

УДК 629.3.017

Многокритериальная оптимизация распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин

М. А. Платонова

Воронежский институт высоких технологий, Россия, 394043, Воронеж, ул. Ленина, 73а

Для цитирования: Платонова М. А. Многокритериальная оптимизация распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 103–115. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-103-115

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности функционирования логистических транспортных систем в условиях нестабильного грузопотока и возрастающих требований к бесперебойности доставки. Резервирование комплексов машин и агрегатов является одним из ключевых механизмов обеспечения заданного уровня надежности, однако существующие подходы к управлению резервами не учитывают многокритериальность задачи, что приводит к неоправданному увеличению затрат или снижению эксплуатационной надежности. **Цель:** разработка математической постановки задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин и обоснование метода ее решения. **Методы:** исследование базируется на методах теорий массового обслуживания, надежности технических систем, многокритериальной оптимизации и имитационного моделирования. В работе использованы подходы векторной оптимизации с построением множества Парето-оптимальных решений. **Результаты:** представлена формализованная постановка задачи векторной оптимизации резервированных комплексов машин с учетом структурной и временной избыточности. Приведена система критериев эффективности, охватывающая экономические, надежность и эксплуатационные показатели. Раскрыт алгоритм поиска оптимальных решений на основе метода взвешенных сумм и генетического алгоритма, обоснованы результаты апробации разработанного подхода на примере погрузочно-разгрузочного комплекса контейнерного терминала. Теоретическая значимость заключается в развитии методологии управления резервированными техническими системами в логистике за счет учета многокритериального характера задачи оптимизации. **Практическая значимость:** возможность применения разработанного подхода для обоснования состава парка транспортно-технологических машин и оптимизации режимов их резервирования на предприятиях различных отраслей. Выявлен ряд ограничений (статический характер модели, упрощенное представление отказов, неучет взаимосвязей между машинами), требующих дальнейшего изучения, представлены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: логистические транспортные системы, транспортно-технологические системы, резервированные комплексы машин, многокритериальная оптимизация, теория надежности, Парето-оптимальность

Введение

Современные логистические транспортные системы (ЛТС) характеризуются высокой степенью технической оснащенности и сложностью процессов взаимодействия различных видов транспорта и технологического оборудования [1, 2]. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность функционирования

ЛТС, является надежность работы транспортно-технологических машин (ТТМ): погрузчиков, кранов, тягачей, конвейерных систем и других агрегатов, обеспечивающих непрерывность грузопотока [3, 4]. На железнодорожном транспорте он зависит от трех ключевых факторов, в которых ТТМ играют решающую роль:

1. Решение (как минимум уменьшение) проблем задержки при перегрузке грузов между видами транспорта (железнодорожный ↔ автомобильный, морской, речной), что может привести к простоям и нарушению цепочки поставок.

2. Неравномерное движение поездов, что приводит к простоям на станциях, заторам и нарушению графика.

3. Ручное управление грузопотоком влечет ошибки, потерю времени и низкую эффективность.

В условиях нестационарного спроса на логистические услуги, сезонных колебаний грузопотоков и неизбежных отказов техники особую значимость приобретает задача рационального резервирования машин и агрегатов [5–7]. Резервирование, нередко подразумевающее установку дополнительных элементов и требующее дополнительных капитальных вложений, позволяет тем не менее исключить незапланированные простои от поломок машин и агрегатов. При этом чрезмерное резервирование также нежелательно, вследствие чего требуется найти оптимальное соотношение между показателями надежности машины (агрегата) и затратами на ее (его) создание.

Исследование современной научной литературы в данной области позволило выявить ряд ограничений по управлению резервированными комплексами машин. В частности, использование лишь одного критерия (минимизация затрат или максимум надежности [8–10]) не приводит к желательному для перевозчика результату, а применение множества критериев [11] требует создания соответствующего программного обеспечения, позволяющего выявлять оптимальные решения. При этом классическая теория надежности [12–14] фактически игнорирует экономические аспекты формирования различных схем резервирования машины и агрегатов. В работах по логистике [15–18] акцент делается на управлении материальными потоками, тогда как техническая составляющая (резервирование машин) рассматривается фрагментарно.

Зарубежные исследования [19–22] демонстрируют применение методов оптимизации (в том числе многокритериальной) для управления производственными системами. В частности, в [21] отмечается необходимость оптимизации внутризаводских логистических процессов с использованием инструментов цифрового моделирования, а в [22] рассматривается оптимизация внутрикорпоративных перевозок с акцентом на снижение транспортных расходов и повышение эффективности логистических процессов. При этом авторами отмечается недостаточная исследованность вопросов учета структурной и временной избыточности при резервировании ТТМ.

Таким образом, научная проблема, решаемая в рамках данного исследования, заключается в отказе от формализованного подхода к многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин, учете как экономических, так и надежно-эксплуатационных показателей, поэтому исследования в данной области являются актуальными.

Целью исследования является разработка математической постановки задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин и обоснование метода ее решения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить формализацию структуры резервированного комплекса ТТМ и определить основные параметры управления;
- разработать систему критериев для оценки эффективности функционирования резервированного комплекса;
- построить математическую модель задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов;
- предложить метод решения задачи и выполнить его апробацию на тестовом примере.

Методы и материалы

Методологическая база исследования базируется на методах теории массового обслуживания, а также на надежности технических систем, многокритериальной оптимизации и имитационного моделирования. В работе использованы подходы векторной оптимизации с построением множества Парето-оптимальных решений. В исследовании применялся метод формализации структуры резервированного комплекса транспортно-технологических машин, выполняющих однородные операции по обработке производственного звена грузопотока на операциях погрузки, разгрузки и перемещения. Предусматривался поиск резервных ТТМ в рабочем состоянии и готовых к немедленному включению (горячий резерв) или в нерабочем состоянии и требующих времени на запуск (холодный резерв), а также распределение ТТМ между несколькими технологическими участками (скользящий резерв).

Результаты

В качестве критериев эффективности функционирования резервированного комплекса ТТМ были приняты показатели минимизации совокупных затрат $C_{\text{ТТМ}}$ (экономический критерий, определяемый с учетом пропорциональных n капитальных затрат $C_{\text{кап}}$ на приобретение машин, а также эксплуатационных затрат $C_{\text{экспл}}$, зависящих от режима использования ТТМ), надежности структуры резервированного комплекса (максимизация коэффициента готовности K_r или вероятности

безотказной работы $P(t)$ за заданный период), минимизации среднего времени ожидания обслуживания $T_{ож}$ (эксплуатационный критерий). Ограничения при оптимизации включали в себя минимально допустимый уровень производительности $P_{ТТМ}$ применяемых машин (рис. 1).

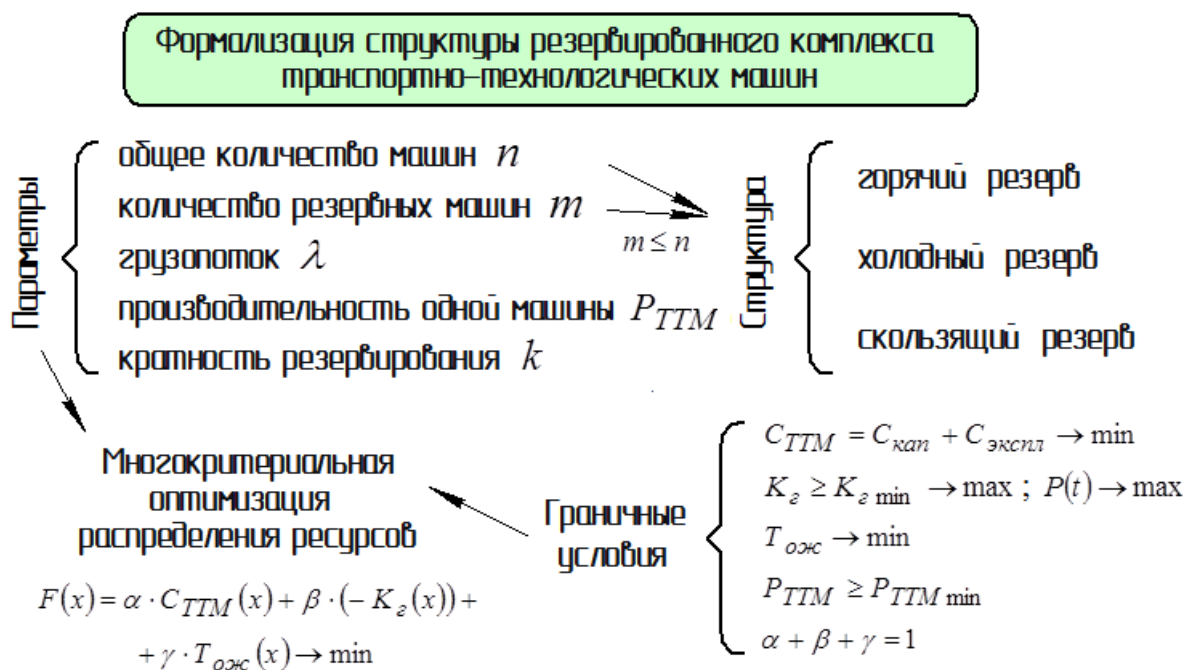


Рис. 1. Формализация структуры резервированного комплекса транспортно-технологических машин

Для решения многокритериальной задачи по оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах ТТМ использовался комбинированный подход, включающий в себя предварительную оценку области допустимых решений:

$$F(x) = \alpha \cdot C_{ТТМ}(x) + \beta \cdot (-K_{\Gamma}(x)) + \gamma \cdot T_{ож}(x) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где α, β, γ — весовые коэффициенты;

$x = (n, m, S)$ — вектор управляемых переменных (общее количество машин n , количество резервных машин m , схема резервирования S), при этом для области X допустимых решений, определяемых технологическими и ресурсными ограничениями, $x \in X$.

Кроме того, применялся анализ Парето-фронта для выбора рациональных решений с учетом предпочтений ЛПР (лиц, принимающих решения).

В результате проведенного анализа разработана формализованная постановка задачи многокритериальной оптимизации резервированных комплексов транспортно-технологических машин. Отличительными особенностями предложенной постановки являются:

- учет как структурной (количество резервных машин), так и временной (горячий/холодный резерв) избыточности;
- использование трех групп критериев (экономические, надежности, эксплуатационные);
- возможность учета ограничений различной природы.

Апробация разработанного подхода была выполнена на примере погрузочно-разгрузочного комплекса контейнерного терминала, для чего были приняты следующие исходные данные:

- минимально необходимое количество машин для обработки грузопотока: $n_{\min} = 4$;
- интенсивность поступления требований (грузопоток): $\lambda = 3$ ед./ч;
- производительность одной машины: $P_{\text{ТТМ}} = 1$ ед./ч;
- стоимость одной машины: $C_{\text{ед}} = 5$ млн руб.; эксплуатационные затраты на одну машину: $C_{\text{экспл ед}} = 1$ млн руб./год.

Результаты расчета Парето-оптимальных решений представлены в табл. 1 и на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. Парето-оптимальные решения для погрузочно-разгрузочного комплекса

n	m	Схема резервирования	$C_{\text{ТТМ}}$, млн руб.	K_r	$T_{\text{ож}}$, ч
4	0	Без резерва	20	0,82	0,45
5	1	Горячий резерв	25	0,93	0,18
6	2	Горячий резерв	30	0,97	0,09
5	1	Холодный резерв	25	0,89	0,22
4	1	Скользкий резерв	22	0,88	0,31

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что компромисс между затратами на формирование резервированного комплекса транспортно-технологических машин и надежностью указанного комплекса проявляется в виде нелинейной зависимости: при увеличении затрат с 20 до 25 млн руб. (на 25 %) надежность возрастает с 0,82 до 0,93 (на 13,4 %), а при дальнейшем росте затрат до 30 млн руб. надежность увеличивается лишь до 0,97 (на 4,3 %). Это свидетельствует о наличии области насыщения, когда дополнительные вложения в резервирование дают все меньший прирост надежности.

Сравнение схем резервирования позволило выявить, что при одинаковом количестве ТТМ ($n = 5$, $m = 1$) более высокая степень надежности машин и агрегатов (на 4,49 %) обеспечивается горячим резервированием при меньшем (на 18,2 %) времени ожидания, однако при этом требуются дополнительные затраты на поддержание резервной машины в постоянной готовности к работе.

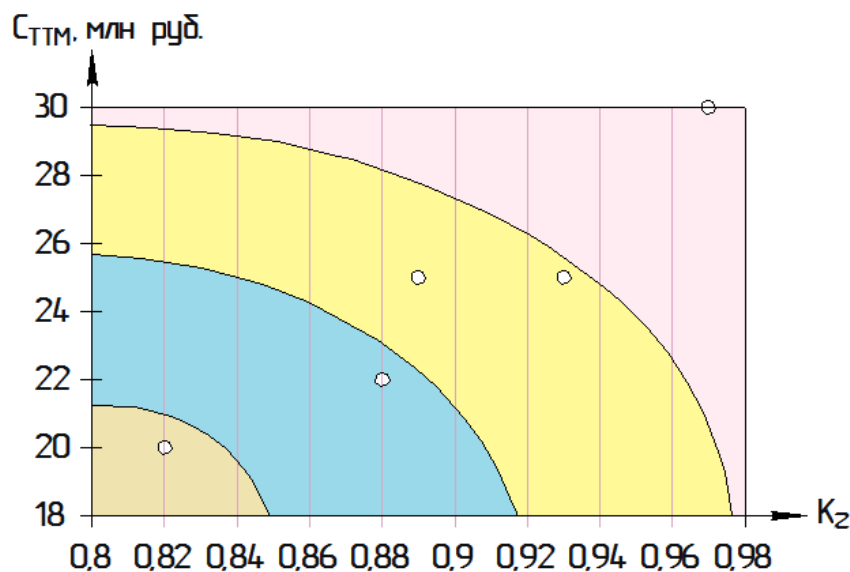


Рис. 2. Парето-фронт для резервированного комплекса ТТМ

При скользящем резервировании (общее количество машин $n = 4$, одна из них перераспределяется между участками) надежность системы по сравнению с базовым вариантом выше на 7,3 %, однако совокупные затраты С_{ТТМ} также выше (на 10 %), а время ожидания (по сравнению с вариантом 2: горячий резерв, $n = 5$) возрастает на 31 %. Тем не менее подобная схема может быть рекомендована для складских терминалов с разнородными операциями и возможностями для временного перераспределения машин и агрегатов.

В целом отметим, что качественные и количественные показатели работы конкретного логистического терминала (в том числе требования ко времени реакции на отказы машин и агрегатов) обуславливают выбор конкретной схемы резервирования.

Результаты сравнения разработанного подхода по распределению материальных ресурсов с традиционными методами однокритериальной оптимизации по минимуму затрат при фиксированном уровне надежности представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение результатов оптимизации различными методами

Метод	n	m, S	$C_{\text{ТТМ}}$, млн руб.	K_r	$T_{\text{ож}}$, ч	Примечание
Однокритериальная ($\min C_{\text{ТТМ}}$ при $K_r \geq 0,9$)	5	1 (горячий)	25	0,93	0,18	Фиксированный порог надежности
Однокритериальная ($\max K_r$ при $C_{\text{ТТМ}} \leq 25$)	5	1 (горячий)	25	0,89	0,22	Фиксированный бюджет
Многокритериальная (Парето)	Множество решений	—	—	—	—	Учет компромиссов

Как видно из табл. 2, однокритериальные подходы дают единственное решение, которое может оказаться неоптимальным с точки зрения других критериев. В частности, при фиксированном бюджете 25 млн руб. возможны два решения: горячий резерв ($n = 5, m = 1$) и холодный резерв ($n = 5, m = 1$) с различными показателями надежности и времени ожидания. Выбор между ними требует учета дополнительных факторов, не формализуемых в рамках однокритериальной постановки.

Разработанный многокритериальный подход позволяет ЛПР осознанно выбирать компромиссное решение с учетом приоритетов предприятия (например, приоритет надежности над затратами для критически важных операций). В целом предложенная методология позволяет снизить эксплуатационные затраты на 10–20% при сохранении заданного уровня надежности или повысить надежность на 5–15% при неизменном бюджете.

Полученные результаты подтверждают необходимость применения многокритериального подхода к оптимизации резервированных комплексов транспортно-технологических машин. Это согласуется с выводами зарубежных исследователей [20, 21] о том, что учет множества критериев позволяет получить более гибкие и адаптируемые решения по сравнению с классическими однокритериальными методами.

Вместе с тем в ходе исследования выявлен ряд ограничений, требующих дальнейшего изучения:

1. Статический характер модели. В предложенной постановке параметры грузопотока (λ) и производительности машин ($P_{\text{ТТМ}}$) предполагаются постоянными. В реальных условиях они подвержены стохастическим колебаниям, что требует перехода к динамическим моделям.

2. Упрощенное представление отказов. Принято предположение об экспоненциальном законе распределения наработки на отказ. Для некоторых типов ТТМ (например, оборудование с интенсивным износом) более адекватными могут быть распределения Вейбулла или логарифмически нормальное распределение.

3. Неучет взаимосвязей между машинами. В реальных логистических системах машины могут быть связаны технологически (например, последовательное выполнение операций), что накладывает дополнительные ограничения на схемы резервирования.

4. Сложность верификации на реальных данных. Апробация выполнена на условном примере. Для подтверждения практической значимости требуется проведение более масштабных вычислительных экспериментов с использованием данных реальных предприятий.

С учетом вышеизложенного направления дальнейших исследований включают:

- разработку динамической модели многокритериальной оптимизации с учетом нестационарного грузопотока;

- адаптацию методов машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования;
- создание программного комплекса для поддержки принятия решений при управлении резервированными комплексами ТТМ;
- интеграцию разработанного подхода с системами управления логистическими процессами (WMS, TMS).

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие основные результаты:

1. Разработана формализованная постановка задачи многокритериальной оптимизации распределения ресурсов в резервированных комплексах транспортно-технологических машин, учитывающая структурную и временную избыточность, а также три группы критериев: экономические (минимизация затрат), надежность (максимизация коэффициента готовности) и эксплуатационные (минимизация времени ожидания).

2. Предложена система критериев эффективности, позволяющая комплексно оценивать варианты резервирования и выявлять противоречия между различными целевыми показателями.

3. Обоснован метод решения задачи на основе построения множества Парето-оптимальных решений с использованием комбинации метода взвешенных сумм, что позволяет лицу, принимающему решения, выбирать рациональный вариант с учетом приоритетов предприятия.

4. Выполнена апробация разработанного подхода на примере погрузочно-разгрузочного комплекса контейнерного терминала, в ходе которой получены Парето-оптимальные решения, демонстрирующие характер компромиссов между затратами, надежностью и временем ожидания. Установлено наличие области насыщения, когда дополнительные вложения в резервирование дают все меньший прирост надежности.

5. Выявлены ограничения предложенного подхода и определены направления дальнейших исследований, включая переход к динамическим моделям, учет стохастического характера грузопотока и отказов оборудования, а также создание программного комплекса для поддержки принятия решений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения данного подхода для обоснования состава парка транспортно-технологических машин на предприятиях различных отраслей, включая терминально-складские комплексы, горнодобывающую промышленность, строительство и сельское хозяйство. Предложенная методология позволяет снизить эксплуатационные затраты на 10–20% при сохранении заданного уровня надежности или повысить надежность на 5–15% при неизменном бюджете.

Список источников

1. Логистика в транспортных системах / Р.С. Саттаров [и др.]. М.: Директ-Медиа, 2025. 156 с.
2. Бишутин С.Г., Кешенкова В.Г. Логистические транспортные системы: учебное пособие. Брянск: Изд-во БГТУ, 2024. 112 с.
3. Андреев О.П. Логистика автомобильного транспорта: современный подход // Естественные и технические науки. 2024. № 12 (199). С. 365–368.
4. Григорьев М.Н., Уваров С.А., Ткач В.В. Управление запасами и складская логистика: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2026. 84 с.
5. Коваленко Н.А., Шишкина С.Н. Рациональное управление эффективностью деятельности подразделений предприятия с использованием логистических цепочек // Транспортное дело России. 2025. № 5. С. 45–46.
6. Абуев Н.М. Резервирование грузопотоков: стратегическая необходимость для транспортных коридоров // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 6, № 11 (164). С. 227–233. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.11.06.026
7. Актуальные задачи трансформации национальных транспортно-логистических систем в условиях санкционных воздействий / Д.В. Капский [и др.] // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 6. С. 517–525. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525
8. Шпиганович А.Н., Астанин С.С., Рычков А.В. Обеспечение отказоустойчивости систем электроснабжения посредством резервирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 94–98. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-94-98
9. Гусев Е.В., Марюшина З.Л., Пронкин А.А. Оптимизация резервирования системы с учетом ограничений на вес, габариты и стоимость // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 11. С. 18–21.
10. Тихонов М.Р., Акуленок М.В., Шикла О.С. Разработка алгоритма расчета вероятности безотказности технологического процесса с резервированием // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 8. С. 88–93. DOI: 10.17513/snt.40117
11. Ешимкенов А.А., Чакеева К.С. Резервированная система управления процессом как основа надежной работоспособности процессов // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2022. № 1 (13). С. 55–62. DOI: 10.26731/2658-3704.2022.1(13).55-62
12. Основы теории надежности: учебник / А.В. Чепурин [и др.]. М.: Типография ПМГ, 2023. 232 с.
13. Ходырев А.И. Основы теории надежности машин. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2022. 162 с.
14. Верескун В.Д., Гуда А.Н., Мамаев Э.А. Методы управления рисками и надежностью в транспортно-логистических цепях поставок // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (96). С. 153–160. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_4_153
15. Сопилко Н.Ю., Щербакова Н.С. Основы управления производственными и материальными потоками. М.: Российский университет дружбы народов, 2024. 173 с.

16. Фирфаров А. С. Модели управления материальными потоками // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2024. № 1 (72). С. 137–148.
17. Бобровская Л. В. Экономическая сущность логистического подхода и проблемы в управлении материальными потоками в эпоху цифровизации // Финансовая экономика. 2021. № 5. С. 229–231.
18. Захарова Е. А., Давыдов Д. В. Управление материальными потоками внутри производства как основа логистических операций производственного процесса // Вестник экономики, управления и права. 2023. Т. 16, № 4. С. 13–28.
19. Nagi R. Research in Production Systems and Management: “How to” and Lessons // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55 (10). Pp. 1104–1109. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.537
20. Azadeh S. S., Aydin N. Data-Driven Optimization for Transport and Logistics Systems // EURO Journal on Transportation and Logistics. 2023. Vol. 12. Art. 100119. DOI: 10.1016/j.ejtl.2023.100119
21. Komačka D., Krajčovič M., Matys M. Optimization of In-Plant Logistics Processes in Assembly Systems Using Digital Simulation Tools: A Case Study Using AGV and Twiserion Design Manager // Transportation Research Procedia. 2026. Vol. 93. Pp. 328–333. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.050
22. Benčo D., Kubasáková I., Čauder P. Optimization of Intra-Company Transport and Logistics Processes within a Selected Enterprise // Transportation Research Procedia. 2026. Vol. 93. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.035

Дата поступления: 26.05.2026

Решение о публикации: 29.06.2026

Контактная информация:

ПЛАТОНОВА Марина Алексеевна — кандидат техн. наук, доцент; platonova.map@yandex.ru

Multi-Criteria Optimization of Resource Allocation in Redundant Complexes of Transport and Technological Machines

M. A. Platonova

Voronezh Institute of High Technologies, 73a Lenin st., Voronezh, 394043, Russia

For citation: *Platonova M. A. Multi-Criteria Optimization of Resource Allocation in Redundant Complexes of Transport and Technological Machines // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 103–115. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-103-115 (In Russian)*

Abstract

The relevance of this study stems from the need to improve the reliability and efficiency of logistics transport systems in the face of unstable freight flows and increasing demands for uninterrupted delivery.

Redundancy of machine and unit complexes is a key mechanism for ensuring a given level of reliability. However, existing approaches to reserve management fail to take into account the multi-criteria nature of the problem, leading to an unjustified increase in costs or a decrease in operational reliability. **Objective:** development of a mathematical formulation of the problem of multi-criteria optimization of resource distribution in redundant complexes of transport and technological machines and substantiation of the method for its solution. **Methods:** the study is based on methods from queuing theory, reliability theory of technical systems, multicriteria optimization, and simulation modeling. The study utilized vector optimization approaches with the construction of a set of Pareto-optimal solutions. **Results:** a formalized formulation of the vector optimization problem for redundant machine systems is presented, taking into account structural and temporal redundancy. A system of performance criteria is provided, encompassing economic, reliability, and operational indicators. An algorithm for finding optimal solutions based on the weighted sum method and a genetic algorithm is disclosed. The results of testing the developed approach using the example of a container terminal loading and unloading complex are substantiated. The theoretical significance lies in the development of a methodology for managing redundant technical systems in logistics by taking into account the multi-criteria nature of the optimization problem. **Practical significance:** the potential application of the developed approach to justifying the composition of a fleet of transport and technological vehicles and optimizing their redundancy modes at enterprises in various industries. A number of limitations (the static nature of the model, simplified representation of failures, and failure to account for interrelations between vehicles) requiring further study have been identified, and avenues for further research are presented.

Keywords: logistics transport systems, transport and technological systems, redundant machine complexes, multi-criteria optimization, reliability theory, Pareto optimality

References

1. Sattarov R.S., et al. Logistika v transportnyh sistemah [Logistics in Transport Systems], Moscow, Direkt-Media, 2025, 156 p. (In Russian)
2. Bishutin S.G., Keshenkova V.G. Logisticheskie transportnye sistemy: uchebnoe posobie [Logistic Transport Systems: Study Guide], Bryansk, BG TU [Bryansk State Technical University], 2024, 112 p. (In Russian)
3. Andreev O.P. Logistika avtomobilnogo transporta: sovremennyy podhod [Automotive Transport Logistics: A Modern Approach], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*, 2024, no. 12 (199), pp. 365–368. (In Russian)
4. Grigoriev M.N., Uvarov S.A., Tkach V.V. Upravlenie zapasami i sklads kaya logistika: uchebnik dlya vuzov [Inventory Management and Warehouse Logistics: A Textbook for Universities], Moscow, Yurayt Publishers, 2026, 84 p. (In Russian)
5. Kovalenko N.A., Shishkina S.N. Racional'noe upravlenie effektivnost'yu deyatel'nosti podrazdelenij predpriyatiya s ispol'zovaniem logisticheskikh cepochek [Rational Management of Enterprise Unit Performance Using Logistics Chains], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business in Russia]*, 2025, no. 5, pp. 45–46. (In Russian)
6. Abuev N.M. Rezervirovanie gruzopotokov: strategicheskaya neobhodimost' dlya transportnykh koridorov [Cargo Flow Reservation: A Strategic Necessity for Transport Corridors], *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya [Economics and Management: Problems and Solutions]*, 2025, vol. 6, no. 11 (164), pp. 227–233. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.11.06.026 (In Russian)
7. Kapskiy D.V., et al. Aktual'nye zadachi transformacii nacionalnykh transportno-logisticheskikh sistem v usloviyakh sankcionnykh vozdejstvij [Current Challenges of Transforming

National Transport and Logistics Systems under Sanctions], *Nauka i tekhnika [Science and Technology]*, 2024, vol. 23, no. 6, pp. 517–525. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-6-517-525 (In Russian)

8. Shpiganovich A. N., Astanin S. S., Rychkov A. V. Obespechenie otkazoustojchivosti sistem elektrosnabzheniya posredstvom rezervirovaniya [Ensuring Fault Tolerance of Power Supply Systems through Redundancy], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]*, 2021, no. 12, pp. 94–98. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-94-98 (In Russian)

9. Gusev E. V., Maryushina Z. L., Pronkin A. A. Optimizaciya rezervirovaniya sistemy s uchetom ogranichenij na ves, gabarity i stoimost' [Optimization of System Redundancy Considering Weight, Size, and Cost Constraints], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]*, 2024, no. 11, pp. 18–21. (In Russian)

10. Tikhonov M. R., Akulyonok M. V., Shikula O. S. Razrabotka algoritma raschyota veroyatnosti bezotkaznosti tekhnologicheskogo processa s rezervirovaniem [Development of an Algorithm for Calculating the Reliability Probability of a Technological Process with Redundancy], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern High Technologies]*, 2024, no. 8, pp. 88–93. DOI: 10.17513/snt.40117 (In Russian)

11. Eshimkenov A. A., Chakeeva K. S. Rezervirovannaya sistema upravleniya processom kak osnova nadezhnoj rabotosposobnosti processov [Redundant Process Control System as the Basis for Reliable Process Performance], *Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami [Information Technologies and Mathematical Modeling in Complex System Management]*, 2022, no. 1 (13), pp. 55–62. DOI: 10.26731/2658-3704.2022.1(13).55-62 (In Russian)

12. Chepurin A. V., et al. Osnovy teorii nadezhnosti: uchebnik [Fundamentals of Reliability Theory: A Textbook], Moscow, PMG Printing House, 2023, 232 p. (In Russian)

13. Khodyrev A. I. Osnovy teorii nadezhnosti mashin [Fundamentals of Machine Reliability Theory], Moscow, RGU nefti i gaza (NIU) im. I. M. Gubkina [Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)], 2022, 162 p. (In Russian)

14. Vereskun V. D., Guda A. N., Mamaev E. A. Metody upravleniya riskami i nadyozhnost'yu v transportno-logisticheskikh cepyah postavok [Risk and Reliability Management Methods in Transport and Logistics Supply Chains], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of Rostov State Transport University]*, 2024, no. 4 (96), pp. 153–160. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_4_153 (In Russian)

15. Sopilko N. Yu., Shcherbakova N. S. Osnovy upravleniya proizvodstvennymi i materialnymi potokami [Fundamentals of Managing Production and Material Flows], Moscow, Rossijskij universitet druzhby narodov [Peoples' Friendship University of Russia], 2024, 173 p. (In Russian)

16. Firfarov A. S. Modeli upravleniya materialnymi potokami [Models of Material Flow Management], *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Pacific National University]*, 2024, no. 1 (72), pp. 137–148. (In Russian)

17. Bobrovskaya L. V. Ekonomicheskaya sushchnost' logisticheskogo podhoda i problemy v upravlenii material'nymi potokami v epohu cifrovizacii [Economic Essence of the Logistics Approach and Challenges in Material Flow Management in the Digital Age], *Finansovaya ekonomika [Financial Economics]*, 2021, no. 5, pp. 229–231. (In Russian)

18. Zakharova E. A., Davydov D. V. Upravlenie material'nymi potokami vnutri proizvodstva kak osnova logisticheskikh operacij proizvodstvennogo processa [Managing Material Flows within Production as the Basis of Logistics Operations in the Production Process], *Vestnik ekonomiki, upravleniya i prava [Bulletin of Economics, Management and Law]*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 13–28. (In Russian)

19. Nagi R. Research in Production Systems and Management: “How to” and Lessons, *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55 (10), pp. 1104–1109. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.537

20. Azadeh S. S., Aydin N. Data-Driven Optimization for Transport and Logistics Systems, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2023, vol. 12, art. 100119. DOI: 10.1016/j.ejtl.2023.100119

21. Komačka D., Krajčovič M., Matys M. Optimization of In-Plant Logistics Processes in Assembly Systems Using Digital Simulation Tools: A Case Study Using AGV and Twiserion Design Manager, *Transportation Research Procedia*, 2026, vol. 93, pp. 328–333. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.050

22. Benčo D., Kubasáková I., Čauder P. Optimization of Intra-Company Transport and Logistics Processes within a Selected Enterprise, *Transportation Research Procedia*, 2026, vol. 93, pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.035

Received: May 26, 2026

Accepted: June 29, 2026

Author's information:

Marina A. PLATONOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; platonova.map@yandex.ru