

УДК 656.073.2

## Модель приоритетов обслуживания подач вагонов

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.* Модель приоритетов обслуживания подач вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 839–846. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-839-846

### Аннотация

**Цель:** Для определения оптимальной точки переключения работы крана между платформами выполнить моделирование задачи выбора приоритетов обслуживания подач вагонов краном, отличающейся учетом штрафов за излишний простой подач на грузовом фронте. **Методы:** Для поиска распределения используются методы теории вероятностей, массового обслуживания и математической статистики, а также экспертных оценок. **Результаты:** Разработана модель приоритетов обслуживания подач вагонов. Определены зависимости средней стоимости времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями — от момента переключения между подачами при распределении Эрланга  $k$ -го порядка времени выполнения грузовой операции и его частного случая — экспоненциального распределения при смешанном приоритете обслуживания подач вагонов. **Практическая значимость:** Предложено рациональное распределение работы крана, позволяющее снизить расходы терминала на штрафы за излишний простой подач на грузовом фронте.

**Ключевые слова:** Автоматизация, пути необщего пользования, терминал, контейнерно-транспортная система, ускоренная доставка грузов.

### Введение

Одной из основных задач, стоящих перед терминалом, является повышение перерабатывающей способности [1]. На этот показатель непосредственным образом влияет работа крана на погрузо-разгрузочном пути [2, 3]. Для поиска оптимального приоритета обслуживания на грузовом фронте выбрана теория массового обслуживания (ТМО), так как вся грузовая работа заключается в том или ином виде обслуживания:

работа с транспортными средствами на грузовых фронтах; выполнение маневровых операций по подаче и уборке вагонов на пути терминала; логистические операции; определение структуры парка подъемно-транспортных машин и др. [4].

В ТМО входящие потоки требований различают по физической природе и математической структуре [5]. В разработанной модели входящие потоки требований — это вагонопотоки. Основной характеристикой входящих потоков в ТМО

является изменение частоты поступления требований в единицу времени, проявляющееся при различных законах распределения.

К особенностям функционирования систем массового обслуживания относится дисциплина очереди в виде приоритета обслуживания требования. Проблема приоритета обслуживания вагонов имеет важное значение в условиях оперативного руководства и текущего планирования работы контейнерного терминала [6, 7]. Порядок работы при погрузо-разгрузочных операциях с вагонами непосредственно влияет на такие показатели, как простой вагона, эксплуатационные расходы, а значит, и доход терминала [8–10].

Если в момент выполнения грузовых операций с вагонами меньшей стоимости за простой на грузовой фронт поступают вагоны с большей стоимостью за простой, предпочтения отдаются только прибывшим вагонам, причем в виде абсолютного приоритета. Причина такого решения заключается в большей стоимости простоя такого вагона, а также в больших штрафах при нарушении времени отправления ускоренных контейнерных поездов. При этом на практике выбор приоритета обслуживания в сторону этих вагонов не всегда рационален, так как не учитывается количество времени до завершения обслуживания подачи уже обслуживаемых вагонов.

Для модели выбран смещенный приоритет — это дисциплина очереди, при которой прерывается требование обслуживания с низким приоритетом при поступлении требований более высокого приоритета, если оно непрерывно обслуживалось в течение времени  $z_0$ , и не вытесняется, если оно обслуживается в течение времени  $\geq z_0$ . В таком случае момент  $z_0$  является точкой переключения.

Наилучший приоритет обслуживания вагонов на грузовом фронте можно выбрать непосредственным расчетом, сравнивая эксплуатационные затраты при разных вариантах последовательности выполнения

грузовых операций, в виде стоимости времени простоя, штрафов за излишний простой. Размеры затрат для каждого варианта обслуживания определяются умножением среднего времени пребывания на грузовом фронте (времени ожидания) на стоимость 1 минуты простоя и на число обслуженных вагонов. Выбор же оптимального смешанного приоритета в основном заключается в определении точки переключения  $z_0$  работы крана между подачами. Для выявления ситуации, при которой необходимо использовать точку переключения работы крана между подачами, предлагается алгоритм на рис. 1.

Цель поиска  $z_0$  состоит в минимизации целевой функции, выражающей среднюю стоимость времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями на погрузо-разгрузочном пути, минута-рубль:

$$T(z) = c_1 \lambda_1 t_{10}^{\text{преб}} + c_2 \lambda_2 t_{20}^{\text{преб}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — штраф за излишний простой первой и второй подач вагонов, отнесенных к минуте, руб.;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — интенсивность поступления первой и второй подач вагонов;

$t_{10}^{\text{преб}}$  и  $t_{20}^{\text{преб}}$  — среднее время пребывания первой и второй подач вагонов на грузовом фронте, являющиеся функциями от  $z_0$ , минуты.

Следовательно, используя формулы из [108], среднее время пребывания первой подачи, мин.:

$$t_{10}^{\text{преб}} = \frac{\lambda_1 \sigma^2(t_1) + \lambda_2 \int (x_2 - z)^2 \rho_2(x_2) dx_2}{2(1 - p_2)}, \quad (2)$$

а также выражения для величины  $t_{20}^{\text{преб}}$ , мин.:

$$t_{20}^{\text{преб}} = t_2 + \frac{p_1}{1 - p_1} \int F_2^c(x_2) dx_2 + \frac{\lambda_1 \sigma^2(t_1) + \lambda_2 \sigma^2(t_1)}{2(1 - p_1)(1 - p_1 - p_2)}, \quad (3)$$

получаем, минута-рубль:

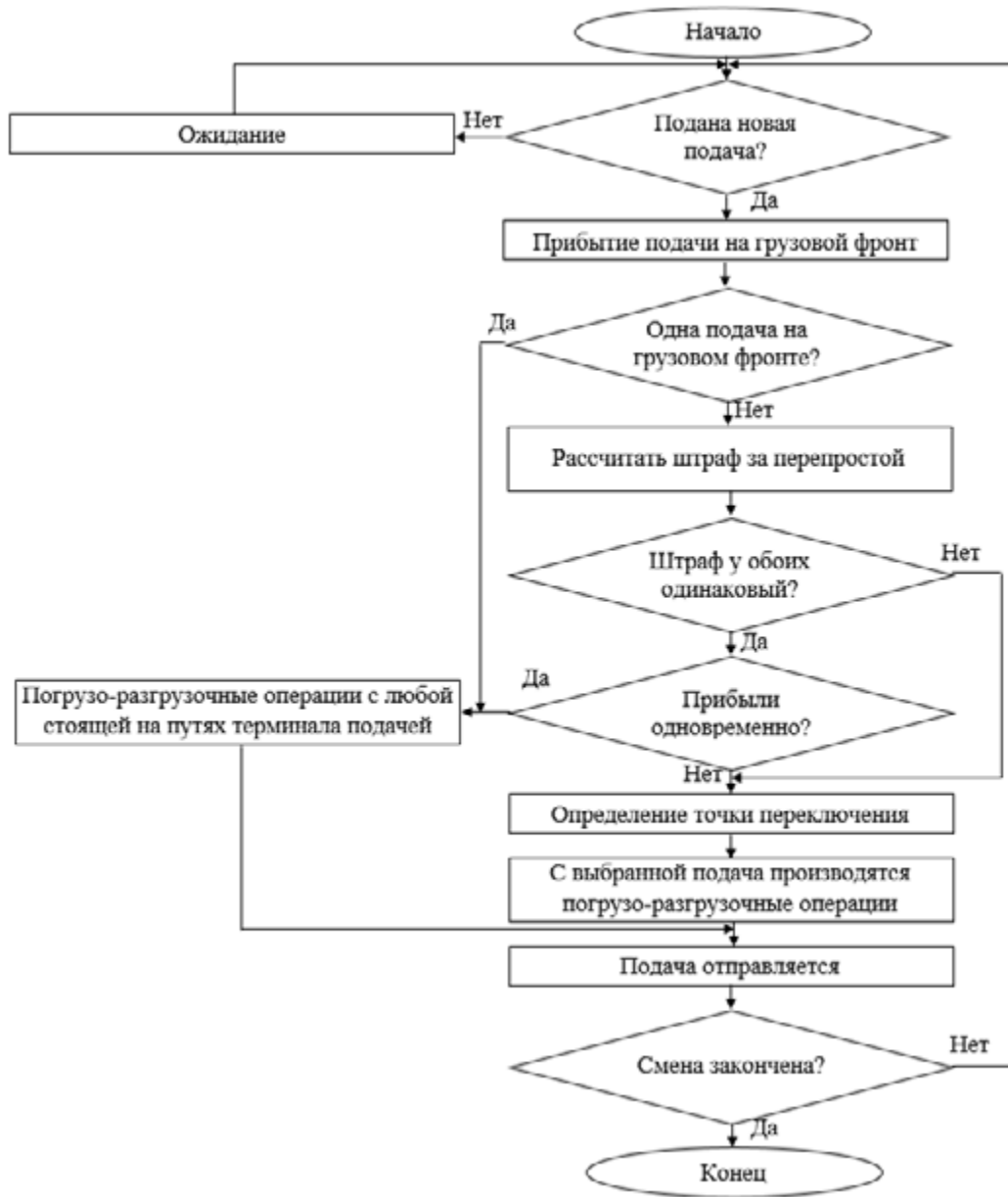


Рис. 1. Алгоритм применения точки переключения работы крана между подачами

$$\begin{aligned}
 T(z) = & \frac{c_1 \lambda_2 \lambda_1}{2(1-\rho_1)} \int_z^{\infty} (x_2 - z)^2 S_2(x_2) dx_2 - \\
 & - \frac{c_2 \lambda_2 \rho_1}{1-\rho_1} \int_z^{\infty} (x_2 - z) S_2(x_2) dx_2 + c_1 \left[ \rho_1 + \frac{\lambda_1^2 E(S_1^2)}{2(1-\rho_1)} \right] + \\
 & + c_2 \left[ \frac{\rho_2}{1-\rho_2} + \frac{\lambda_2 \lambda_1 E(S_1^2) + \lambda_2^2 E(S_2^2)}{2(1-\rho_1 - \rho_2)(1-\rho_1)} \right], \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $p_2$  — нагрузка крана от неприоритетных вагонов;

$E(S_2^z)$  — математическое ожидание оставшейся длительности обслуживания;

$x_2$  — точка времени;

$S(x)$  — плотность вероятности;

$F(x)$  — функция распределения.

### Оптимальная точка переключения работы крана между подачами вагонов

Оптимальное значение относительного времени переключения обслуживания потоков  $z_0$  величины  $z$  можно рассчитать по формуле  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$  или:

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{c_2}{E(S_2^{z_0})}, \quad (5)$$

где  $t_1$  — среднее время выполнения грузовых операций с первой подачей;

$E(S_2^{z_0})$  — среднее время, оставшееся до завершения обслуживания требования, которое уже обслуживалось в течение времени  $z_0$ , мин.:

$$E(S_2^{z_0}) = \frac{\int_{z_0}^{\infty} (x_2 - z_0) S_2(x_2) dx_2}{\int_{z_0}^{\infty} S_2(x_2) dx_2}. \quad (6)$$

Для того чтобы точка  $z_0$  давала минимум целевой функции, необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{S_2(z_0)}{F_2^c(z_0)} < \frac{c_1}{c_2 t_1}, \quad (7)$$

Используя (5), получаем следующее достаточное условие для того, чтобы  $z_0$  являлась точкой минимума:

$$\frac{S_2(z_0)}{F_2^c(z_0)} < \frac{1}{E(S_2^{z_0})} = \frac{F_2^c(z_0)}{\int_{z_0}^{\infty} F_2^c(x_2) dx_2}. \quad (8)$$

Если  $E(S_2^z)$  — среднее оставшееся время обслуживания — является монотонно убывающей функцией переменной  $z$ , то равенство (5) можно интерпретировать следующим образом.

Если  $\frac{c_2}{E(S_2^z)} < \frac{c_1}{t_1}$ , то поступившее требование прерывает обслуживание, в противном случае этого не происходит. Если выполняется условие (8),

то такая модель минимизирует общую стоимость пребывания требования в системе. Таким образом, если длительность обслуживания обрабатываемого требования имеет такое распределение, что среднее оставшееся время обслуживания является монотонно убывающей функцией переменной  $z$ , то можно минимизировать стоимость пребывания, выбрав указанную выше целевую функцию. В приведенных ниже примерах определяется оптимальное значение  $z_0$  для некоторых типов распределений длительности обслуживания обрабатываемых требований.

При распределении Эрланга  $k$ -го порядка если

$$\frac{1}{k} < \frac{c_2 t_1}{c_1 t_2} < 1, \quad (9)$$

то, используя правило знаков (правило Декарта),

можно показать, что у уравнения  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$  суще-

ствует корень  $z_0$ ,  $0 \leq z_0 < \infty$  и  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} > 0$ , так что

функция  $T(z)$  достигает минимума в точке  $z_0$ . В случае  $z_0 = \infty$  общая стоимость пребывания вагонов на грузовом фронте равна соответствующей стоимости для абсолютного приоритета с дообслуживанием. При постоянной длительности

обслуживания  $z_0 = t_2 - \frac{c_2}{c_1} t_1$ .

На рис. 2 показан график нормированной функции стоимости времени простоя двух подач

вагонов под грузовыми операциями  $\frac{T(z)}{T(\infty)}$  (отно-

шению функции стоимости к ее дисперсии) при различных значениях  $k$ , созданный на последнем этапе разработки математической модели выбора приоритетов обслуживания вагонов краном в написанной программе «Выбор приоритета

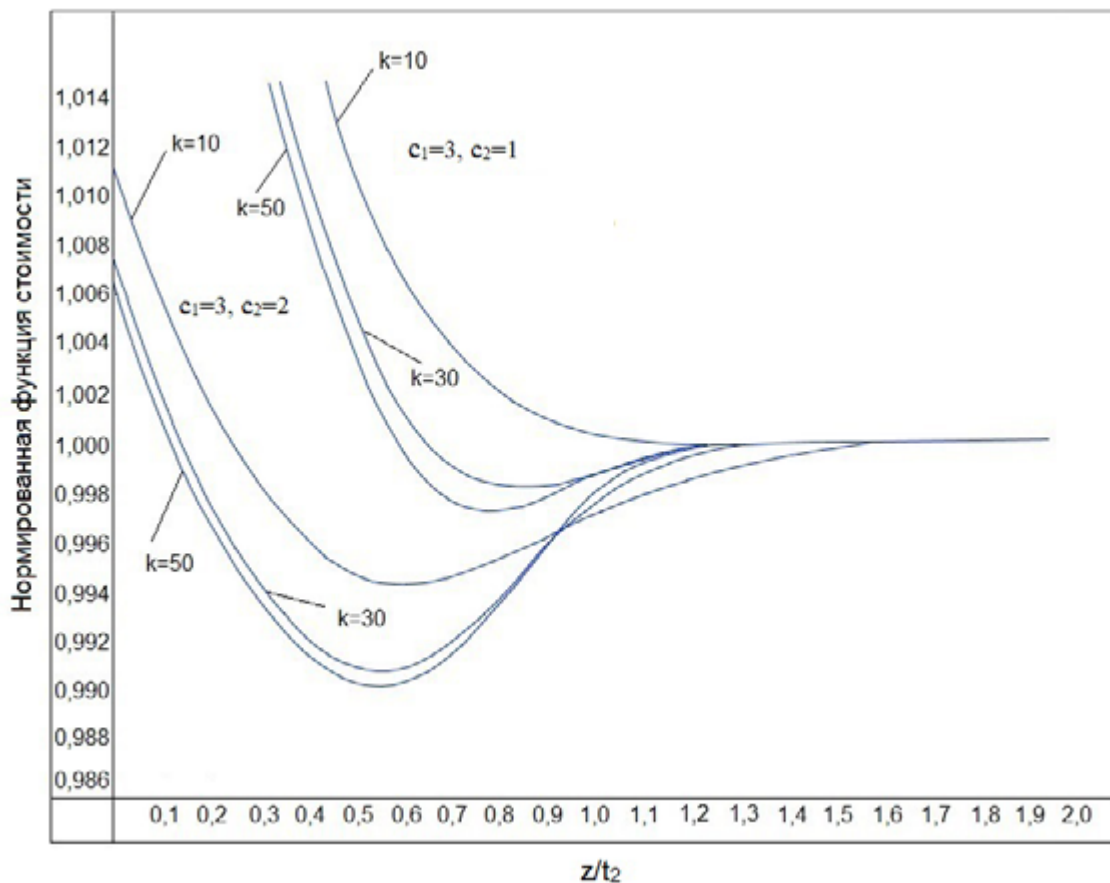


Рис. 2. Зависимость средней стоимости времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями от момента переключения крана между подачами

обслуживания вагонов» как модуль в АСУ контейнерного терминала на языке программирования Visual Basic.

При экспоненциальном распределении времени выполнения грузовой операции если  $c_1 t_2 > c_2 t_1$ , то функция  $T(z)$  имеет минимум в точке  $z = \infty$ , т. е. в этом случае оптимальной дисциплиной является абсолютный приоритет с дообслуживанием. Аналогично, если  $c_1 t_2 < c_2 t_1$ , то целевая функция минимум в точке  $z = \infty$ , т. е. в этом случае оптимальной дисциплиной является относительный приоритет. Если  $c_1 t_2 = c_2 t_1$ , то стоимость является постоянной величиной, не зависящей от  $z$ , и, таким образом, в этом случае нет смысла вводить смешанную приоритетную дисциплину. Эти выводы проиллюстрированы на рис. 3.

При равномерном распределении, плотность которого имеет вид:

$$S_2(x_2) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x_2 \leq b \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (10)$$

в противном случае оптимальная величина  $z_0$  определяется равенствами:

$$z_0 = \frac{b+a}{2} - \frac{c_2}{c_1} t_1, \quad \text{если } b-a < \frac{2c_2}{c_1} t_1 \quad (11)$$

и

$$z_0 = b - \frac{2c_2}{c_1} t_1, \quad \text{если } b-a > \frac{2c_2}{c_1} t_1. \quad (12)$$

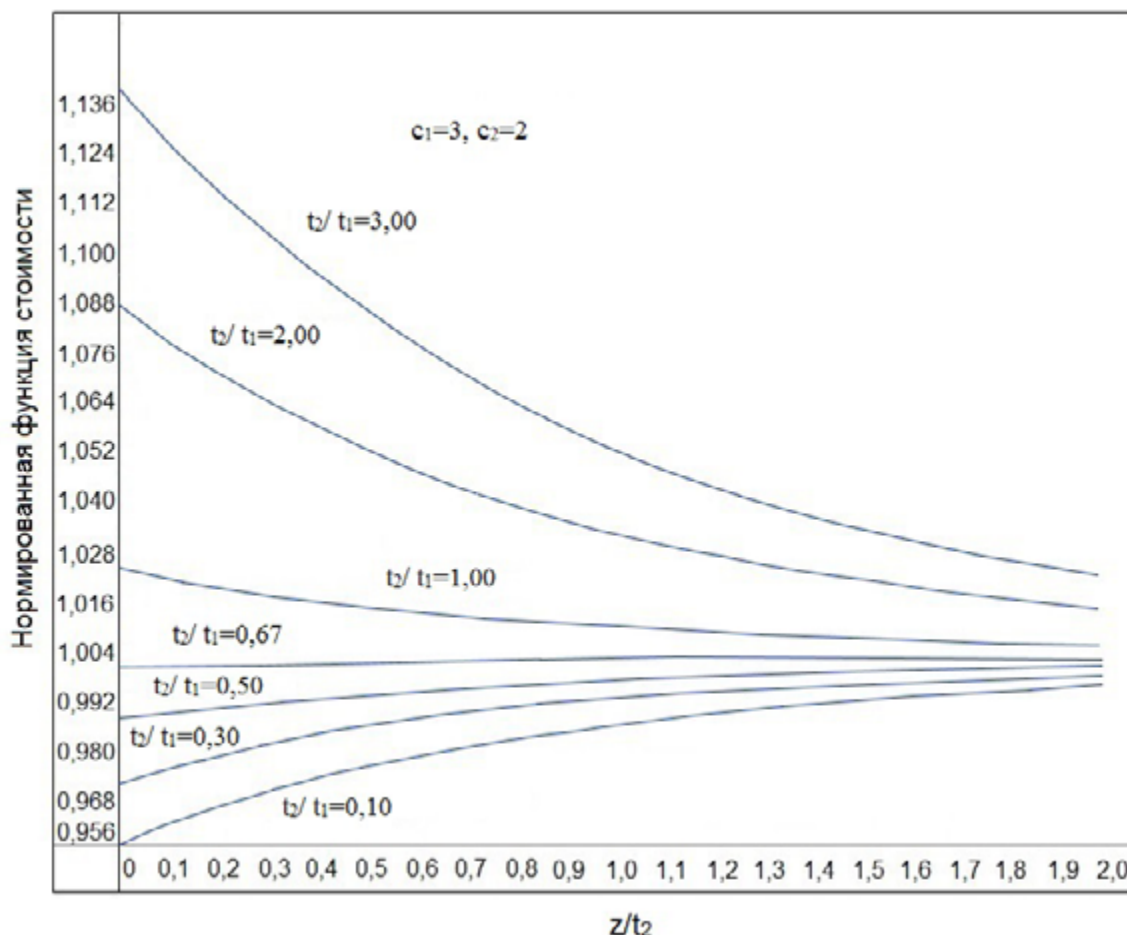


Рис. 3. Зависимость средней стоимости времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями от момента переключения крана между подачами

### Библиографический список

1. Бадецкий А. П. Оптимизация распределения контейнеропотоков на направлении Китай — европейский союз / А. П. Бадецкий, 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. 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.
4. Арефьев И. Б. Анализ и моделирование транспортных узлов / И. Б. Арефьев, Е. К. Коровяковский. — СПб.: ЮПИ, 2018. — 228 с.
5. Кирпичников А. П. Прикладная теория массового обслуживания / А. П. Кирпичников. — Казань: Казанский гос. ун-т, 2008. — 116 с.
6. Паламарчук Г. И. Порядок занятия инфраструктуры железнодорожного транспорта подвижным составом / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. В. Малышев // *Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике: сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2022 года* / Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I. — Санкт-Петербург: Медианапир, 2022. — С. 194–198.

7. Коровяковский Е. К. Разработка модели-тренажера морского порта / Е. К. Коровяковский, Н. С. Белых, Е. А. Андреева и др. // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XI Санкт-Петербургского конгресса, Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2017 года. — Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. — С. 138.

8. 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.

9. Бадецкий А. П. Перспективные технологии адаптивного управления грузопотоками / А. П. Бадецкий // Логистика: современные тенденции развития: материалы XIX Международной научно-практической конференции,

Санкт-Петербург, 2–3 апреля 2020 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2020. — С. 39–44.

10. 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.

Дата поступления: 10.08.2022

Решение о публикации: 10.11.2022

#### Контактная информация:

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

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

## Priority Model of Car Delivery Service

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 — JSC “Russian Railways” Subsidiary, 1, Podyezdnoy lane, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

**For citation:** Malyshev N. V., Boikov S. A. Priority Model of Car Delivery Service // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 839–846. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-839-846

### Summary

**Purpose:** for the definition of optimal switch point of crane operation between platforms, to perform task simulation of priority choice in car delivery service, the task should feature penalty consideration for excessive idle delivery at freight front. **Methods:** Methods of probability theory, queuing and mathematical statistics as well as expert assessments are used to find distribution. **Results:** Priority model for car delivery service has been worked out. The dependences of average cost of idle time of two car delivery under freight operations — from the moment of switch between deliveries at distribution of Erlang of  $k^{\text{th}}$  order of freight operation implementation time and the distribution special case — exponential one at mixed priority of car delivery service - are determined. **Practical significance:** Rational distribution of crane operation is proposed allowing to reduce terminal's costs for penalties for excessive idle delivery at freight front.

**Keywords:** Automation, non-public railways, 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 flows in the direction of China — the European Union]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management* [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 konteynerykh terminalov [On the issue of robotization of rear container terminals]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2020, I. 1, pp. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25. (In Russian)
3. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova 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 vehicles and transport technologies]. 2019, I. 3(41), pp. 112–117. (In Russian)
4. Aref'ev I. B., Korovyakovskiy E. K. *Analiz i modelirovanie transportnykh uzlov* [Analysis and modeling of transport hubs]. St. Petersburg: YuPI Publ., 2018, 228 p. (In Russian)
5. Kirpichnikov A. P. *Prikladnaya teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Applied Queuing Theory]. Kazan': Kazanskiy gos. un-t Publ., 2008, 116 p. (In Russian)
6. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Malyshev N. V. *Poryadok zanyatiya infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta podvizhnym sostavom* [Procedure for Occupation of the Railway Transport Infrastructure by Rolling Stock]. St. Petersburg: Mediapapir Publ., 2022, pp. 194–198. (In Russian)
7. Korovyakovskiy E. K., Belykh N. S., Andreeva E. A. *Razrabotka modeli-trenazhera morskogo porta* [Development of a seaport simulator model]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2017, p. 138. (In Russian)
8. Kobozeva N. G. Analiz pokazateley effektivnosti ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Analysis of efficiency indicators for the use of railway rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Communications]. 2020, vol. 17, I. 1, pp. 77–83. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83. (In Russian)
9. Badetskiy A. P. *Perspektivnye tekhnologii adaptivnogo upravleniya gruzopotokami* [Promising technologies for adaptive traffic management]. St. Petersburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova Publ., 2020, pp. 39–44. (In Russian)
10. Konogray O. A., Voronov A. A. Perspektivy konversii mezhdunarodnykh 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 China-Europe Transit]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development]. 2022, I. 2(50), pp. 190–193. DOI: 10.37124/20799136\_2022\_2\_50\_190. (In Russian)

Received: August 10, 2022

Accepted: November 10, 2022

### Author's information:

Nicolay V. MALYSHEV — Assistant; kol.pgups@mail.ru  
Sergey A. BOIKOV — Head of the Shushary railway station; dcs2\_boykovsa@orw