

УДК 656.073.2

## Математическая модель распределения заданий между подъемно-транспортными машинами

Н. В. Малышев<sup>1</sup>, С. А. Бойков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>Октябрьская железная дорога — филиал ОАО «РЖД», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Подъездной пер. 1

**Для цитирования:** Малышев Н. В., Бойков С. А. Математическая модель распределения заданий между подъемно-транспортными машинами // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 651–658. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-651-658

### Аннотация

**Цель:** Для определения рационального распределения заданий между техникой, специализирующейся на внутритерминальных перемещениях, выполнить математическое моделирование работы подъемно-транспортных машин в транспортно-перегрузочной системе контейнерного терминала с учетом технологических параметров и дальнейшей многокритериальной оптимизацией. **Методы:** Для поиска распределения используются методы теории вероятностей и математической статистики, а также экспертных оценок. **Результаты:** Разработана математическая модель распределения заданий между подъемно-транспортными машинами. Определены зависимости общего времени выполнения заданий ПТМ при использовании текущей технологии и стратегии выполнения заданий при расчете оптимальности по Парето в отношении шести критериев, нацеленных на увеличение производительности крана и минимизацию порожнего пробега ПТМ. **Практическая значимость:** Предложено рациональное распределение заданий между техникой на перемещение контейнера, позволяющее увеличить перерабатывающую способность контейнерного терминала и снизить расходы на эксплуатацию техники.

**Ключевые слова:** Автоматизация, подъемно-транспортная машина, терминал, контейнерно-транспортная система, ускоренная доставка грузов.

### Введение

Рост контейнерных перевозок за последние десять лет [1] приводит к необходимости повышения производительности технических средств и перерабатывающей способности контейнерных терминалов [2–4]. Для этого могут использоваться следующие методы:

– **экстенсивный** — за счет увеличения территории терминала и числа приемоотправочных путей при текущих технологии работы и устройстве. Этот метод применим на значительном расстоянии от крупных городов, где стоимость территории небольшая и она не ограничена жилыми кварталами [5–7];

– **интенсивный** — за счет смены технологии и применения новых видов техники с большей производительностью. Для больших контейнерных терминалов развитие таким образом наиболее перспективно из-за расположения железнодорожных станций рядом с агломерациями и снижения капитальных затрат [8–10].

### Постановка задачи

Существует  $k$  заданий, необходимых для выполнения  $\nu$ -м числом погрузчиков. После того как погрузчик завершает свое текущее задание, вызывается алгоритм (рис. 1) для выбора следующего задания среди набора потенциальных заданий.

Задание — цикл от получения приказа на перемещение из места, где находится погрузчик, до места выгрузки целевого контейнера погрузчиком.

Далее модель выбора соответствия заданий и погрузчиков оценивает все возможные задания для всех погрузчиков с использованием технологических критериев, предназначенных для учета двух целей: минимизации порожнего пробега погрузчика; увеличения производительности работы крана. В дальнейшем критерии рассматриваются в многокритериальной оптимизации для определения оптимальной стратегии работы погрузчиков.

### Критерии в модели выбора соответствия заданий и погрузчиков

В табл. 1 приведены критерии, используемые моделью и поделенные на 2 группы в соответствии с целями. На рис. 2 изображен вектор времени с расположением критериев в процессе поиска и выполнения задания.

$C_1(X)$  представляет запас времени до выполнения задания  $x$ , мин:

$$C_1(X)_{\nu,k} = t_{\text{кр}}(X)_{\nu,k} - \frac{l_{\text{рейса}}(X)_{\nu,k}}{V_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где  $l_{\text{рейса}}(X)_{\nu,k}$  — расстояние рейса  $\nu$ -го погрузчика до места получения следующего  $k$ -го задания  $x$ , км;

$V_{\text{ср}}$  — средняя технологическая скорость погрузчика, км/ч;

$t_{\text{кр}}(X)_{\nu,k}$  — крайний срок выполнения задания  $x$ , ч.

Чем меньше  $C_1(X)$ , тем более срочным является задание  $x$  (отрицательная, если крайний срок пройден).

$C_2(X)$  — это разница между ожидаемым временем прибытия  $\nu$ -го погрузчика в место получения  $k$ -го задания  $x$  и погрузчика с минимальным расстоянием, мин:

ТАБЛИЦА 1. Критерии модели

Группа	№	Описание	Результат
Увеличение производительности крана	$C_1$	Время до момента последнего срока начала $k$ -го задания	Актуальность выбора $k$ -го задания
	$C_2$	Разница между временем прибытия к точке получения задания текущего ПТМ и ближайшего ПТМ к точке	Выбор наиболее свободного и расположенного при приеме задания наиболее близко
	$C_3$	Время до момента времени, когда кран будет готов погрузить целевой контейнер ПТМ	Учет крана с минимальной очереди
Минимизация пробега погрузчиков	$C_4$	Время порожнего пробега ПТМ	Учет порожнего пробега с учетом конфликтов
	$C_5$	Время груженого рейса ПТМ	Учет груженого пробега с учетом конфликтов
	$C_6$	Возможность сдвоенной операции	Учет сдвоенной операции в будущих двух заданиях

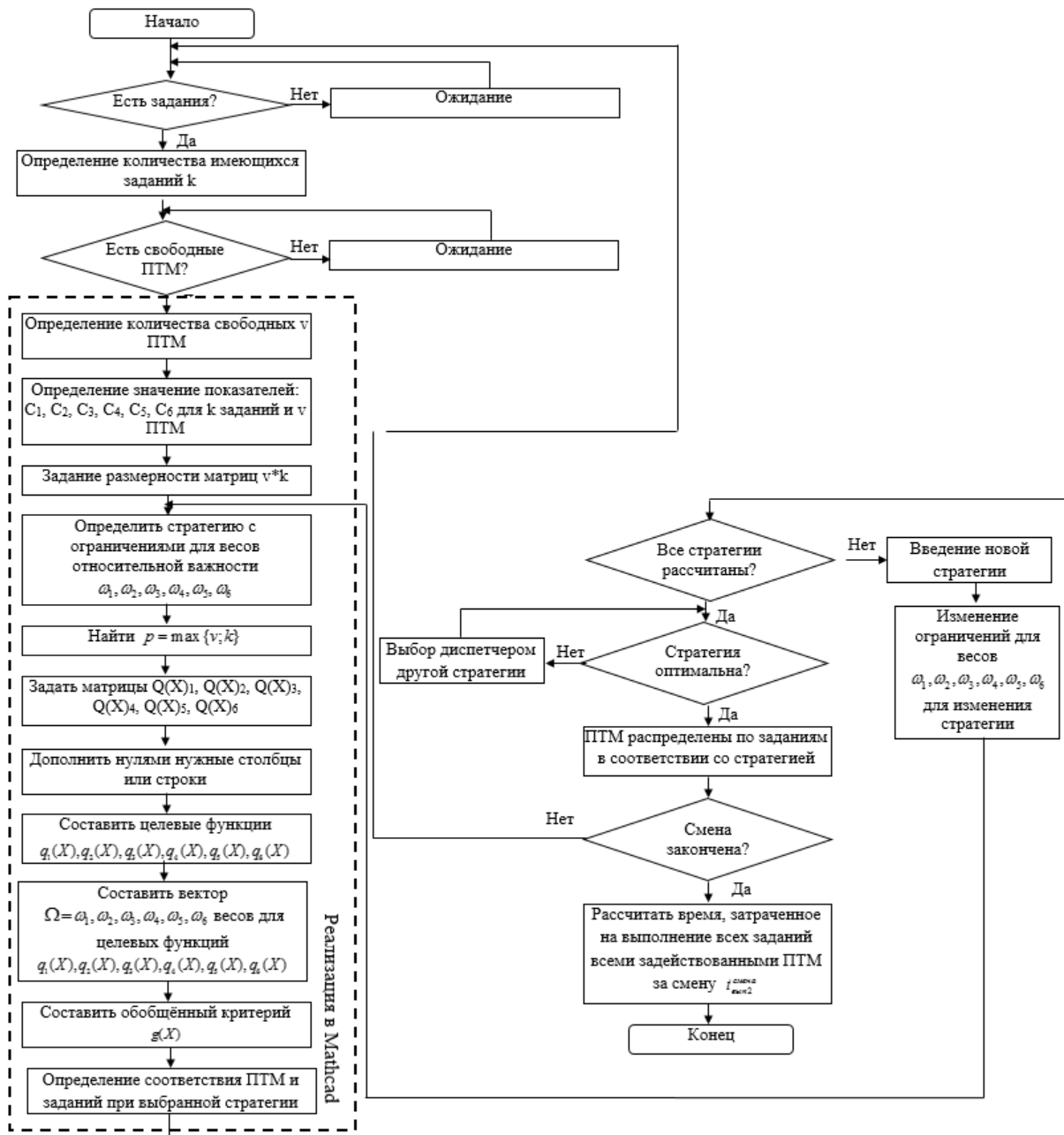


Рис. 1. Алгоритм математической модели выбора соответствия заданий и ПТМ

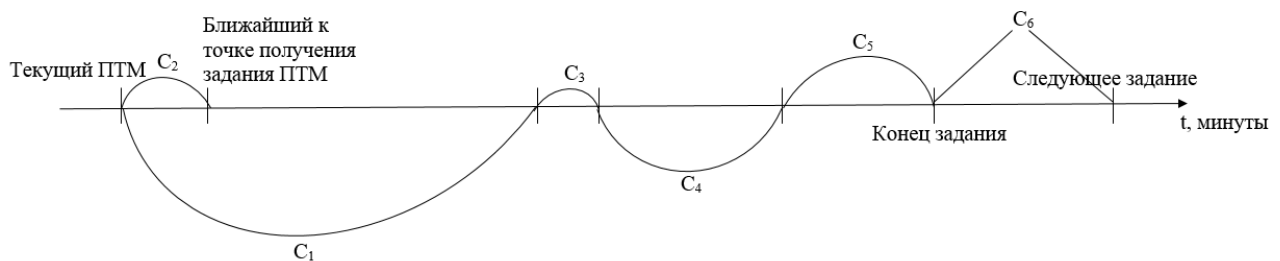


Рис. 2. Вектор времени с расположением показателей в процессе поиска и выполнения задания

$$C_2(X)_{v_k k} = \frac{I_{v_k}^{\text{рейса}}(X)_{v_k k}}{V_{\text{сп}}} - \frac{\min(I_1^{\text{рейса}}(X)_{v_k k}, I_2^{\text{рейса}}(X)_{v_k k}, \dots, I_{v_k}^{\text{рейса}}(X)_{v_k k})}{V_{\text{сп}}}. \quad (2)$$

Важно, что  $C_2(X)$  учитывает будущие ситуации, заставляя текущего погрузчика конкурировать с другими погрузчиками, все еще занятыми своими текущими заданиями. Это позволяет модели принимать долгосрочные решения.

$C_3(X)$  — это время  $t_{v_k}^{\text{пер}}(X)_{v_k k}$  простоя  $v$ -го погрузчика в ожидании передачи  $k$ -м краном или подъема/установки целевого контейнера (как на погрузо-разгрузочном пути, так и в зоне хранения) при взятии задания  $x$ , мин:

$$C_3(X)_{v_k k} = t_{v_k}^{\text{пер}}(X)_{v_k k}. \quad (3)$$

$C_4(X)$  — время преодоления порожнего рейса  $I_{v_k}^{\text{порож}}(X)_{v_k k}$   $v$ -м погрузчиком до места взятия контейнера по заданию  $x$ , мин:

$$C_4(X)_{v_k k} = \frac{I_{v_k}^{\text{порож}}(X)_{v_k k}}{V_{\text{сп}}}. \quad (4)$$

$C_5(X)$  — время преодоления груженого рейса  $I_{v_k}^{\text{груз}}(X)_{v_k k}$   $v$ -м погрузчиком с контейнером до места назначения, выполняемого в задании  $x$ , мин:

$$C_5(X)_{v_k k} = \frac{I_{v_k}^{\text{груз}}(X)_{v_k k}}{V_{\text{сп}}}. \quad (5)$$

$C_6(X)$  — возможность двояной операции. Если текущий  $v$ -й погрузчик назначен на  $x$  в место назначения предыдущего задания  $x_{k-1}$ , то  $C_6(X) = 0$ , если следующее задание  $x_{k+1}$  может образовывать двояную операцию, то  $C_6(X) = 0,5$ . В противном случае  $C_6(X) = 1$ .

### Решение задачи выбора соответствия задания и погрузчика

В случае, когда количество заданий неравно количеству погрузчиков, необходимо произвести преобразования для добавления нулей в матрице показателя соответствия погрузчиков и заданий:

1. Определить значения показателей  $C_1(X), C_2(X), \dots, C_6(X)$ .

2. Определить стратегию с ограничениями для весов относительной важности  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5,$

$\omega_6, \omega_i > 0, \sum_i^6 \omega_i = 1$  показателей  $C_1(X), C_2(X), \dots, C_6(X)$ .

3. Привести матрицы  $C_i(X)$  к закрытым, для чего:

а) найти  $p = \max\{v; k\}$ ;

б) задать 6 матриц  $Q_i(X)$  показателей следующим образом:

$$q_{vk} = \begin{cases} c_{vk}, v = \overline{1, V}, k = \overline{1, K}; \\ 0, v = \overline{1, p}, k = \overline{K+1, p}, \text{ если } V > K; \\ 0, v = \overline{V+1, p}, k = \overline{K, p}, \text{ если } V < K. \end{cases} \quad (6)$$

4. Составить целевые функции  $q_1(X), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X), q_6(X)$  с показателями:

$$q_1(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_1(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$q_2(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_2(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$q_3(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_3(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$q_4(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_4(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$q_5(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_5(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$q_5(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_5(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min. \quad (12)$$

5. Составить вектор  $\Omega = \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$  весов для целевых функций  $q_1(X), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X), q_6(X)$ .

6. Составить обобщенный критерий:

$$g(X) = \Delta(q_1(X), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X), q_6(X), \Omega), \quad (13)$$

где  $\Delta$  — оператор свертки.

7. Перейти к виду модели соответствием задания и ПТМ, описанной выше:

$$g(X) \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$\sum_{v=1}^p x_{pp} = 1, k = \overline{1, p}, \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^p x_{pp} = 1, v = \overline{1, p}, \quad (16)$$

$$x_{pp} \in \{0, 1\}, v, k = \overline{1, p}. \quad (17)$$

ТАБЛИЦА 2. Сравнение стратегий

№ стратегии	Увеличение производительности работы крана, мин	Минимизация порожнего пробега погрузчика, мин
1	40,59	16,96
2	58,74	18,01
3	47,11	23,64

8. Решить венгерским методом. Результатом является получение стратегии, оптимальной по Парето.

Для нахождения наиболее оптимального распределения заданий по погрузчикам составляется таблица назначений (строки соответствуют погрузчикам, столбцы заданиям) и венгерским методом решается в среде Mathcad. Таким образом, решая задачу многократно и с изменением весовых коэффициентов, можно получить множество Парето-оптимальных стратегий с различными значениями групп показателей (табл. 2).

Для определения адекватности модели предлагается сравнить общее время выполнения всех заданий всеми погрузчиками, получен-

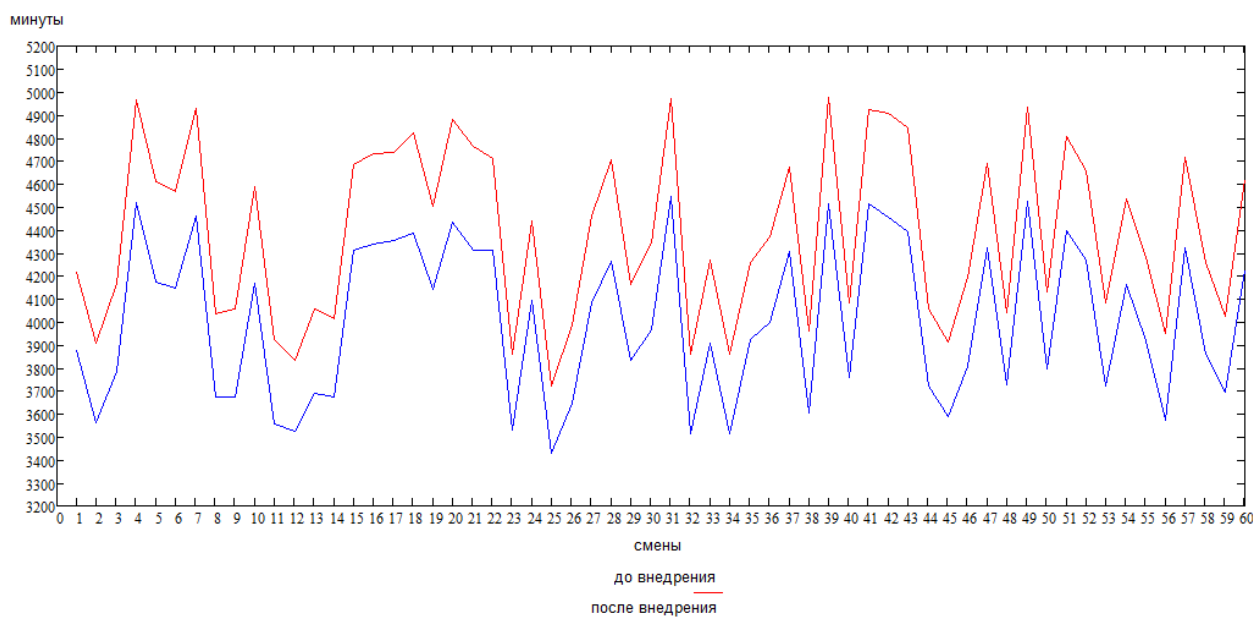


Рис. 3. Результаты моделирования предлагаемой стратегии работы и текущей технологии

ное в модели при использовании предложенной стратегии и равное 362,8 мин, и наиболее распространённый на грузовых терминалах принцип организации очереди выполнения заданий, учитывающий только порядок отправления со случайным распределением заданий, равный 396,5 мин. Из результатов видно, что стратегия, нацеленная на снижение пробега, затратила на выполнение на 9,3 % меньше времени при сохранении срока выполнения задания.

Для определения более точного сравнения модели и текущей технологии было произведено моделирование распределения заданий на контейнерном терминале в течении месяца (рис. 3), в результате которого выявлено, что стратегия, нацеленная на снижение пробега, позволяет в среднем снизить время на выполнение заданий на 9,6 %.

### Библиографический список

1. Бадеецкий А. П. Оптимизация распределения контейнеропотоков на направлении Китай - европейский союз / А. П. Бадеецкий, А. Н. Деревянко // *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. — 2020. — Т. 5. — № 1. — С. 69–86.
2. Малышев Н. В. К вопросу роботизации тыловых контейнерных терминалов / Н. В. Малышев, Е. К. Коровяковский // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2020. — № 1. — С. 15–25. — DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25.
3. Маликов О. Б. Проектирование контейнерных терминалов / О. Б. Маликов, Е. К. Коровяковский, Ю. В. Коровяковская. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. — 52 с.
4. Малышев Н. В. Моделирование мультимодальных перевозок / Н. В. Малышев, К. Е. Ковалев // *Транспорт России: проблемы и перспективы* — 2018: материалы Международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2018 г. — СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2018. — С. 294–297.
5. Конограй О. А. Перспективы конверсии международных транспортно-логистических потоков и потенциал Арктической транспортной инфраструктуры в транзите «Китай — Европа» / О. А. Конограй, А. А. Воронов // *Экономика устойчивого развития*. — 2022. — № 2(50). — С. 190–193. — DOI: 10.37124/20799136\_2022\_2\_50\_190.
6. Паламарчук Г. И. Имитационное моделирование мультимодальной цепи поставок / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. В. Малышев // *Специальная техника и технологии транспорта*. — 2019. — № 3(41). — С. 112–117.
7. Кобозева Н. Г. Анализ показателей эффективности использования железнодорожного подвижного состава / Н. Г. Кобозева // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2020. — Т. 17. — № 1. — С. 77–83. — DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83.
8. Малышев Н. В. К вопросу роботизации тыловых контейнерных терминалов / Н. В. Малышев, Е. К. Коровяковский // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2020. — № 1. — С. 15–25. — DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25.
9. Илесалиев Д. И. К вопросу о наиболее рациональном размещении грузовых терминалов / Д. И. Илесалиев, Е. К. Коровяковский // *Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2016 г.* — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. — С. 162–166.
10. К вопросу развития контейнерных перевозок в России / Н. Г. Янковская, Я. Э. Яровая, К. Р. Ткачев и др. // *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. — 2021. — Т. 6. — № 1. — С. 12–21.

Дата поступления: 15.08.2022

Решение о публикации: 31.08.2022

### Контактная информация:

МАЛЫШЕВ Николай Валерьевич — ассистент;  
kol.pgups@mail.ru

БОЙКОВ Сергей Анатольевич — начальник железнодорожной станции Шушары; dcs2\_boykovsa@orw.ru



## Mathematical Model for Task Distribution Among Lifting Transport Machines

N. V. Malyshev<sup>1</sup>, S. A. Boikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

<sup>2</sup>Oktyabrskaya railroad — Russian Railways JSC subsidiary, 1, Podyezdnoy lane, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

**For citation:** Malyshev N. V., Boikov S. A. Mathematical Model for Task Distribution Among Lifting Transport Machines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 651–658. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-651-658

### Summary

**Purpose:** To determine task rational distribution between technics specialized in intra-terminal movements is to perform mathematical modeling of lifting transport machine operation in container terminal transport transshipment system given technological parameters and further multi-criteria optimization. **Methods:** Methods of probability theory and mathematical statistics as well as of expert estimates are used to discover the distribution. **Results:** Mathematical model of task distribution among lifting transport machines (LTM) has been developed. Total time dependences for completing LTM tasks using the current technology and task execution strategy at calculation of Pareto optimality towards six criteria, aimed at crane performance increase and empty LTM mileage minimization, are determined. **Practical significance:** Tasks rational distribution amongst techniques for container movement is proposed, which allows to increase processing capacity of a container terminal and to reduce technique operating costs.

**Keywords:** Automation, lifting transport machine, terminal, container transport system, accelerated cargo delivery.

### References

1. Badetskiy A. P., Derevyanko A. N. *Optimizatsiya raspredeleniya konteyneropotokov na napravlenii Kitay - evropeyskiy soyuz* [Optimization of the distribution of container traffic in the direction China — European Union]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. 2020, vol. 5, I. 1, pp. 69–86. (In Russian)

2. Malyshev N. V., Korovyakovskiy E. K. K voprosu robotizatsii tylovykh konteynernykh terminalov [On the issue of robotization of rear container terminals]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2020, I. 1, pp. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25. (In Russian)

3. Malikov O. B., Korovyakovskiy E. K., Korovyakovskiy Yu. V. *Proektirovanie konteynernykh terminalov* [Design of container terminals]. St. Petersburg: Peterburgskiy

gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2015. 52 p. (In Russian)

4. Malyshev N. V., Kovalev K. E. Modelirovanie mul'timodal'nykh perevozok [Modeling of multimodal transportation]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2018: materialy Mezhdunarodnoy-nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 13–14 noyabrya 2018 g.* [Transport of Russia: problems and prospects — 2018: materials of the International scientific and practical conference, St. Petersburg, November 13–14, 2018]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy universitet Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy Publ., 2018, pp. 294–297. (In Russian)

5. Konogray O. A., Voronov A. A. Perspektivy konversii mezhhdunarodnykh transportno- logisticheskikh potokov i potentsial Arkticheskoy transportnoy infrastruktury v tranzite «Kitay — Evropa» [Prospects for the conversion of international transport and logistics flows and the potential of the Arctic transport infrastructure in transit “China — Europe”]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development]. 2022, I. 2(50), pp. 190–193. DOI: 10.37124/20799136\_2022\_2\_50\_190. (In Russian)
6. Palamarchuk G. I., Kuzmenkov V. N., Malyshev N. V. Imitatsionnoe modelirovanie mul'timodal'noy tsepi postavok [Simulation modeling of a multimodal supply chain]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special equipment and transport technologies]. 2019, I. 3(41), pp. 112–117. (In Russian)
7. Kobozeva N. G. Analiz pokazateley effektivnosti ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Analysis of indicators of the effectiveness of the use of railway rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2020, vol. 17, I. 1, pp. 77–83. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83. (In Russian)
8. Malyshev N. V., Korovyakovskiy E. K. K voprosu robotizatsii tylovykh konteynernykh terminalov [On the issue of robotization of rear container terminals]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2020, I. 1, pp. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25. (In Russian)
9. Ilesaliev D. I., Korovyakovskiy E. K. K voprosu o naibolee ratsional'nom razmeshchenii gruzovykh terminalov [On the most rational placement of cargo terminals]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 18–25 aprelya 2016 g.* [Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXVI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, April 18–25, 2016]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2016, pp. 162–166. (In Russian)
10. Yankovskaya N. G., Yarovaya Ya. E., Tkachev K. R. K voprosu razvitiya kontreylernykh perevozok v Rossii [On the development of piggyback transportation in Russia]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. 2021, vol. 6, I. 1, pp. 12–21. (In Russian)

Received: August 15, 2022

Accepted: August 31, 2022

**Author's information:**

Nicolay V. MALYSHEV — Assistant;

kol.pgups@mail.ru

Sergey A. BOIKOV — Head of Shushary Railway Station;

dcs2\_boykovsa@orw.ru