

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТЫ ПО РОЛИКУ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

А.С. Гуськова

gusanser@bmstu.ru

Е.В. Сафронов

safronov@bmstu.ru

А.Л. Носко

nosko@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Увеличение производительности складов и уменьшение издержек на основные логистические операции достигаются в результате оптимизации методов подбора заказов, маршрутизации комплектовщиков и распределения проходов с местами хранения на этапе проектирования склада. Для блочного хранения продукции на складах используют гравитационные стеллажи для паллет. Такие стеллажи отличаются наличием гравитационного роликового конвейера, по которому передвигается паллета от места загрузки к месту выгрузки. Передвижение паллеты по стеллажу вызывает дополнительные динамические нагрузки, приходящиеся на его металлоконструкцию, для ограничения которых применяют элементы безопасности и ограничители скорости, к которым относятся тормозные ролики. Рассмотрена разработанная конструкция тормозного ролика, состоящая из обечайки, мультипликатора и двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, работающего в режиме динамического торможения. Разработана математическая модель и получена аналитическая зависимость скорости движения паллеты по ролику динамического торможения. Для расчета скорости при выбранной массе паллеты необходимо провести экспериментальные исследования по определению технических характеристик двигателя, которые не указаны в паспортных данных

Ключевые слова

Тормозной ролик, гравитационный роликовый конвейер, паллета, стеллаж, динамическое торможение, математическая модель, ролик динамического торможения

Поступила 27.01.2025

Принята 04.04.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. По результатам маркетинговых исследований прогнозируется 15%-ное годовое увеличение рынка автоматизированных складов в период с 2023 по 2028 год. Основной темп роста задает электронная коммерция, требующая высокой степени оптимизации распределения заказов [1].

Большая часть складских расходов приходится на процесс комплектации и может составлять до 55 % [2]. Многие исследования направлены на увеличение эффективности складских операций за счет оптимизации маршрутов комплектации заказов [3]. При этом оценка времени обработки заказа проводится еще на этапе проектирования склада и предполагает выбор размеров складской зоны [4], типа складского оборудования и методов обработки заказов [1, 3].

Для повышения эффективности обработки грузов на автоматизированных складах используют гравитационные стеллажи, которые совмещают в себе преимущества блочных и глубинных систем хранения [5, 6]. Применение гравитационных стеллажей для паллет (рис. 1) позволяет экономить производственные площади, увеличивать скорость обработки заказов и повышать производительность [7] за счет динамической части стеллажа — гравитационного роликового конвейера (ГРК). Для работы с ГРК применяют краны-штабелеры [8], шаттловые системы [9] и системы производства «Точно в срок» [10]. В [11] отмечается, что использование гравитационных стеллажей по сравнению с фронтальными уменьшает на 22...25 % пробег кранов-штабелеров.

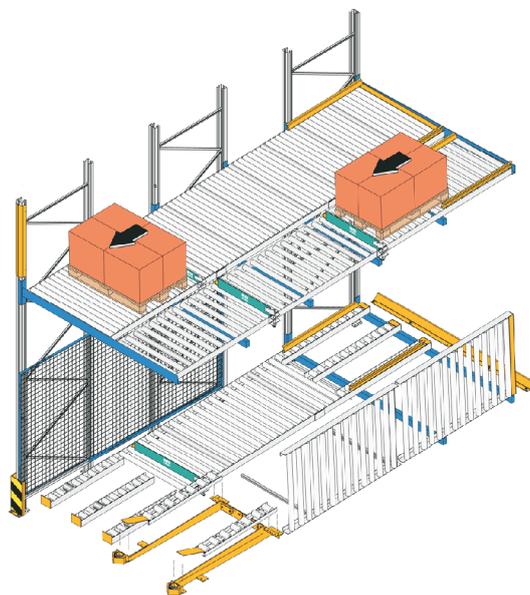


Рис. 1. Гравитационный стеллаж для паллет

Перемещение паллеты по ГРК должно соответствовать требованиям безопасности, обусловленным ограничением скорости паллеты и ее остановкой, при которой не должно происходить повреждения стеллажа или

груза [12]. Для ограничения скорости паллеты используют устройства безопасности. На практике наиболее часто применяют тормозные ролики фрикционного и магнитного принципов торможения [13–15], которые имеют ограниченные эксплуатационные характеристики и уменьшают производительность при работе с паллетами малой массы [16]. В [16, 17] рассматривался ролик динамического торможения (РДТ), который не имеет указанных недостатков и работает за счет вырабатываемого электромагнитного тормозного момента в обмотках электрической машины при преобразовании механической энергии вращения обечайки ролика в электрическую энергию.

Цель настоящей работы — разработка математической модели (ММ) процесса движения паллеты по РДТ.

Материалы и методы. *Принципиальная конструктивная схема РДТ и принцип работы.* Ролик динамического торможения представляет собой обечайку, в которую устанавливается тормозная вставка, состоящая из мультипликатора, предназначенного для преобразования частоты вращения обечайки и приложенного к ней момента, и электрической машины (рис. 2). Тормозное усилие, вырабатываемое электрической машиной, определяется механическими характеристиками режима генератора электрической машины.

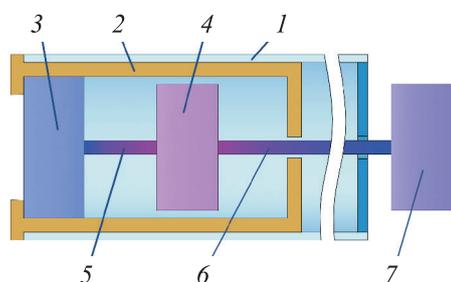


Рис. 2. Принципиальная конструктивная схема РДТ:

- 1 — обечайка; 2 — тормозная вставка;
3 — мультипликатор; 4 — электрическая машина; 5, 6 — механическая и электрическая связи; 7 — тормозное сопротивление или активная нагрузка

Выбор электрической машины. В первую очередь выбор электрической машины определяется внутренним диаметром обечайки ролика.

На практике чаще всего тормозные ролики изготавливают из трубы с внешним диаметром 80 или 89 мм и толщиной стенки 3 мм. В разработанной конструкции РДТ [17] $D_{т.р} = 89$ мм, внутренний диаметр $D_{вн} = 83$ мм.

Конструктивные особенности РДТ должны предусматривать условия собираемости мультипликатора, а также технологические отверстия для вывода кабелей электрической машины. Таким образом, габаритные размеры электрической машины ограничены диаметром $D_{вн} / 2 = 41,5$ мм.

В качестве электрической машины предлагается использовать двигатель постоянного тока малой мощности, который имеет жесткие механические характеристики с широким диапазоном регулирования скорости, небольшие габаритные размеры на единицу полезной мощности и высокий КПД по сравнению с двигателями переменного тока той же мощности. Для условий работы РДТ внутри складского комплекса предлагается использовать двигатель постоянного тока (ДПТ) с постоянными магнитами (ПМ) (далее двигатель).

Регулировка частоты вращения вала двигателя может осуществляться подключением добавочного (тормозного) сопротивления в цепь якоря (рис. 3). В этом случае двигатель будет работать в режиме динамического торможения.

Математическая модель движения паллеты по РДТ. Математическая модель разрабатывалась на основе расчетных схем ГРК и РДТ, двигатель ролика работает в режиме динамического торможения (рис. 4).

Разработанная ММ учитывает преобразование линейной скорости V паллеты во вращение обечайки 1 и передачи ей движущего момента, который через выходную шестерню мультипликатора 3 передается шестерне 4 на валу двигателя 2 (рис. 4, б).

Движение паллеты по РДТ описывается основным уравнением динамики поступательного движения (рис. 4, а) [18]:

$$M \frac{dV}{dt} = G \sin \alpha - \sum W - F_T = G (\operatorname{tg} \alpha - w) - F_T, \quad (1)$$

где M — масса паллеты; V — скорость движения паллеты по РДТ; $G = Mg$ — сила тяжести, действующая на паллету ($g = 9,81$ — ускорение свободного падения); $\sum W$ — сумма сил сопротивления передвижению паллеты на ГРК; F_T — тормозная сила РДТ; $w = \sum \frac{W}{G \cos \alpha}$ — приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК [19]. С учетом малости угла наклона ГРК $\alpha = 1,7 \dots 2,8^\circ$ можно принять $\sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha$, $\cos \alpha \cong 1$.

Вращательное движение РДТ относительно точки O описывается уравнением динамики (см. рис. 4, б):

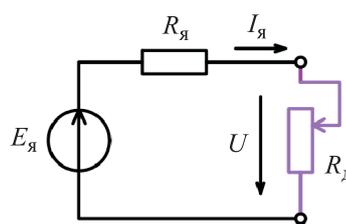


Рис. 3. Схема подключения двигателя с добавочным (тормозным) сопротивлением

$$J_{м.р} \frac{d\omega_p}{dt} = \sum M_O = M_{дв} - M_T,$$

где $J_{м.р}$ — момент инерции РДТ; ω_p — угловая скорость РДТ; $M_{дв}$ — движущий момент, действующий на обечайку РДТ; M_T — тормозной момент, действующий на вал двигателя РДТ, приведенный к его обечайке.

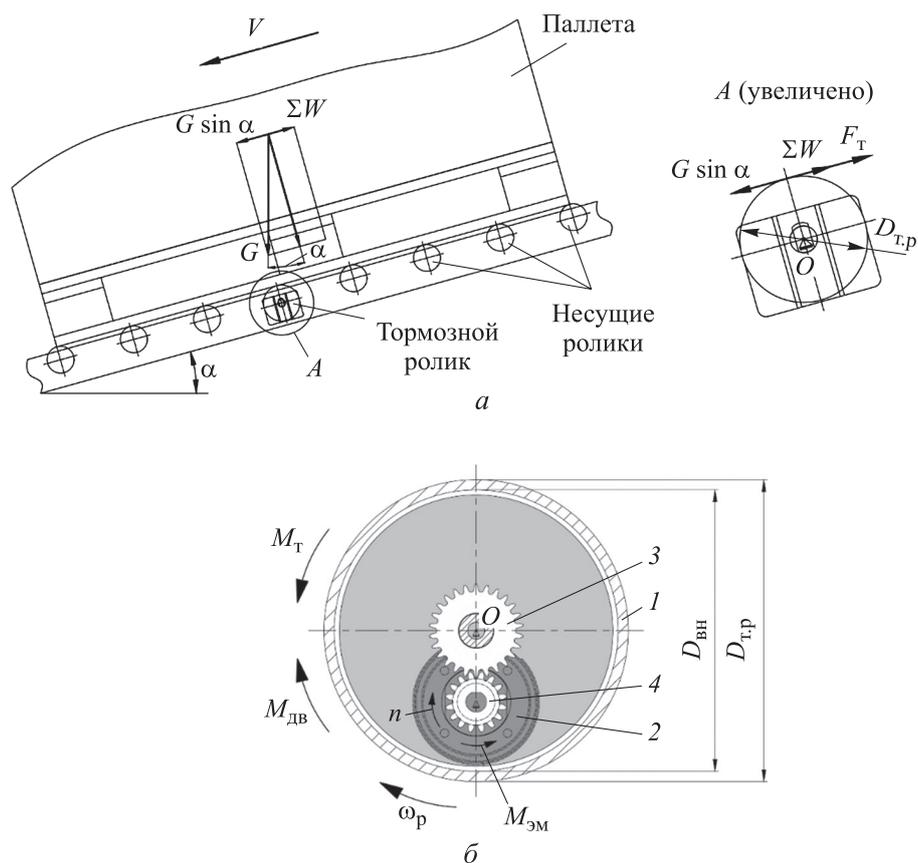


Рис. 4. Расчетные схемы ГРК (а) и РДТ (б)

Приняв допущение о равномерности движения паллеты по РДТ ($dV/dt = 0$) и принимая скорость паллеты $V = (\omega_p D_{т.р})/2$, получаем:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d\left(\frac{\omega_p D_{т.р}}{2}\right)}{dt} = 0; \quad J_{м.р} \frac{d\omega_p}{dt} = 0; \quad M_{дв} - M_T = 0.$$

Следовательно, ММ процесса движения паллеты по РДТ можно записать так:

$$M_{дв} = M_T. \quad (2)$$

При условии $dV/dt = 0$ движущий момент $M_{дв}$, действующий на обечайку РДТ, можно получить из выражения (1):

$$M \frac{dV}{dt} = 0; F_T = G(\operatorname{tg} \alpha - w); M_{дв} = \frac{D_{т.р} G(\operatorname{tg} \alpha - w)}{2}. \quad (3)$$

Согласно исследованиям [19], при определении суммы сил сопротивления $\sum W$ передвижению паллеты по ГРК необходимо учитывать только сопротивления от трения в опорах несущих роликов и качения паллеты по несущим роликам ГРК.

Тормозной момент M_T , действующий на вал двигателя РДТ, приведенный к его обечайке, определяется как

$$M_T = (M_{эм} + M_c) u_m u_{м/р} \eta_m \eta_{м/р}, \quad (4)$$

где $M_{эм}$ — электромагнитный момент, действующий на обмотки двигателя; M_c — механический момент сопротивления двигателя; u_m — передаточное отношение мультипликатора РДТ; $u_{м/р}$ — передаточное отношение мотор/редуктора РДТ; η_m — КПД мультипликатора; $\eta_{м/р}$ — КПД редуктора, встроенного в мотор/редуктор.

Электродвижущая сила E_y обмотки якоря двигателя в режиме генератора [20]

$$E_y = U + (R_y + R_d) I_y, \quad (5)$$

где U — напряжение на обмотках якоря двигателя; R_y — сопротивление обмотки якоря двигателя; R_d — добавочное сопротивление; I_y — ток якоря двигателя.

Электродвижущую силу в обмотке якоря двигателя можно записать в виде [20]

$$E_y = C_e \Phi n, \quad (6)$$

где C_e — конструктивная постоянная двигателя; Φ — магнитный поток возбуждения постоянных магнитов; n — частота вращения вала двигателя.

Ток якоря двигателя для работы в режиме генератора [20] определяется так:

$$I_y = \frac{\pi}{30} \frac{1}{C_e \Phi} M_{эм} \eta_{дв}, \quad (7)$$

где $\eta_{дв}$ — КПД двигателя.

Из (6) выразим частоту вращения вала двигателя, подставив в него (5) и (7):

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} + \frac{\pi}{30} \frac{1}{(C_e \Phi)^2} (R_{я} + R_{д}) M_{эм} \eta_{дв}. \quad (8)$$

Электромагнитный тормозной момент $M_{эм}$ выразим из (4), учитывая (2) и (3):

$$M_{эм} = \frac{D_{т.р} G (\operatorname{tg} \alpha - w)}{2u_M u_{M/p} \eta_M \eta_{M/p}} - M_c. \quad (9)$$

Частота вращения обечайки РДТ:

$$n_{об} = \frac{60V}{\pi D_{т.р}} = \frac{n}{u_M u_{M/p}}. \quad (10)$$

Подставляя (8) и (9) в выражение (10), получаем скорость движения паллеты по РДТ

$$V = \frac{\pi D_{т.р}}{60 u_M u_{M/p}} \left(\frac{U}{C_e \Phi} + \frac{\pi (R_{я} + R_{д}) \eta_{дв}}{30 (C_e \Phi)^2} \left(\frac{D_{т.р} G (\operatorname{tg} \alpha - w)}{2 u_M u_{M/p} \eta_M \eta_{M/p}} - M_c \right) \right).$$

В случае динамического торможения двигателя $U = 0$ скорость движения паллеты по РДТ

$$V = \frac{\pi^2 D_{т.р} \eta_{дв}}{1800 u_M u_{M/p}} \frac{(R_{я} + R_{д})}{(C_e \Phi)^2} \left(\frac{D_{т.р} g (\operatorname{tg} \alpha - w)}{2 u_M u_{M/p} \eta_M \eta_{M/p}} M - M_c \right).$$

Расчетным путем определить значение $R_{я}$ невозможно [20], а конструктивную постоянную двигателя C_e и значение магнитного потока Φ производители электрических машин не приводят в технических характеристиках. Поэтому определение этих параметров возможно только экспериментальным путем.

Заключение. Разработана математическая модель и получена аналитическая зависимость скорости V движения паллеты по РДТ от сопротивления $R_{я}$ якоря двигателя, добавочного сопротивления $R_{д}$ двигателя, включенного в цепь якоря, конструктивной постоянной C_e двигателя, магнитного потока Φ и общего передаточного числа редукторов $u_{общ} = u_M u_{M/p}$. Для получения расчетной зависимости скорости V движения паллеты по ГРК от массы паллеты M и уклона полотна ГРК $\operatorname{tg} \alpha$, необходимо провести экспериментальные исследования для определения значений сопротивления якоря $R_{я}$ двигателя, конструктивной постоянной C_e двигателя и магнитного потока Φ .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wang F., Wang Y., Chang D. Joint optimization of order allocation and rack selection in the “parts-to-picker” picking system considering multiple stations workload balance. *Systems*, 2023, vol. 11, no. 4, art. 179. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11040179>
- [2] Feldt J., Kontny H., Niemietz F. How disruptive start-ups change the world of warehouse logistics. Data science and innovation in supply chain management: how data transforms the value chain. *Proc. HICL*, vol. 29, pp. 3–24. DOI: <https://doi.org/10.15480/882.3114>
- [3] Ueno D., Hirata E. The optimization of picking in logistics warehouses in the event of sudden picking order changes and picking route blockages. *Mathematics*, 2024, vol. 12, no. 16, art. 2580. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12162580>
- [4] Accorsi R., Bortolini M., Gamberi M., et al. Multi-objective warehouse building design to optimize the cycle time, total cost, and carbon footprint. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 1-4, pp. 839–854. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0157-9>
- [5] Sulirova I., Zavadzka L., Rakyta M., et al. State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 192, pp. 857–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.148>
- [6] Boywitz D., Boysen N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems. *Comput. Oper. Res.*, 2018, vol. 100, pp. 189–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.014>
- [7] Lehmann T., Hußmann J. Travel time model for multi-deep automated storage and retrieval systems with different storage strategies. *Int. J. Prod. Res.*, 2023, vol. 61, no. 16, pp. 5676–5691. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2110536>
- [8] Metahri D., Hachemi K. Automated storage and retrieval systems: a performances comparison between free-fall-flow-rack and classic flow-rack. *6th ICSC*, 2017, pp. 589–594. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2017.7958654>
- [9] Zaerpour N., Yu Y.G., de Koster R.B.M. Storing fresh produce for fast retrieval in an automated compact cross-dock system. *Prod. Oper. Manag.*, 2015, vol. 24, no. 8, pp. 1266–1284. DOI: <https://doi.org/10.1111/poms.12321>
- [10] Halim N.H.A., Jaffar A., Yusoff N., et al. Gravity Flow Rack’s material handling system for Just-in-Time (JIT) production. *Procedia Eng.*, 2012, vol. 41, pp. 1714–1720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.373>
- [11] Wu S., Wu Ya., Wang Ya. A structured comparison study on storage racks system. *J. Residuals Sc. Tech.*, 2016, vol. 13, no. 8. URL: https://www.zhangqiaokeyan.com/academic-journal-foreign_detail_thesis/0204118045809.html
- [12] Nosko A.L., Safronov E.V., Soloviev V.A. Study of friction and wear characteristics of the friction pair of centrifugal brake rollers. *J. Frict. Wear*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 145–151. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366618020125>

- [13] Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А. Ролик тормозной реверсивный. Патент РФ 212450. Заявл. 13.05.2022, опубл. 21.07.2022.
- [14] Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А. и др. Ролик тормозной магнитный для роликовых гравитационных конвейеров. Патент РФ 198420. Заявл. 12.02.2020, опубл. 06.07.2020.
- [15] Сафронов Е.В., Носко А.Л., Шарифуллин И.А. Тормозные ролики для паллетных гравитационных стеллажей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024.
- [16] Гуськова А.С., Сафронов Е.В., Носко А.Л. Тормозной ролик рекуперативного торможения для паллетных гравитационных стеллажей. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2023, № 4, с. 25–33. EDN: LGKOHQ
- [17] Носко А.Л., Сафронов Е.В., Космин А.С. и др. Ролик тормозной генерирующий вентилируемый конвейерный. Патент РФ 221307. Заявл. 25.07.2023, опубл. 30.10.2023.
- [18] Сафронов Е.В. Обеспечение безопасности и повышение эффективности работы гравитационного стеллажа для паллет. Дис. ... канд. техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
- [19] Ивановский К.Е., Раковщик А.Н., Цоглин А.Н. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. М., Машиностроение, 1973.
- [20] Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности. М., Высшая школа, 1967.

Гуськова Анна Сергеевна — ассистент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Сафронов Евгений Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Носко Андрей Леонидович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гуськова А.С., Сафронов Е.В., Носко А.Л. Математическая модель процесса движения паллеты по ролику динамического торможения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 4 (155), с. 60–71. EDN: HQFBWP

MATHEMATICAL MODEL OF THE PALLET MOTION PROCESS ALONG THE DYNAMIC BRAKING ROLLER

A.S. Guskova

E.V. Safronov

A.L. Nosko

gusanser@bmstu.ru

safronov@bmstu.ru

nosko@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

Increasing the warehouse performance and reducing costs for the core logistics operations is achieved by optimizing the order picking methods, picker routing, and aisle allocation with the storage positions in the warehouse design phase. Gravity pallet rack is a type of the products block storage in a warehouse. These racks differ from their analogues by the installed gravity roller conveyor, along which the pallet is moving from the loading to the unloading point. The pallet motion along the rack causes additional dynamic loads on its metal structure. To limit these loads, safety devices and speed limiters including the braking rollers are used. The paper considers design of a braking roller that consists of a shell, multiplier, and DC motor with permanent magnets operating in the dynamic braking mode. A mathematical model is developed; and an analytical dependence is obtained for the pallet speed along the dynamic braking roller. To obtain the estimated speed for the given pallet weight, experimental testing should be conducted to determine the motor technical characteristics, which are not specified in the specifications

Keywords

Braking roller, gravity roller conveyor, pallet, rack, dynamic braking, mathematical model, dynamic braking roller

Received 27.01.2025

Accepted 04.04.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Wang F., Wang Y., Chang D. Joint optimization of order allocation and rack selection in the “parts-to-picker” picking system considering multiple stations workload balance. *Systems*, 2023, vol. 11, no. 4, art. 179. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11040179>
- [2] Feldt J., Kontny H., Niemietz F. How disruptive start-ups change the world of warehouse logistics. Data science and innovation in supply chain management: how data transforms the value chain. *Proc. HICL*, vol. 29, pp. 3–24. DOI: <https://doi.org/10.15480/882.3114>
- [3] Ueno D., Hirata E. The optimization of picking in logistics warehouses in the event of sudden picking order changes and picking route blockages. *Mathematics*, 2024, vol. 12, no. 16, art. 2580. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12162580>

- [4] Accorsi R., Bortolini M., Gamberi M., et al. Multi-objective warehouse building design to optimize the cycle time, total cost, and carbon footprint. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 1-4, pp. 839–854. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0157-9>
- [5] Sulirova I., Zavodska L., Rakyta M., et al. State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 192, pp. 857–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.148>
- [6] Boywitz D., Boysen N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems. *Comput. Oper. Res.*, 2018, vol. 100, pp. 189–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.07.014>
- [7] Lehmann T., Hußmann J. Travel time model for multi-deep automated storage and retrieval systems with different storage strategies. *Int. J. Prod. Res.*, 2023, vol. 61, no. 16, pp. 5676–5691. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2110536>
- [8] Metahri D., Hachemi K. Automated storage and retrieval systems: a performances comparison between free-fall-flow-rack and classic flow-rack. *6th ICSC*, 2017, pp. 589–594. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2017.7958654>
- [9] Zaerpour N., Yu Y.G., de Koster R.B.M. Storing fresh produce for fast retrieval in an automated compact cross-dock system. *Prod. Oper. Manag.*, 2015, vol. 24, no. 8, pp. 1266–1284. DOI: <https://doi.org/10.1111/poms.12321>
- [10] Halim N.H.A., Jaffar A., Yusoff N., et al. Gravity Flow Rack's material handling system for Just-in-Time (JIT) production. *Procedia Eng.*, 2012, vol. 41, pp. 1714–1720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.373>
- [11] Wu S., Wu Ya., Wang Ya. A structured comparison study on storage racks system. *J. Residuals Sc. Tech.*, 2016, vol. 13, no. 8. Available at: https://www.zhangqiaokeyan.com/academic-journal-foreign_detail_thesis/0204118045809.html
- [12] Nosko A.L., Safronov E.V., Soloviev V.A. Study of friction and wear characteristics of the friction pair of centrifugal brake rollers. *J. Frict. Wear*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 145–151. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366618020125>
- [13] Nosko A.L., Safronov E.V., Potapov V.A. Rolik tormoznoy reversivnyy [Reversible brake roller]. Patent RU 212450. Appl. 13.05.2022, publ. 21.07.2022 (in Russ.).
- [14] Nosko A.L., Safronov E.V., Potapov V.A., et al. Rolik tormoznoy magnitnyy dlya rolikovykh gravitatsionnykh konveyerov [Magnetic brake roller for roller gravity conveyors]. Patent RU 198420. Appl. 12.02.2020, publ. 06.07.2020 (in Russ.).
- [15] Safronov E.V., Nosko A.L., Sharifullin I.A. Tormoznye roliki dlya palletnykh gravitatsionnykh stellazhey [Brake rollers for pallet gravity racks]. Moscow, BMSTU Publ., 2024.
- [16] Guskova A.S., Safronov E.V., Nosko A.L. Regenerative brake roller for pallet gravity racks. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2023, no. 4, pp. 25–33 (in Russ.). EDN: LGK0XQ

[17] Nosko A.L., Safronov E.V., Kosmin A.S., et al. Rolik tormoznoy generiruyushchiy ventiliruemyy konveyernyy [Brake roller generating ventilated conveyor]. Patent RU 221307. Appl. 25.07.2023, publ. 30.10.2023 (in Russ.).

[18] Safronov E.V. Obespechenie bezopasnosti i povyshenie effektivnosti raboty gravitatsionnogo stellazha dlya pallet. Dis. kand. tekhn. nauk [Ensuring the safety and increasing the efficiency of the gravity pallet racking. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Moscow, BMSTU, 2019 (in Russ.).

[19] Ivanovskiy K.E., Rakovshchik A.N., Tsoglin A.N. Rolikovyie i diskovyie konveyery i ustroystva [Roller and disc conveyors and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.

[20] Ermolin N.P. Elektricheskie mashiny maloy moshchnosti [Low-power electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1967.

Guskova A.S. — Assistant, Department of Lifting and Transport Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Safronov E.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Lifting and Transport Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Nosko A.L. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Lifting and Transport Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Guskova A.S., Safronov E.V., Nosko A.L. Mathematical model of the pallet motion process along the dynamic braking roller. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 4 (155), pp. 60–71 (in Russ.).

EDN: HQFBWP