УДК 621.867.61
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-364-373

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТЫ ПО ТОРМОЗНОМУ РОЛИКУ МАГНИТНОГО ТИПА

И.А. Шарифуллин, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Одним из основных элементов безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров, применяемых в стеллажах для паллет, является тормозной ролик. Наиболее перспективной конструкцией является тормозной ролик магнитного (вихретокового) типа. Принцип работы таких роликов основан на законах электромагнитной индукции и предполагает торможение движущегося в магнитном поле проводника, обусловленное взаимодействием возникающих в объеме проводника вихревых токов (или токов Фуко) с внешним магнитным полем. Однако на рынке складского стеллажного оборудования тормозные магнитные ролики не нашли широкого применения ввиду своей высокой стоимости, которая в первую очередь обусловлена отсутствием отечественных конструкций и методик их расчета. Цель данной работы – разработка математической модели процесса движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа.*
Материалы и методы. *В статье представлены результаты теоретического исследования по разработке математической модели процесса движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа, изложенные в работах по центробежным фрикционным роликам и по вихретоковым тормозным устройствам.*
Результаты. *Установлено, что основным параметром, определяющим функции тормозного магнитного ролика, а значит и скорость движения паллеты по гравитационному роликовому конвейеру, является коэффициент магнитной вязкости. Построена зависимость скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику при различных значениях коэффициента магнитной вязкости, проведен ее анализ.*
Заключение. *Разработана математическая модель процесса движения паллеты по тормозному магнитному ролику. Получено уравнение скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику. Для обоснованного выбора конструктивных параметров тормозного магнитного ролика требуются экспериментальные исследования по определению коэффициента магнитной вязкости.*

КЛЮЧЕВЫЕ *СЛОВА: паллета, стеллаж, гравитационный роликовый конвейер, магнитный (вихретоковый) тормозной ролик, коэффициент магнитной вязкости.*

БЛАГОДАРНОСТИ. *Авторы выражают благодарность рецензентам статьи.*

Поступила 04.05.20, принята к публикации 30.06.2020.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В. Математическая модель процесса движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа. *Вестник СибАДИ. 2020;* 17 (3): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-364-373

© Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-364-373

MATHEMATICAL MODEL OF THE MOTION PALLET PROCESS ON BRAKE MAGNETIC TYPE ROLLER

I. A. Sharifullin, A. L. Nosko, E. V. Safronov
Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. *One of the main elements of the safe operation of gravity roller conveyors used in pallet racks is a brake roller. The most promising design is the brake roller magnetic (eddy current) type. The operation principle of such rollers is based on the laws of electromagnetic induction and involves the braking of a conductor moving in a magnetic field, due to the interaction of eddy currents (or Foucault currents) arising in the volume of the conductor with an external magnetic field. However, in the market of warehouse shelving equipment, brake magnetic rollers are not widely used due to their high cost, which is primarily due to the lack of domestic designs and methods for their calculation. The aim of the work is to develop a mathematical model of the moving pallets process on a magnetic type brake roller.*
Materials and methods. *The paper presented the theoretical study results on the development of a mathematical model of the moving pallets process on a magnetic type brake roller, described in works on centrifugal friction rollers and eddy current brake devices.*
Results. *The main parameter determining the functions of the brake magnetic roller and hence the speed of the pallet along the gravity roller conveyor is a magnetic viscosity coefficient. The speed dependence of the pallets on the brake magnetic roller for various values of a magnetic viscosity coefficient is determined, its analysis is carried out.*
Conclusions. *A mathematical model of the moving pallets process on a brake magnetic roller is developed. The movement speed equation of the pallets on the brake magnetic roller is obtained. For a reasonable choice of the design parameters of the magnetic brake roller, experimental studies are required to determine a magnetic viscosity coefficient.*

KEYWORDS: *pallet, rack, gravity roller conveyor, magnetic (eddy current) brake roller, magnetic viscosity coefficient.*

ACKNOWLEDGEMENTS. *The authors express their gratitude to the reviewers of the article.*

Submitted 04.05.20, revised 30.06.2020.
The authors have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Sharifullin I. A., Nosko A. L., Safronov E. V. Mathematical model of the motion pallet process on brake magnetic type roller. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (3): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-364-373

© Sharifullin I. A., Nosko A. L., Safronov E. V.

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Гравитационный стеллаж (рисунок 1) для паллет является одним из видов блочного хранения или глубинных стеллажных систем хранения [1, 2, 3] и состоит из статической части (металлоконструкции) и динамической части (ролики, устройство остановки и разделения паллет, тормозные ролики и др.) [4]. Использование гравитационного стеллажа позволяет сократить расстояние перемещения погрузчика на 25% по сравнению с фронтальными стеллажами [5], поэтому такие стеллажи могут быть использованы в автоматизированном складе [6, 7].

Основным элементом безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров (далее – ГРК), применяющихся в стеллажах для хранения и перемещения паллет с грузом под действием собственного веса, являются тормозные ролики [8], которые устанавливаются по длине конвейера с определенным шагом. Использование тормозных роликов обусловлено необходимостью ограничения скорости паллеты с грузом (далее – паллеты) в канале стеллажа [9]. Наиболее широкое применение в зарубежных гравитационных стеллажных системах для паллет нашли центробежные фрикционные ролики [8]. Однако они имеют целый ряд недостатков, главным из которых является износ фрикционной накладки тормоза, и, как следствие, изменение тормозных характеристик ролика.

Проведенный анализ различных конструкций тормозных роликов гравитационных конвейеров для паллет [8] показал, что одной из наиболее перспективных конструкций тормозных роликов будут тормозные ролики магнитного (вихретокового) типа (далее – ТМР), главным преимуществом которых является бесконтактное (не фрикционное) торможение, и, соответственно, отсутствие износа фрикционной накладки тормоза ролика.

Принцип работы таких роликов основан на законах электромагнитной индукции и предполагает торможение движущегося в магнитном поле проводника, обусловленное взаимодействием возникающих в объеме проводника вихревых токов (или токов Фуко) с внешним магнитным полем [10].

Однако на рынке складского стеллажного оборудования ТМР не нашли широкого применения ввиду своей высокой стоимости, которая в первую очередь обусловлена отсутствием отечественных конструкций и методик их расчета.

Целью работы является разработка математической модели (далее – ММ) процесса движения паллеты по ТМР.

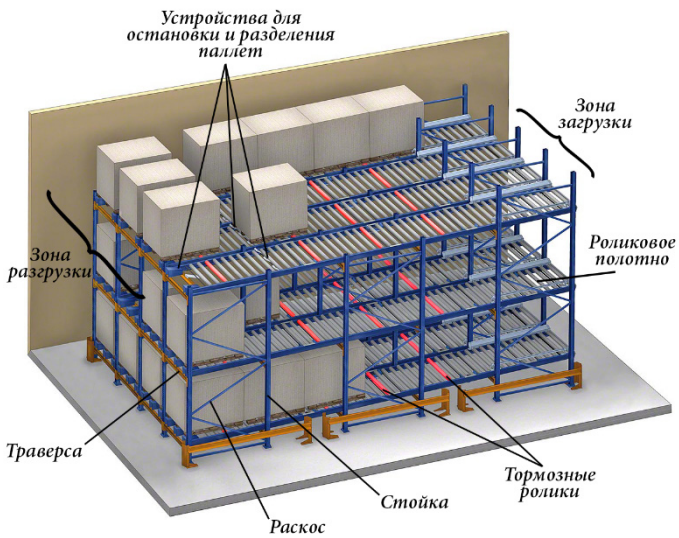


Рисунок 1 – Система паллетных гравитационных стеллажей

Figure 1 – Gravity pallet racking system

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конструкция и описание работы ТМР. В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Подъемно-транспортные системы» разработан ТМР (рисунок 2), который представляет собой тормозную вставку *3*, на оси *4* которой устанавливаются планетарный мультипликатор *1* и магнитный (вихретоковый) тормоз *2*.

Процесс торможения ТМР (рисунок 3) начинается при действии на обечайку ролика (корпус *3* тормозной вставки) крутящего момента, который через планетарный мультипликатор *1* передается на кольцо *5* (представлен прозрачным) и приводит его во вращение в магнитном поле, создаваемым постоянными магнитами *6*, расположенными с чередующейся полярностью и жестко связанными посредством переходника с тормозной вставкой *3*.

Кольцо *5* выполнено из материала, обладающего высокой удельной проводимостью, например меди или алюминия. Согласно закону силы Лоренца на поверхности кольца индуцируются вихревые токи (токи Фуко) и создают момент сопротивления приложенной внешней нагрузке (тормозной момент). В качестве материала постоянных магнитов *6* используется соединение Nd-Fe-B (неодим-железо-бор). Такие магниты обладают наилучшими магнитными и электрическими свойствами, срок службы которых на сегодняшний день составляет 20–25 лет и более, а также имеют высокое значение коэрцитивной силы, что делает ТМР практически нечувствительным к воздействию внешних магнитных полей [11].

Таким образом, в конструкции ТМР величина воздушного зазора между магнитами *6* и кольцом *5* остается неизменной, а тормозной момент зависит от скорости их относительного вращения.

Математическая модель расчета. При разработке ММ были использованы подходы, изложенные в работах [9, 12] для центробежных фрикционных роликов и [13, 14] для вихретоковых тормозных устройств. На рисунке 4 представлены расчетные схемы ГРК и ТМР.

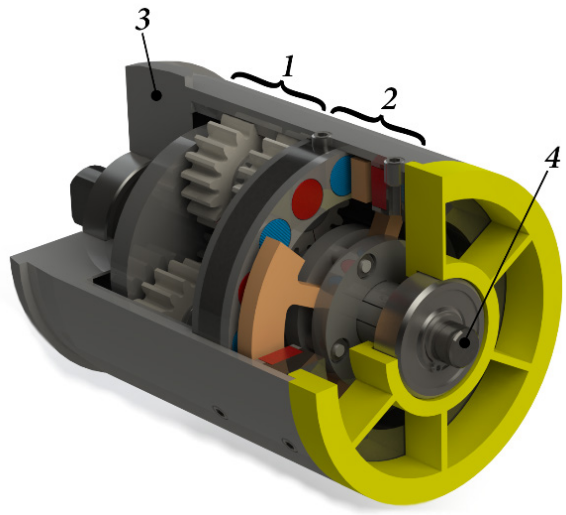


Рисунок 2 – Общий вид ТМР (3D-модель):
1 – планетарный мультипликатор,
2 – магнитный (вихретоковый) тормоз,
3 – тормозная вставка, 4 – ось

Figure 2 – General view of TMP (3D model):
1 – planetary multiplier, 2 – magnetic (eddy current) brake,
3 – brake insert, 4 – axis

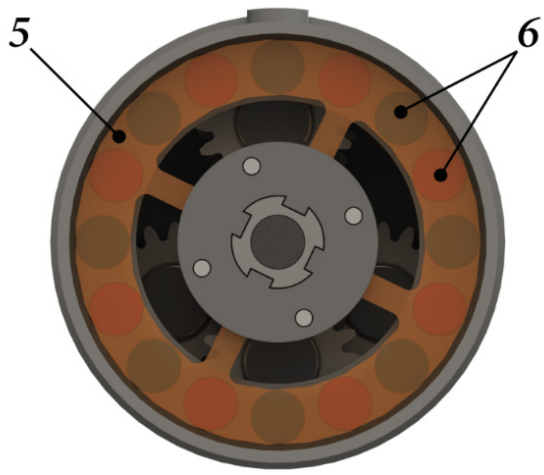
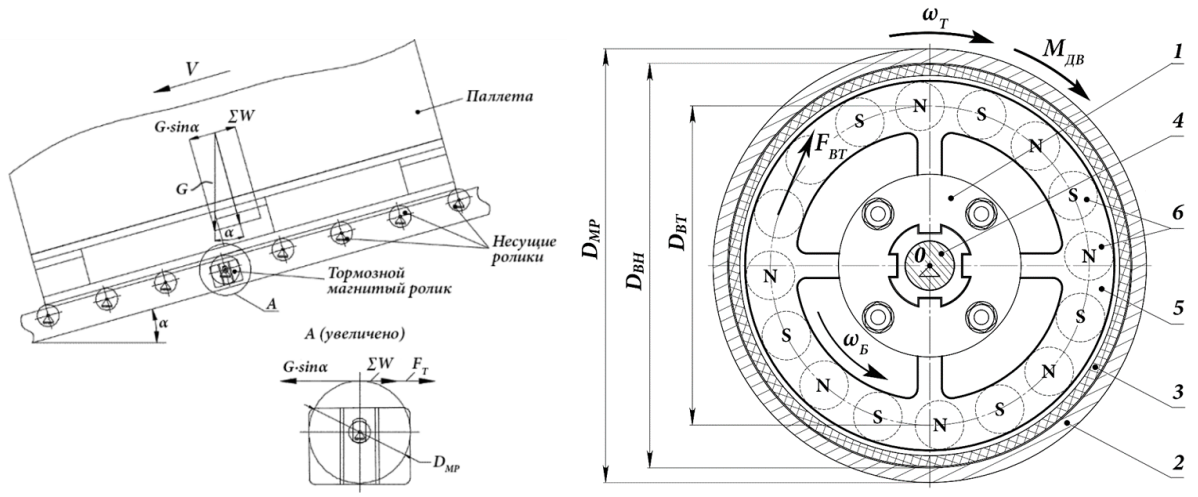


Рисунок 3 – Магнитный (вихретоковый) тормоз:
5 – кольцо (представлено прозрачным),
6 – постоянные магниты

Figure 3 – Magnetic (eddy current) brake:
5 – ring (transparent), 6 – permanent magnets

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



а б

Рисунок 4 – Расчетные схемы ГРК (а) и ТМР (б):
1 – ступица; 2 – обечайка ТМР; 3 – тормозная вставка; 4 – неподвижная ось тормозной вставки; 5 – медное кольцо; 6 – постоянные магниты

Figure 4 – Design schemes of ГРК (a) and ТМР (б):
1 – nave; 2 – TMP shell; 3 – brake insert; 4 – fixed axis of the brake insert; 5 – copper ring; 6 – permanent magnets

Движение паллеты по ТМР описывается основным уравнением динамики поступательного движения (рисунок 4,*а*), которое имеет вид

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

где M – масса паллеты, кг; V – скорость движения паллеты по ТМР, м/с; G – сила тяжести, действующая на паллету, Н; ΣW – сумма сил сопротивления передвижению паллеты на ГРК, Н; F_T – тормозная сила ТМР, Н; $w = \Sigma\frac{W}{G\cdot\cos\alpha}$ – приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК [15]. С учетом малости угла наклона ГРК α = 1,7…2,8°, можно принять $\sin\alpha \cong \tan\alpha,\ \cos\alpha \cong 1$.

В свою очередь *вращение ТМР* может быть описано основным уравнением динамики вращательного движения относительно т. О (рисунок 4,*б*):

$$J_{MP}\frac{d\omega_T}{dt} = \sum M_O = M_{ДВ} - M_{T1} - M_{T2}, \quad (2)$$

где J_{MP} – момент инерции ТМР, кг·м^2; ω_T – угловая скорость ТМР, с$^{-1}$; $M_{ДВ}$ – движущий момент, действующий на обечайку ТМР, Н·м; M_{T1}, M_{T2} – тормозные моменты, действующие на обечайку и ступицу вихретокового тормоза ТМР, приведенный к его обечайке, соответственно, Н·м.

Считая движение паллеты по ТМР равномерным ($\frac{dV}{dt} = 0$) и принимая скорость паллеты $V = \frac{\omega_T D_{MP}}{2}$, где D_{MP} – диаметр ТМР, получим

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d\left(\frac{\omega_T D_{MP}}{2}\right)}{dt} = 0 \Rightarrow J_{MP}\frac{d\omega_T}{dt} = 0 \Rightarrow M_{ДВ} - M_{T1} - M_{T2} = 0. \quad (3)$$

Следовательно, ММ процесса движения паллеты по ТМР может быть представлена в виде

$$M_{ДВ} = M_{T1} + M_{T2}. \quad (4)$$

С учетом малости угла наклона α роликового полотна ГРК движущий момент $M_{ДВ}$, действующий на обечайку ТМР равен

$$M\frac{dV}{dt} = 0 \Rightarrow F_T = G(\tan\alpha - w) \Rightarrow M_{ДВ} = \frac{D_{MP}\cdot G(\tan\alpha - w)}{2}. \quad (5)$$

При определении суммы сил сопротивления ΣW передвижению паллеты на ГРК согласно исследованиям [12] при движении паллеты по роликовому полотну ГРК можно принять следующие допущения:

- скольжение паллеты по роликам отсутствует;
- из-за равномерного характера движения паллет по ГРК силы инерции несущих роликов и паллеты не возникают;

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

• сопротивление от неровности роликового полотна ГРК является местным и в расчетах может не учитываться.

В этом случае необходимо учитывать только сопротивления от трения в опорах несущих роликов и качения паллеты по несущим роликам ГРК, определение которых подробно изложено в [16, 17, 18].

Тормозной момент M_{T1}, действующий на обечайку ТМР:

$$M_{T1} = F_{BT} \cdot \frac{D_{BT}}{2}, \quad (6)$$

где F_{BT} – сила торможения вихретокового тормоза, Н; $D_{BT}/2$ – расстояние от оси вращения ТМР до центра постоянных магнитов, м.

Тормозной момент M_{T2}, действующий на ступицу 1 вихретокового тормоза ТМР, приведенный к его обечайке равен

$$M_{T2} = F_{BT} \cdot \frac{D_{BT}}{2} \cdot u \cdot \eta_{MP}, \quad (7)$$

где u – передаточное отношение мультипликатора ТМР; η_{MP} – КПД ТМР.

Подставив (5) – (7) в (4) получим

$$\frac{D_{MP} \cdot G(\tan\alpha - w)}{2} = F_{BT} \cdot \frac{D_{BT}}{2} + F_{BT} \cdot \frac{D_{BT}}{2} \cdot u \cdot \eta_{MP}. \quad (8)$$

В таком случае сила торможения вихретокового тормоза ТМР, учитывая $G=M \cdot g$ (где g=9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения):

$$F_{BT} = \frac{D_{MP} \cdot M \cdot g(\tan\alpha - w)}{D_{BT} \cdot (1 + u \cdot \eta_{MP})}. \quad (9)$$

С другой стороны согласно [13, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26] сила торможения вихретокового тормоза определяется следующим образом:

$$F_{BT} = \beta \cdot \omega_{отн} \cdot \frac{D_{BT}}{2}, \quad (10)$$

где β – коэффициент магнитной вязкости, Н·с/м; $\omega_{отн}$ – угловая скорость медного кольца относительно постоянных магнитов, с$^{-1}$.

Тогда для представленной конструкции ТМР (рисунок 4,*б*): $\omega_{отн} = \omega_T + \omega_Б$, где $\omega_T = \pi n_T / 30$ –, угловая скорость обечайки ТМР, с$^{-1}$; n_T – частота вращения обечайки ТМР, об/мин; $\omega_Б = \pi n_Б / 30$ – угловая скорость ступицы вихретокового тормоза, с$^{-1}$; $n_Б$ – частота вращения ступицы вихретокового тормоза, об/мин. При этом ввиду наличия мультипликатора $n_Б = u \cdot n_T$.

При условии отсутствия проскальзывания паллеты по ТМР (на основании исследований, проведенных в работе [12]) частота вращения обечайки n_T ТМР:

$$n_T = \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D_{MP}}. \quad (11)$$

Тогда $\omega_{отн}$:

$$\omega_{отн} = \frac{\pi \cdot n_Б}{30} + \frac{\pi \cdot n_T}{30} = \frac{\pi}{30}(u \cdot n_T + n_T) = \cdot$$
$$= \frac{\pi}{30} \cdot \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D_{MP}}(1+u) = \frac{2 \cdot V}{D_{MP}}(1+u). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (10) и приравнивая (9) и (10), получим расчетную зависимость для определения скорости V движения паллеты по ТМР:

$$V = \frac{D_{MP}^2 \cdot g(\tan\alpha - w)}{D_{BT}^2 \cdot \beta \cdot (1 + u \cdot \eta_{MP})(1+u)} \cdot M. \quad (13)$$

Как видно из анализа формулы (13), основным параметром, определяющим тормозные функции ТМР, а значит и скорость движения паллеты по ТМР, является коэффициент магнитной вязкости – β.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ расчетной зависимости скорости движения паллеты по магнитному ролику. Как правило, диаметр ТМР D_{MP} выбирается исходя из конструктивных ограничений ГРК и гравитационного стеллажа для паллет. На практике чаще всего используются трубы с диаметром $D_{MP,}$ равным 80 или 89 мм с толщиной стенки 3 мм. В разработанной конструкции (см. рисунок 2) D_{MP} = 89 мм, а D_{BH} = 83 мм, а в качестве мультипликатора на основании анализа, проведенного в работе [6], используется двухступенчатый мультипликатор с передаточным отношением u=24. КПД ТМР η_{MP} может быть рассчитан по аналогии с КПД центробежного фрикционного ролика [12].

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

Таблица
Исходные данные для расчета скорости V движения паллеты по ТМР
Table
Initial data for calculating the speed V of the pallet movement on TMP

Параметр	Значение	Единица измерения
Масса паллеты М	100–1500	кг
Диаметр ТМР $D_{МР}$	0,089	м
Длина ТМР $L_{МР}$	0,88	м
Внутренний диаметр обечайки ТМР $D_{ВН}$	0,083	м
Приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК *w*	0,02	–
Уклон роликового полотна ГРК tan α	0,04	–

Согласно [13, 14, 19, 20] коэффициент магнитной вязкости может быть определен по формуле

$$\beta = n\frac{\pi\sigma}{4}D^2 dB^2, \qquad (14)$$

где *n* – количество магнитов; *σ* – удельная проводимость материала кольца, См/м; *B* – магнитная индукция, Тл; *D* – диаметр поперечного сечения магнита, м; *d* – толщина кольца, м.

Зависимости скорости *V* движения паллеты по ТМР при различных значениях коэффициента β показаны на рисунке 5.

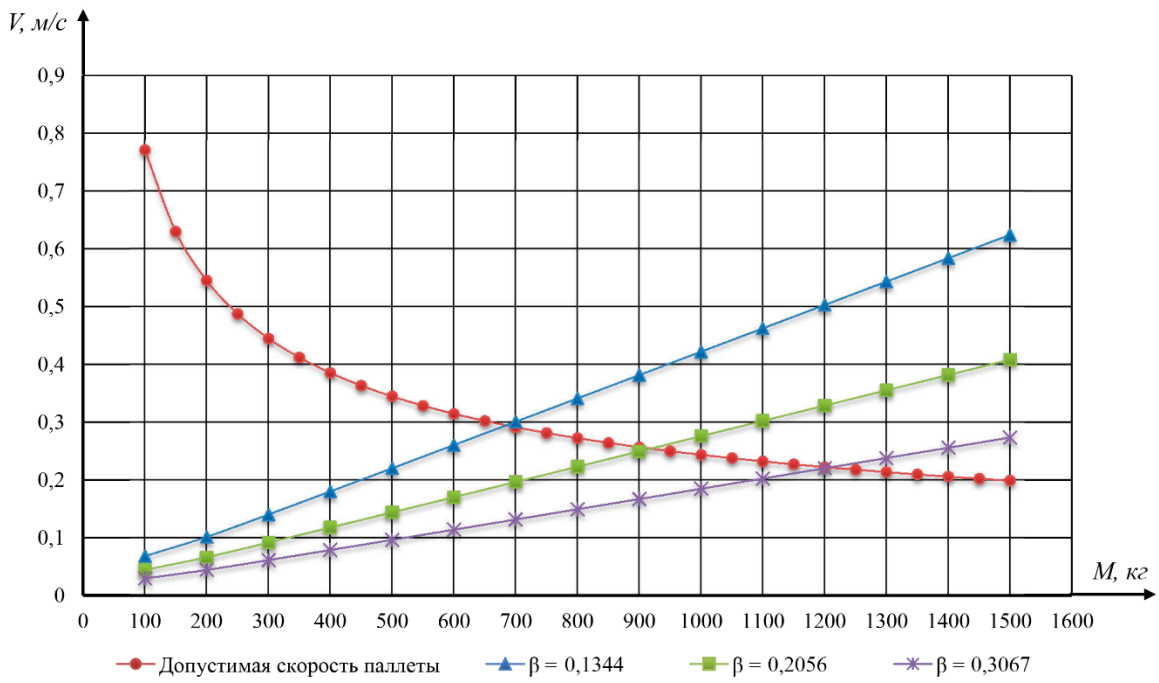


Рисунок 5 – Зависимость скорости движения паллеты по ТМР при различных значениях коэффициента β

Figure 5 – Speed pallets dependence on TMP at various values of the coefficient β

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Как видно из рисунка 5, скорость движения паллеты массой М по ТМР представляет собой практически линейную зависимость, при этом наклон графика скорости определяется коэффициентом магнитной вязкости β.

Однако формула (14) не учитывает влияния воздушного зазора между медным кольцом и магнитами и их положения друг относительно друга (краевого эффекта) на коэффициент магнитной вязкости β и тормозной момент $M_{ВТ}$. Это не позволяет обоснованно подойти к выбору конструктивных параметров вихретокового тормоза ТМР и требует проведения экспериментальных исследований по определению коэффициента магнитной вязкости β для условий эксплуатации ТМР, используемых в ГРК для паллет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработана математическая модель процесса движения паллеты по ТМР.
- Получено уравнение скорости движения паллеты по ТМР.
- Для обоснованного выбора конструктивных параметров вихретокового тормоза ТМР требуются экспериментальные исследования по определению коэффициента магнитной вязкости β.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. N. Boysen, D. Boywitz, F. Weidinger. Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access // OR Spectrum. 2018. Vol. 40, No. 4. Pp. 1141–1170.
2. D. Boywitz, N. Boysen N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems // Comput. Oper. Res. 2018. Vol. 100. Pp. 189–200.
3. R. Accorsi, G. Baruffaldi, R. Manzini, Design and manage deep lane storage system layout. An iterative decision-support model // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. Vol. 92, No. 1-4. Pp. 57–67.
4. R. Vujanac, N. Miloradovic, S. Vulovic. Dynamic storage systems // ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering. 2016. Vol. XIV. Pp. 79–82.
5. S. Wu, Ya. Wu, Ya. Wang. A structured comparison study on storage racks system // J. Residuals Sci. Tech. 2016. Vol. 13, No. 8.
6. L. Ghomri, Z. Sari. Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems // J. Manuf. Syst. 2017. Vol. 44. Pp. 165–178.
7. M. A. Hamzaoui, Z. Sari. Optimal dimensions minimizing expected travel time of a single machine flow rack AS/RS // Mechatronics. 2015. Vol. 31. Pp. 158–168.
8. Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Носко А.Л. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа: монография. Москва, Университетская книга, 2018. 72 с.
9. Носко А.Л., Сафронов Е.В. Методика определения максимально допустимой скорости движения поддона на гравитационном роликовом конвейере // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 8 (689). С. 33–41.
10. Мартыненко Ю. Г. Движение твердого тела в электрических и магнитных полях: монография. Москва, Наука. 1988. 368 с.
11. Озолин А.Ю., Скубов Д.Ю., Штукин Л.В. Способы торможения падающего лифта с помощью постоянных магнитов / Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2008. № 6 (70). С. 82–86.
12. Носко А. Л., Сафронов Е. В. Методика расчета тормозного ролика центробежного типа применительно к гравитационным роликовым конвейерам для паллет // Механизация строительства. 2017. Том 78, № 6. С. 26–31.
13. E. Simeu, D. Georges. Modeling and control of an eddy current brake // Control Engineering Practise. 1996. Vol.4. No.1. Pp. 19–26.
14. Озолин А.Ю., Скубов Д.Ю., Штукин Л.В. Исследование вихретокового дискового тормоза // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2009. № 1 (74). С. 57–60.
15. Лускань О.А. Определение скорости транспортирования штучных грузов на инерционном роликовом конвейер / Изв. ТулГУ. Подъемно-транспортные машины и оборудование. – Тула: ТулГУ. 2003. Вып. 4. С. 84–89.
16. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. М.: Машиностроение, 1987. 431 с.
17. Лускань О.А. Теоретические основы перемещения грузов импульсными конвейерами: монография. Саратов, Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 99 с.
18. Лускань О.А. Инженерный расчет импульсных конвейеров: монография. Саратов, Сарат. гос. техн. ун-т, 2011. 80 с.
19. Hollowell, Thomas Culver; Kahl, Justin Tyme; Stanczak, Matthew Don; Wang, Yizhou. Eddy Current Brake Design for Operation with Extreme Back-drivable Eddy Current Motor // Mechanical Engineering Undergraduates. 2010.
20. Andrew H. C. Gosline, Vincent Hayward. Eddy Current Brakes for Haptic Interfaces: Design, Identification, and Control // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2008. Vol.13, No.6. Pp. 669–677.
21. Karakoc Kerem, Suleman Afzal, Park Edward J. Analytical modeling of eddy current brakes with the application of the time varying magnetic fields // Applied Mathematical Modeling, Netherlands. 2015. Pp. 1168–1179.
22. Karakoc Kerem, Park Edward J., Suleman Afzal. Improved braking torque generation capacity of an eddy current brake with time varying magnetic fields: A numerical study // Finite Elements in Analysis and Design. Elsevier. 2012. Vol. 59. Pp. 66–75.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

23. K. Lee, K. Park. Modeling eddy currents with boundary conditions by sing Coulomb's law and the method of images // IEEE Transactions on Magnetics. 2002. Vol. 38, No. 2. Pp. 1333–1340.

24. M.A. Heald. Magnetic braking: Improved theory // American Journal of Physics. 1988. Vol. 56, No. 6. Pp. 521–522.

25. S. Anwar. A parametric model of an eddy current electric machine for automotive braking applications // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2002. Vol. 12, No. 3. Pp. 422–427.

26. Hyeon-Jae Shin, Jang-Young Choi, Han-Wook Cho, Seok-Myeong Jang. Analytical torque calculations and Experimental testing of permanent magnet Axial eddy current brake // IEEE Transactions of Magnetics. 2013. Vol. 49, No. 7. Pp. 4152–4155.

REFERENCES

1. N. Boysen, D. Boywitz, F. Weidinger. Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access // *OR Spectrum*. 2018; 40, 4: 1141–1170.

2. D. Boywitz, N. Boysen N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems // *Comput. Oper. Res.* 2018; 100: 189–200.

3. R. Accorsi, G. Baruffaldi, R. Manzini, Design and manage deep lane storage system layout. An iterative decision-support model // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017; 92 (1-4): 57–67.

4. R. Vujanac, N. Miloradovic, S. Vulovic. Dynamic storage systems // *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering.* 2016; 14: 79–82.

5. S. Wu, Ya. Wu, Ya. Wang. A structured comparison study on storage racks system // *J. Residuals Sci. Tech.* 2016; 13 (8).

6. L. Ghomri, Z. Sari. Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems // *J. Manuf. Syst.* 2017; 44: 165–178.

7. M. A. Hamzaoui, Z. Sari. Optimal dimensions minimizing expected travel time of a single machine flow rack AS/RS // *Mechatronics*. 2015; 31: 158–168.

8. Safronov E.V., Sharifullin I.A., Nosko A.L. Ustroystva bezopasnoy ekspluatatsii gravitatsionnykh rolikovykh konveyyerov palletnogo tipa: Monografiya [Devices for safe operation of pallet type gravity roller conveyors: Monograph]. Moscow. *Universitetskaya kniga*. 2018: 72. (in Russian)

9. Nosko A.L., Safronov E.V. Metodika opredeleniya maksimal'no dopustimoy skorosti dvizheniya poddona na gravitatsionnom rolikovom konveyyere [Methodology for determining the maximum allowable speed of a pallet on a gravity roller conveyor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy.* Mashinostroyeniye. 2017; 8 (689): 33–41. (in Russian)

10. Martynenko U. G. Dvizheniye tverdogo tela v elektricheskikh i magnitnykh polyakh: monografiya [Motion of a solid in electric and magnetic fields: monograph]. Moscow. *Nauka*. 1988: 368. (in Russian)

11. Ozolin A.U., Skubov D.U., Shtukin L.V. Sposoby tormozheniya padayushchego lifta s pomoshch'yu postoyannykh magnitov [Methods of braking a falling lift with the help of permanent magnets]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta.* 2008; 6 (70): 82–86. (in Russian)

12. Nosko A. L., Safronov E. V. Metodika rascheta tormoznogo rolika tsentrobezhnogo tipa primenitel'no k gravitatsionnym rolikovym konveyyeram dlya pallet [Calculation method of the centrifugal type brake roller as applied to gravity roller conveyors for pallets]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2017; 78; 6: 26–31. (in Russian)

13. E. Simeu, D. Georges. Modeling and control of an eddy current brake // Control Engineering Practise. 1996; 4 (1): 19–26.

14. Ozolin A.U., Skubov D.U., Shtukin L.V. Issledovaniye vikhretokovogo diskovogo tormoza [Research eddy current disc brake]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta.* 2009; 1 (74): 57–60. (in Russian)

15. Luskan' O.A. Opredeleniye skorosti transportirovaniya shtuchnykh gruzov na inertsionnom rolikovom konveyyer [Determining the speed of piece goods transportation on an inertial roller conveyor]. *Izv. TulGU. Pod"yemno-transportnyye mashiny i oborudovaniye.* Tula: TulGU. 2003; 4: 84–89. (in Russian)

16. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L.N. Mashiny nepreryvnogo transporta [Continuous transport machines]. Moscow. *Mashinostroyeniye*. 1987: 431. (in Russian)

17. Luskan' O.A. Teoreticheskiye osnovy peremeshcheniya gruzov impul'snymi konveyyerami: Monografiya [Theoretical foundations of the goods movement by pulse conveyors: Monograph]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t. 2010: 99. (in Russian)

18. Luskan' O.A. Inzhenernyy raschet impul'snykh konveyyerov: Monografiya [Engineering calculation of pulse conveyors: Monograph]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t. 2011: 80. (in Russian)

19. Hollowell, Thomas Culver; Kahl, Justin Tyme; Stanczak, Matthew Don; Wang, Yizhou. Eddy Current Brake Design for Operation with Extreme Back-drivable Eddy Current Motor. *Mechanical Engineering Undergraduates.* 2010.

20. Andrew H. C. Gosline, Vincent Hayward. Eddy Current Brakes for Haptic Interfaces: Design, Identification, and Control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2008; 13 (6): 669–677.

21. Karakoc Kerem, Suleman Afzal, Park Edward J. Analytical modeling of eddy current brakes with the application of the time varying magnetic fields. *Applied Mathematical Modeling, Netherlands.* 2015. 1168–1179.

22. Karakoc Kerem, Park Edward J., Suleman Afzal. Improved braking torque generation capacity of an eddy current brake with time varying magnetic fields: A numerical study. *Finite Elements in Analysis and Design. Elsevier.* 2012; 59: 66–75.

23. K. Lee, K. Park. Modeling eddy currents with boundary conditions by sing Coulomb's law and the

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

method of images. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002; 38 (2): 1333–1340.

24. M.A. Heald. Magnetic braking: Improved theory. *American Journal of Physics.* 1988; 56 (6): 521–522.

25. S. Anwar. A parametric model of an eddy current electric machine for automotive braking applications. *IEEE Transactions on Control Systems Technology.* 2002; 12 (3): 422–427.

26. Hyeon-Jae Shin, Jang-Young Choi, Han-Wook Cho, Seok-Myeong Jang. Analytical torque calculations and Experimental testing of permanent magnet Axial eddy current brake. *IEEE Transactions of Magnetics.* 2013; 49 (7): 4152–4155.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Шарифуллин Ильдар Азатович. Участвовал в разработке математической модели процесса движения паллеты по ТМР, выполнении расчетов, анализе полученных результатов, формировании выводов, выполнил обзор литературных источников (60%).

Носко Андрей Леонидович. Участвовал в формировании направления исследования, разработке математической модели, анализе полученных результатов (20%).

Сафронов Евгений Викторович. Участвовал в постановке задачи исследования, разработке математической модели, анализе полученных результатов, формировании выводов (20%).

AUTHORS 'CONTRIBUTION

Ildar A. Sharifullin – participation in the development of a mathematical model of the pallet movement process on TMP, calculations, analysis of the results, performed a review of references (60%).

Andrei L. Nosko – participation in the formation of the research direction, the development of a mathematical model, the analysis of the results (20%).

Evgenii V. Safronov – participation in the formulation of the research problem, the development of a mathematical model, and the formation of the conclusions (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарифуллин Ильдар Азатович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263–65–92, e-mail: formyjob94@mail.ru).

Носко Андрей Леонидович – д-р техн. наук, доц., Scopus Author ID 6507019256, проф. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263–65–92, e-mail: nosko@bmstu.ru).

Сафронов Евгений Викторович – канд. техн. наук, Scopus Author ID 36943598600, доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263–65–92, e-mail: gen-s@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ildar A. Sharifullin – a postgraduate of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street., 5, building 1, tel. (499) 263–65–92, e-mail: formyjob94@mail.ru).

Andrei L. Nosko – Dr. of Sci., Associate Professor, Scopus Author ID 6507019256, Professor of the the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street., 5, building 1, tel. (499) 263–65–92, e-mail: nosko@bmstu.ru).

Evgenii V. Safronov – Cand. of Sci., Scopus Author ID 36943598600, Associate Professor of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street., 5, building 1, tel.(499) 263–65–92, e-mail: gen-s@mail.ru).

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal