начинает развиваться и в России. В [21, 22] классифицируются научные проблемы, которые могут решаться с использованием искусственных нейронных сетей. На магистральном транспорте уже есть примеры

успешного использования нейросетевых технологий. Например, в [23] описано применение аппарата искусственных нейронных сетей в работе сортировочной станции. В [24] приведен пример использования нейро-нечеткого моделирования и генетического алгоритма для создания автоматизированной системы управления формированием оптимальных маршрутов движения поездов. В [25] рассматривается применение вероятностной нейронной сети для прогнозирования динамических показателей, характеризующих перевозочный процесс. На промышленном железнодорожном транспорте процесс внедрения инновационных технологий идет более медленными темпами, чем на магистральном, подобные разработки носят точечный характер и имеют ограниченные возможности тиражирования [26].

На современном этапе применение классических графоаналитических методов и методов теории массового обслуживания в планировании грузовой работы становится недостаточным, необходимо дополнять их методами принятия решений на основе неточных и неполных данных. Современные интеллектуальные транспортные системы позволяют интегрировать опыт и знания специалистов в алгоритмы управления. Применение методов нечеткой логики позволит принимать оптимальные решения на базе неполной и неточной информации и решать ряд задач планирования грузовых операций без точных вычислений.

## **2. Цель и задачи разработки нейро-нечеткого модуля расчета оптимальной последовательности выполнения технологических операций**

В данной работе рассматриваются методы выстраивания в очередь грузовых операций, требующих задействования тяговых подвижных единиц, с целью сокращения времени выполнения операций и количества обслуживаемых устройств. Целью исследования является оптимизация задействования подвижных единиц для выполнения суточного плана грузовой работы в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

- разработка оптимальной последовательности выполнения технологических операций с подвижными единицами;
- разработка метода расчета динамических приоритетов для каждой операции.

При выстраивании грузовых операций в очередь нечеткими понятиями являются «приоритет задачи» и «время ожидания задачи в очереди на выполнение». В данной статье под приоритетом задачи будем понимать величину  $x_{ij}^k$ , характеризующую степень срочности выполнения технологической операции. Эта переменная может принимать любое значение в интервале от 0 до 1:

$$x_{ij}^k \in \{0,1\},$$

где  $i..j$  — заявки на выполнение операций, поступающие в систему;

$k$  — номер итерации процесса расчета приоритетов.

В железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах эти значения задаются маневровым диспетчером, и процесс определения приоритетности операций часто носит интуитивный характер. В памяти оперативных работников накапливаются типовые ситуации и рациональные решения к ним. Для приобретения навыков принятия правильных решений в условиях ограниченного времени в среднем требуется несколько лет накопления опыта. Четко сформулировать принципы успешной работы маневрового диспетчера не представляется возможным. Уже в 1980-х гг. при разработке первой системы горочной автоматизации возникла ситуация, когда усложнение математики, заложенной в алгоритмы управления, перестало повышать эффективность регулирования скоростей скатывания отцепов. При этом опытные операторы принимали эффективные решения в самых сложных технологических ситуациях [27].

В данной работе предлагается метод нахождения динамических приоритетов, сокращающий время использования подвижных единиц, реализованный в нейро-нечетком модуле. Процесс выстраивания оптимальной последовательности операций, выполняемых тяговым подвижным составом, осложняется

необходимостью нахождения не только зависимости конечного приоритета, но и общего вида функции.

### 3. Динамический процесс вычисления величины приоритета грузовых операций нейро-нечетким модулем

Вычисление конечного приоритета задачи нейро-нечетким модулем требует учета двух величин — времени ожидания задачи в очереди и собственного приоритета задачи:

$$F = \sum_k \sum_{i,j} t_{ij}^k x_{ij}^k \rightarrow \min,$$

где  $t_{ij}^k$  — время ожидания операции в очереди на выполнение;

$x_{ij}^k$  — приоритет, присваиваемый операции, поступившей в систему. Необходимо соблюдение следующих условий:

$$x_{ij}^k \in \{0,1\},$$

$$\sum_i x_{ij}^k \leq 1,$$

$$\sum_j x_{ij}^k \leq 1,$$

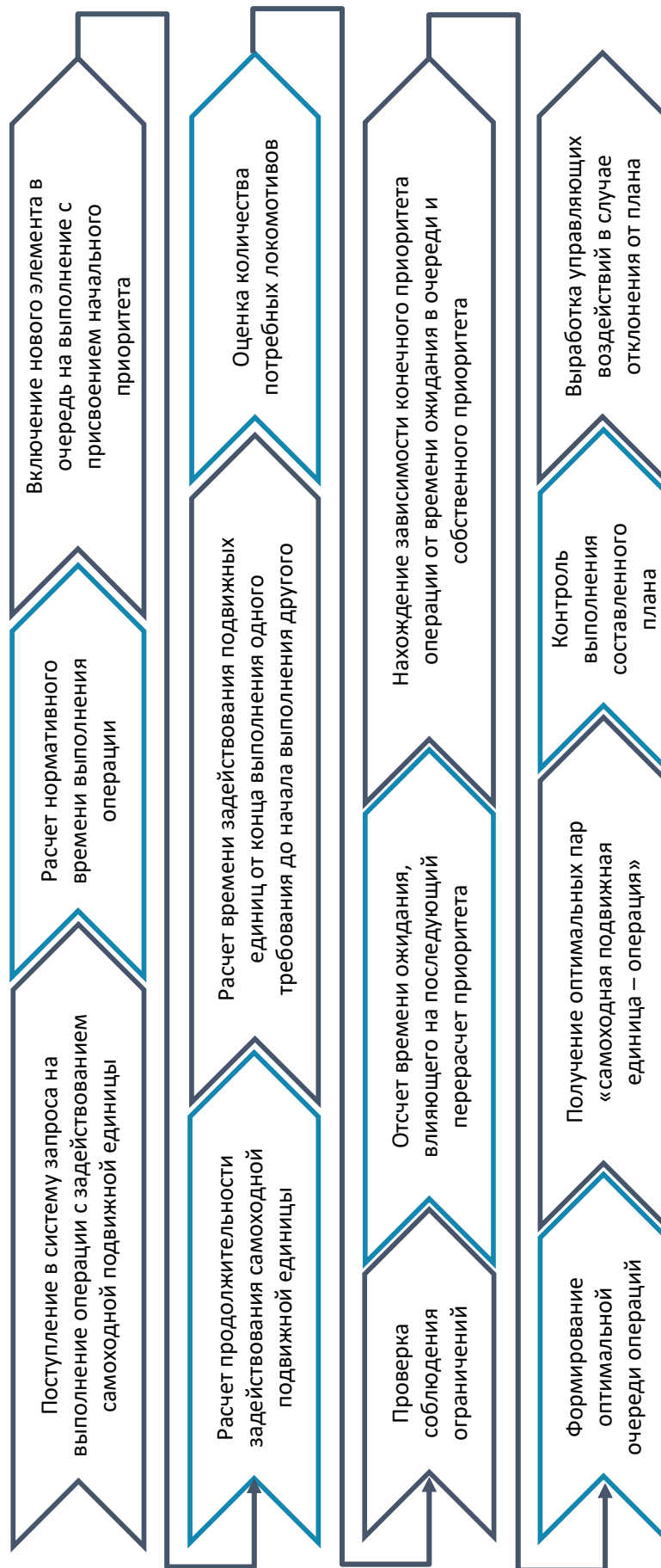
$$\sum_{i,j} x_{ij}^k = N,$$

где  $k$  — номер итерации процесса расчета приоритетов;

$N$  — количество задействованных тяговых единиц.

Динамический процесс вычисления величины приоритета позволяет оптимизировать порядок выполнения грузовых операций. На первом этапе производится расчет оптимального пути движения состава, который позволяет уменьшить время эксплуатации локомотивного парка. На втором этапе происходит расчет времени выполнения операций и оптимальной последовательности выполнения операций (посредством расчета динамического приоритета задач).

Последовательность действий, выполняемых для разработки расписания задействования



Последовательность разработки нейро-нечетким модулем расписания задействования самоходных подвижных единиц

самоходных подвижных единиц с целью минимизации времени и ресурса тягового подвижного состава, представлена на рисунке.

Пересчет приоритетов происходит каждый раз, когда в систему поступает запрос на выполнение новой операции, требующей задействования самоходных подвижных единиц. Таким образом, реализуется  $k$  итераций процесса расчета приоритетов. Примеры расчета нечетким модулем приоритетов операций и оценка достоверности полученных результатов для транспортно-технологических систем крупных промышленных предприятий с большими объемами погрузки (выгрузки) представлены в [28], в последующих исследованиях будет рассмотрен вычислительный пример, проведена верификация данного модуля для систем со средней и малой интенсивностью грузовой работы.

### Заключение

Ожидаемым результатом применения предлагаемого метода расчета динамических приоритетов операций является минимизация времени использования самоходных подвижных единиц в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах и сокращение их потребного количества.

Предлагаемый метод позволит решать задачу выстраивания операций в очередь как задачу линейного программирования симплекс-методом при заданных ограничениях. Полученные нейро-нечетким модулем значения будут использоваться как коэффициенты в задаче линейного программирования для определения оптимальных пар «локомотив — операция».

К достоинствам предлагаемого метода можно отнести универсальность, широкие возможности тиражирования, а также отсутствие необходимости длительного обучения оперативного персонала приемам работы с нейро-нечетким модулем расчета приоритетности выполнения операций. Совершенствование программно-технического обеспечения процесса принятия решений в оперативной работе позволит сократить число ошибок, связанных с человеческим фактором.

Дальнейшим направлением исследования станет разработка таких методик расчета приоритетности операций, которые позволят учитывать вопросы принадлежности подвижных

единиц. Это поможет сократить расходы предприятия на привлечение подвижного состава, находящегося в собственности сторонних организаций. ▲

### Библиографический список

1. Шаров В. А. Новые риски при реализации единого интегрированного планирования на железнодорожном транспорте общего пользования / В. А. Шаров // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 2. — С. 87–93.
2. Подорин А. А. Анализ и моделирование вагонопотоков для задач организации железнодорожных перевозок на основе статистических и прогнозных данных в условиях их неоднородности / А. А. Подорин, С. Л. Щепанов, Д. В. Рубцов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой международной конференции. — Москва, 27–29 сентября 2021 года / Под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. — С. 1037–1041. — DOI: 10.25728/6989.2021.59.54.001.
3. Бедрин Д. С. Трансформация методологии планирования и прогнозирования перевозок грузов на железнодорожном транспорте / Д. С. Бедрин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — № 4. — С. 5–23. — DOI: 10.20295/2223-9987-2020-4-5-23.
4. Золотарев С. А. Методика формирования состава грузового поезда на путях промышленных предприятий вагонами различных операторов / С. А. Золотарев, А. Д. Сиразетдинова // Бюллетень транспортной информации. — 2017. — № 8(266). — С. 3–7.
5. Бельницкий Д. С. Проблема избыточного парка грузовых вагонов / Д. С. Бельницкий, А. П. Иванов, И. Н. Панкратов и др. // Вестник транспорта. — 2015. — № 4. — С. 19–21.
6. Югина О. П. Особенности эффективного использования приватного вагонного парка операторской компании / О. П. Югина, С. Ю. Соснин // Вестник УрГУПС. — Екатеринбург: УрГУПС, 2017. — № 1(33). — С. 84–90.
7. Сергеева Т. Г. Современные методы управления парком частных вагонов / Т. Г. Сергеева // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 95–102. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-95-102.
8. Солоп И. А. Причинно-следственный анализ выполнения надежности доставки грузов железнодорожным транспортом в адрес потребителей Южного региона и портов Азово-Черноморского бассейна / И. А. Солоп, Е. А. Чеботарева // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 3(50). — С. 54.
9. Булыгина О. В. Назначение приоритетов в технологических хабах на основе имитационного моделирования и нечеткой логики / О. В. Булыгина, А. А. Емельянов,

- Н. З. Емельянова // Прикладная информатика. — 2017. — Т. 12. — № 5(71). — С. 71–92.
10. Могилев А. А. Обзор методов решения задач теории расписаний / А. А. Могилев // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. — 2019. — № 4(37). — С. 19–32.
11. Багинова В. В. Применение алгоритмов маршрутизации агента при разработке дискретно-событийных имитационных моделей с использованием инструментов железнодорожной библиотеки Anylogic / В. В. Багинова, Д. В. Кузьмин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2023. — № 2(58). — С. 109–118. — DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118.
12. Сперанский Д. В. Поиск оптимальных путей в нечетких графах / Д. В. Сперанский // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 418–426. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-418-426.
13. Числов О. Н. Нейросетевое исследование транспортных систем / О. Н. Числов, Н. Н. Лябах, М. В. Колесников и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2021. — № 10. — С. 9–13. — DOI: 10.36535/0236-1914-2021-10-2.
14. Ефанов Д. В. Принципы автоматизации процессов управления движением на железных дорогах промышленных предприятий / Д. В. Ефанов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 6(85). — С. 27–33.
15. Lekarev A. G. The Integrated Approach to Automation and Digitalization of the Transport Processes in the Industrial Enterprises / A. G. Lekarev, M. G. Ammosov, D. V. Efanov et al. // Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2020), Varna, Bulgaria, September 4–7, 2020. — Pp. 346–350. — DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224687.
16. Tang R. A Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Railway Systems / R. Tang, L. De Donato, N. Bešinović et al. // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. — 2022. — DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679.
17. Bešinović N. Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations, and Applications / N. Bešinović et al. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Sept. 2022. — Vol. 23. — Iss. 9. — Pp. 14011–14024. — DOI: 10.1109/TITS.2021.3131637.
18. Cerreto F. Application of Data Clustering to Railway Delay Pattern Recognition / F. Cerreto, B. F. Nielsen, O. A. Nielsen et al. // Journal of Advanced Transportation. — 2018. — Vol. 2018, Article ID 6164534. — 18 p. — DOI: 10.1155/2018/6164534.
19. Zhu Yo. Dynamic railway timetable rescheduling for multiple connected disruptions / Yo. Zhu, R. Goverde // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. — 2021. — Iss. 125. — DOI: 10.1016/j.trc.2021.103080.
20. Binder S. The multi-objective railway timetable rescheduling problem / S. Binder, Yo. Maknoon, M. Bierlaire // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2016. — Iss. 78. — DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
21. Сивицкий Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / Д. А. Сивицкий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 2(57). — С. 33–41. — DOI: 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_33.
22. Понятов А. А. Возможности применения нейросетевых технологий на железнодорожном транспорте / А. А. Понятов // Актуальные проблемы современного транспорта. — 2022. — № 2-3(9-10). — С. 62–70.
23. Обухов А. Д. Применение нейросетевых технологий в управлении сортировочной станцией / А. Д. Обухов // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 7. — С. 14–16
24. Dolgopolov P. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms / P. Dolgopolov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko et al. // Procedia Computer Science. — 2019. — Iss. 149. — Pp. 11–18. — DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
25. Краковский Ю. М. Бинарное прогнозирование динамических показателей на основе методов машинного обучения / Ю. М. Краковский, О. К. Куклина // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 62. — С. 50–55. — DOI: 10.17223/19988605/62/5.
26. Гончарова Н. А. Специфика оперативного управления вагонопотоками в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах / Н. А. Гончарова // Транспортные системы: сборник материалов Международной научной онлайн-конференции для молодых ученых и аспирантов, Санкт-Петербург, 29 ноября 2022 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. — С. 74–77. — DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-14.
27. Колесников В. И. Интеллектуализация транспортных процессов на основе гибридных технологий и мульти-агентных систем / В. И. Колесников, С. М. Ковалев, В. Н. Иванченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2012. — № 1(45). — С. 107–113.
28. Bogdanova L. Neuro-fuzzy-based mathematical model of dispatching of an industrial railway junction / L. Bogdanova, S. Nagibin, D. Loskutov // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. — 2023. — Vol. 12. — Iss. 1. — Pp. 502–513. — DOI: 10.11591/eei.v12i1.4055.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 274–282  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-274-282

### Method for Assigning Dynamic Priorities of Freight Operations for Optimizing the Traction Rolling Stock Using in Railway Industrial Transport and Technological Systems

#### Information about author

Goncharova N. A., Engineer<sup>1</sup>; Postgraduate Student<sup>2</sup>.

E-mail: nataliegoncharova@list.ru

<sup>1</sup>Laboratory № 6, Research Department № 101, Moscow Aviation Institute, Moscow

<sup>2</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Higher School of Transport, Saint Petersburg

**Abstract:** The application of fuzzy logic is considered in optimizing the sequence of operations that involve the traction rolling stock using in industrial railway transportation. The consequences of using constant values calculated analytically as operation priorities have been analyzed. The article describes the queue discipline type and the features of restrictions for waiting time of requests in the queue in railway industrial transport and technological systems. The advantages and disadvantages of existing methods for queuing freight operations provided for daily schedule in railway industrial transport and technological systems are investigated. It is revealed that the use of classical scheduling theory methods has obstacles. Finding the optimal sequence of operations in railway industrial transport and technological systems involves simultaneous movement planning for multiple mobile units, which is not considered in classical graph theory. The classical problem of the shortest way finding and its known solving algorithms deal only with static graphs, while railway industrial transport and technological systems are characterized by rapid changes in the graph's state. The problems caused by the dynamic nature of the graph's state in railway industrial transport and technological systems have been analyzed. The fuzzy logic methods application makes it possible to determine an optimal sequence of operations based on incomplete and imprecise information and to solve freight operational planning tasks without precise calculations. The expected result of applying the method for assigning dynamic operation priorities implemented in the neuro-fuzzy module is an increase in the adaptability of freight operations planning, reducing the required number of locomotives and declining the time of traction rolling stock using.

**Keywords:** operational traffic control; queue waiting time; queue discipline; priorities calculating; rolling stock assignment optimization; neuro-fuzzy module.

#### References

1. Sharov V. A. Noveye riski pri realizatsii edinogo integririvannogo planirovaniya na zheleznodorozhnom transporte obshchego pol'zovaniya [New risks in the implementation of a single integrated planning for public railway transport]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2016, Iss. 2, pp. 87–93. (In Russian)
2. Podorin A. A., Shchepanov S. L., Rubtsov D. V.; pod obshch. red. S. N. Vasil'eva, A. D. Tsvirkuna Analiz i modelirovanie vagonopotokov dlya zadach organizatsii zheleznodorozhnykh perevozok na osnove statisticheskikh i prognozykh dannykh v usloviyakh ikh neodnorodnosti [Analysis and modeling of car flows for the problems of organizing rail transportation based on statistical and forecast data in conditions of their heterogeneity]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2021): trudy Chetyrnadtsatoy mezhdunarodnoy konferentsii. Moskva, 27–29 sentyabrya 2021 goda* [Management of the development of large-scale systems. (MLSD'2021): Proceedings of the Fourteenth International Conference. Moscow, September 27–29, 2021]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN Publ., 2021, pp. 1037–1041. DOI: 10.25728/6989.2021.59.54.001. (In Russian)
3. Bedrin D. S. Transformatsiya metodologii planirovaniya i prognozirovaniya perevozok gruzov na zheleznodorozhnom transporte [Transformation of the methodology of planning and forecasting cargo transportation on railway transport]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2020, Iss. 4, pp. 5–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-4-5-23. (In Russian)
4. Zolotarev S. A., Sirazetdinova A. D. Metodika formirovaniya sostava gruzovogo poezda na putyakh promyshlennykh predpriyatiy vagonami razlichnykh operatorov [The method of forming the composition of a freight train on the tracks of industrial enterprises by cars of various operators]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2017, Iss. 8(266), pp. 3–7. (In Russian)
5. Bel'nitskiy D. S., Ivanov A. P., Pankratov I. N. Problema izbytochnogo parka gruzovykh vagonov [The problem of an excess fleet of freight cars]. *Vestnik transporta* [Science journal of transportation]. 2015, Iss. 4, pp. 19–21. (In Russian)
6. Yugrina O. P., Sosnin S. Yu. Osobennosti effektivnogo ispol'zovaniya privatnogo vagonnogo parka operatorskoy kompanii [Features of the effective use of the private rolling stock of the operating company]. *Vestnik UrGUPS* [Bulletin of UrGUPS]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2017, Iss. 1(33), pp. 84–90. (In Russian)
7. Sergeeva T. G. Sovremennyye metody upravleniya parkom privatnykh vagonov [Modern methods of managing the fleet of private cars]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 95–102. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-95-102. (In Russian)
8. Solop I. A., Chebotareva E. A. Prichinno-sledstvennyy analiz vypolneniya nadezhnosti dostavki gruzov zheleznodorozhnym transportom v adres potrebiteley Yuzhnogo regiona i portov Azovo-Chernomorskogo basseyna [Cause-and-effect analysis of the implementation of the reliability of cargo delivery by rail to consumers in the Southern region and ports of the Azov-Black Sea basin]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018, Iss. 3(50), pp. 54. (In Russian)
9. Bulygina O. V., Emel'yanov A. A., Emel'yanova N. Z. Naznachenie prioritetov v tekhnologicheskikh khabakh na osnove imitatsionnogo modelirovaniya i nechetkoy logiki [Prioritization in technology hubs based on simulation and fuzzy logic]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics]. 2017, vol. 12, Iss. 5(71), pp. 71–92. (In Russian)
10. Mogilev A. A. Obzor metodov resheniya zadach teorii raspisaniy [Review of methods for solving scheduling problems]. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, computer science and engineering education]. 2019, Iss. 4(37), pp. 19–32. (In Russian)
11. Baginova V. V., Kuz'min D. V. Primenenie algoritmov marshrutizatsii agenta pri razrabotke diskretno-sobytiynykh imitatsionnykh modeley s ispol'zovaniem instrumentov zheleznodorozhnoy biblioteki Anylogic [Application of agent routing algorithms in the development of discrete-event simulation models using the tools of the Anylogic railway library]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2023, Iss. 2(58), pp. 109–118. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118. (In Russian)
12. Speranskiy D. V. Poisk optimal'nykh putey v nechetkikh grafakh [Search for optimal paths in fuzzy graphs]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 418–426. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-418-426. (In Russian)
13. Chislov O. N., Lyabakh N. N., Kolesnikov M. V. Neyrosetevoye issledovanie transportnykh sistem [Neural network research of transport systems]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2021, Iss. 10, pp. 9–13. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-10-2. (In Russian)
14. Efanov D. V. Printsipy avtomatizatsii protsessov upravleniya dvizheniem na zheleznykh dorogakh promyshlennykh predpriyatiy [Principles of automation of



- traffic control processes on the railways of industrial enterprises]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 6(85), pp. 27–33. (In Russian)
15. Lekarev A. G., Ammosov M. G., Efanov D. V. et al. The Integrated Approach to Automation and Digitalization of the Transport Processes in the Industrial Enterprises. Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTSS'2020), Varna, Bulgaria, September 4–7, 2020, pp. 346–350. DOI: 10.1109/EWDTSS0664.2020.9224687.
  16. Tang R., Donato L. De, Bešinović N. et al. A Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Railway Systems. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2022. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679.
  17. Bešinović N. et al. Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations, and Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Sept. 2022, vol. 23, Iss. 9, pp. 14011–14024. DOI: 10.1109/TITS.2021.3131637.
  18. Cerreto F., Nielsen B. F., Nielsen O. A. et al. Application of Data Clustering to Railway Delay Pattern Recognition. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, vol. 2018, Article ID 6164534, 18 p. DOI: 10.1155/2018/6164534.
  19. Zhu Yo., Goverde R. Dynamic railway timetable rescheduling for multiple connected disruptions. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2021, Iss. 125. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103080.
  20. Binder S., Maknoon Yo., Bierlaire M. The multi-objective railway timetable rescheduling problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, Iss. 78. DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
  21. Sivitskiy D. A. Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neyronnykh setey na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of the experience and prospects for the use of artificial neural networks in railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2021, Iss. 2(57), pp. 33–41. DOI: 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_33. (In Russian)
  22. Ponyatov A. A. Vozможности primeneniya neyrosetevykh tekhnologiy na zheleznodorozhnom transporte [Possibilities of using neural network technologies in railway transport]. *Aktual'nye problemy sovremennogo transporta* [Actual problems of modern transport]. 2022, Iss. 2-3(9-10), pp. 62–70. (In Russian)
  23. Obukhov A. D. Primenenie neyrosetevykh tekhnologiy v upravlenii sortirovochnoy stantsiy [Application of neural network technologies in the management of marshalling yards]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2017, Iss. 7, pp. 14–16. (In Russian)
  24. Dolgopolov P., Konstantinov D., Rybalchenko L. et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms. *Procedia Computer Science*. 2019, Iss. 149, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
  25. Krakovskiy Yu. M., Kuklina O. K. Binarnoe prognozirovanie dinameskikh pokazateley na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Binary forecasting of dynamic indicators based on machine learning methods]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Bulletin. Management, computer technology and informatics]. 2023, Iss. 62, pp. 50–55. DOI: 10.17223/19988605/62/5. (In Russian)
  26. Goncharova N. A. Spetsifika operativnogo upravleniya vagonopotokami v zheleznodorozhnykh promyshlennykh transportno-tekhnologicheskikh sistemakh [Specifics of the operational management of car flows in railway industrial transport and technological systems]. *Transportnye sistemy: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy onlayn-konferentsii dlya molodykh uchenykh i aspirantov, Sankt-Peterburg, 29 noyabrya 2022 goda* [Transport systems: collection of materials of the International scientific online conference for young scientists and graduate students, St. Petersburg, November 29, 2022]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo Publ., 2023, pp. 74–77. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-14. (In Russian)
  27. Kolesnikov V. I., Kovalev S. M., Ivanchenko V. N. Intellektualizatsiya transportnykh protsessov na osnove gibridnykh tekhnologiy i mul'tiagentnykh sistem [Intelligentization of transport processes based on hybrid technologies and multi-agent systems]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2012, Iss. 1(45), pp. 107–113. (In Russian)
  28. Bogdanova L., Nagibin S., Loskutov D. Neuro-fuzzy-based mathematical model of dispatching of an industrial railway junction. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. — 2023, vol. 12, Iss. 1, pp. 502–513. DOI: 10.11591/eei.v12i1.4055.