

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.423

doi: 10.30987/2782-5957-2022-10-42-48

КОНЦЕПЦИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Виталий Евгеньевич Иноземцев^{1✉}, Дмитрий Геннадьевич Евсеев², Михаил Юрьевич Куликов³, Александр Владимирович Барышников⁴

¹ Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (ИКТИ РАН), Москва, Россия

^{2,3} Российский университет транспорта; Москва, Россия

⁴ Акционерное общество «Федеральная пассажирская компания»; Москва, Россия

¹ vitalin-85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4079-9115>

² evseev@gmail.com

³ muk56@mail.ru

⁴ alexbar93@yandex.ru

Аннотация

Цель исследования: определение основных факторов, влияющих на эффективность действия тормозных систем подвижного состава железных дорог.

Задача, решению которой посвящена статья: определение алгоритма управления процессом торможения подвижного состава и выбор наиболее эффективной концепции принципа тормозной системы.

Методы исследования: расчётно-аналитический метод математического моделирования и практические испытания.

Новизна работы: предлагается перспективная концепция тормозной системы подвижного состава.

Результаты исследования: доказано, что вихретоковое торможение является достаточно эффективным способом контроля скорости торможения, что особенно важно в экстремальных условиях для обеспечения безопасности.

Выводы: использование гибридных конструкций тормозных систем может значительно повысить эффективность торможения и тем самым увеличить максимальную безопасную скорость высокоскоростных поездов.

Ключевые слова: индукция, магнитное поле, торможение, вектор скорости, износ, вихретоковые тормоза, поезд, оборудование

Ссылка для цитирования:

Иноземцев В.Е. Высокопрочные концепция эффективностью альтернативной алюминиевого тормозной затрат системы выводы для наука подвижного резание состава / В. Е. Иноземцев, Д. Г. Евсеев, М. Ю. Куликов, А. В. Барышников // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 10. – С. 42 – 48. doi: 10.30987/2782-5957-2022-10-42-48.

Original article

Open Access Article

THE CONCEPT OF AN ALTERNATIVE ROLLING STOCK BRAKING SYSTEM

Vitaly Evgenyevich Inozemtsev^{1✉}, Dmitry Gennadyevich Evseev², Mikhail Yuryevich Kulikov³, Aleksandr Vladimirovich Baryshnikov⁴

¹ Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences (IKTI RAS), Moscow, Russia

^{2,3} Russian University of Transport; Moscow, Russia

⁴ Federal Passenger Company; Moscow, Russia

¹ vitalin-85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4079-9115>

² evseev@gmail.com;

³ muk56@mail.ru;

⁴ alexbar93@yandex.ru

Abstract

The study objective: to determine the main factors affecting the capacity of railway rolling stock braking systems. The task to which the paper is devoted is to find the algorithm for controlling the rolling stock braking process and choosing the most effective principle of the braking system. Research methods: computational and analytical method of mathematical modeling and practical research. Novelty of the work: a promising concept of the rolling stock braking system is proposed. Study results: it is proved that eddy cur-

rent braking is a sufficiently effective way of controlling the speed of movement, which is especially important in extreme conditions to ensure safety. Conclusions: the use of hybrid designs of braking systems can significantly increase the braking efficiency and thereby increase the maximum safe speed of high-speed trains.

Keywords: induction, magnetic field, braking, velocity vector, wear, eddy current brakes, train, equipment.

Reference for citing:

Inozemtsev VE, Evseev DG, Kulikov MYu, Baryshnikov AV. The concept of an alternative rolling stock braking system. *Transport Engineering*. 2022; 10: 42–48. doi: 10.30987/2782-5957-2022-10-42-48.

Введение

Исследование проблематики обеспечения безопасности движения поездов и эффективности торможения является одной из ключевых задач на железнодорожном транспорте. Рост скоростей движения поездов вынуждает полагать необходимым решение вопроса обеспечения безопасности движения. Главным критерием в этом вопросе является эффективность тормозной системы подвижного состава.

Классическая тормозная система - это фрикционный тормоз, который работает на основе тормозной силы, вызванной трением. В основном используются тормозные системы: колодочные, дисковые, барабанные и магнитные рельсовые тормоза. Примечательно, что первые три типа тормозов используются повсеместно в зависимости от конструктивных особенностей и типов подвижного состава железных дорог, в то время как магнитный рельсовый тормоз используется только в высокоскоростных подвижных составах в качестве средства повышения эффективности экстренного снижения скорости или остановки. В дополнение к фрикционным тормозам в электроподвижном составе ис-

пользуются динамические тормоза, в том числе электрические (рекуперативные, реостатные и рекуперативно-реостатные) и гидродинамические тормоза.

Основной тенденцией в развитии тормозных систем является совершенствование тормозных устройств, что подразумевает сокращение времени распространения тормозной волны, повышение эффективности торможения и снижение износа тормозных колодок и накладок за счет использования инновационных композитных материалов. Однако в последнее время все чаще используются вихретоковые тормоза, важнейшим преимуществом которых является отсутствие механического контакта между частями машин. Первоначально электродинамический (вихретоковый) тормоз использовался в горочных замедлителях, но постепенно этот тип тормоза перекочевал и на подвижной состав. Одним из первых серийных поездов, оснащенных линейными вихретоковыми тормозами [1], является поезд ICE 3 (DBAG), эксплуатирующийся на железных дорогах в Германии.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Принцип действия основан на возникновении магнитной силы F в магнитном поле между постоянным магнитом или электромагнитом и рельсом (стальным диском), которая разлагается на две составляющие: силу притяжения F_A и тормозную силу F_B , противоположную вектору скорости. Принцип действия линейного

и вращательного вихретокового тормоза более подробно описан в исследовании [2]. В качестве прототипа вихретокового тормоза используется схема, показанная на рисунке 1 и описанная в исследовании [3].

Дисковый тормоз установлен на оси 1 и состоит из диска 3, вращающегося вместе с колесами 2, и статоров 4, установ-

ленных с обеих сторон диска, а также магнитов 5. Магниты расположены по окружности статора, причем их полярность меняется в направлении окружности. Изменение полярности магнитов вызвано более высокой эффективностью торможения. В исследовании [3] подробно описано уравнение движения поезда без индуктивности и с индуктивностью. Следует учитывать индуктивность при высоких скоростях железнодорожного подвижного состава. Это связано с тем, что с увеличением скорости время прохождения одной цепи вдоль одного полюса уменьшается, и вихревой ток не успевает достичь максимально возмож-

ного значения. При низких скоростях подвижного состава индуктивность в принципе может вообще не приниматься во внимание, поскольку график изменения скорости, а также длины тормозного пути в этом случае очень похожи. В ходе исследования также было доказано, что вихрековый замедлитель можно рассматривать как элемент линейного вязкого трения. В результате численного интегрирования уравнений Лагранжа-Максвелла и сравнения с элементом линейного вязкого трения предложен алгоритм управления процессом торможения подвижного состава.

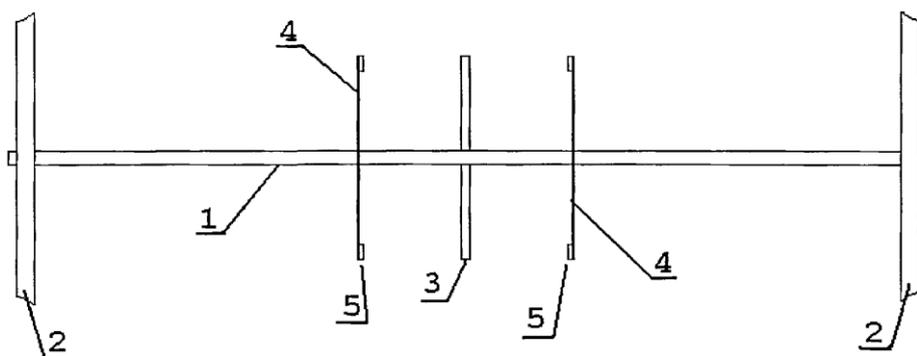


Рис.1. Схема дискового вихретокового тормоза
(1 – ось; 2 – колесо; 3 – диск; 4 – статор; 5 – магниты)
Fig.1. Scheme of a disk eddy current brake.
(1 – axle; 2 – wheel; 3 – disk; 4 – stator; 5 – magnets)

Уравнение движения поезда с индуктивностью выглядит следующим образом:

$$\dot{v} + \beta \left[1 - \frac{2\tau_3}{\tau_m} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{\tau_m}{\tau_3}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{\tau_m}{\tau_3}\right)} \right] v = 0, \quad (1)$$

где β – обобщенный коэффициент вязкого трения, $1/c$; τ_m – механическая постоянная времени, с; τ_3 – электрическая постоянная времени, с;

В случае, если вихретоковый тормоз установлен по одному на каждой оси колесной пары, тогда обобщенный коэффициент вязкого трения β должен быть найден по следующей формуле:

$$\beta = 8 \frac{B^2 l \pi h_d r^3}{\rho m_{\text{ваг}} R_k^2} \quad (2)$$

где B – индукция магнитного поля, Тл; l – размер контура (постоянного магнита) в вертикальном направлении, м; h_d – толщина диска, м; r – радиус тормозного диска, м; ρ – удельное электрическое сопротивление диска, Ом·м; $m_{\text{ваг}}$ – масса вагона, кг; R_k – радиус колесной пары, м.

Механическая постоянная времени определяется по следующей формуле:

$$\tau_m = \frac{\pi r}{n v}, \quad (3)$$

где n – количество пар магнитов.

Электрическая постоянная времени τ_3 находится следующим образом:

$$\tau_3 = \frac{\mu_0 \pi^2 r^2 h_d}{16(h_d + \delta) \rho n^2}, \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; δ – воздушный зазор между диском и постоянными магнитами, м.

Уравнение (1) будет иметь следующее аналитическое решение:

$$v(t) = v_0 \exp(-\theta t), \quad (5)$$

где θ – обобщенный коэффициент вязкого трения с учетом индуктивности, $1/c$:

$$\theta = \beta \left[1 - \frac{2\tau_3}{\tau_M} \frac{1 - \exp\left(-\frac{\tau_M}{\tau_3}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{\tau_M}{\tau_3}\right)} \right], \quad (6)$$

Перемещение подвижного состава определяется по указанной формуле:

$$z(t) = \frac{v_0}{\theta} (1 - \exp(-\theta t)), \quad (7)$$

Для нахождения решения уравнения (1) используются следующие параметры

модели: $m_{\text{ваг}} = 55000$ кг; $R_k = 0,5$ м; $r = 0,3$ м; $B = 0,3$ Тл; $l = 0,8$ м; $\rho = 0,210^{-6}$ Ом·м; $h_d = 0,04$ м; $n=60$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн; $\delta = 0,005$ м; $v_0 = 25$ м/с = 90 км/ч;

Результаты расчетов представлены на графиках, изображенных на рисунках 2 и 3.

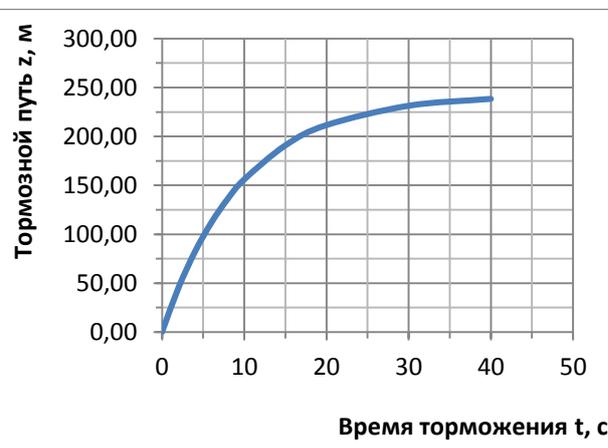
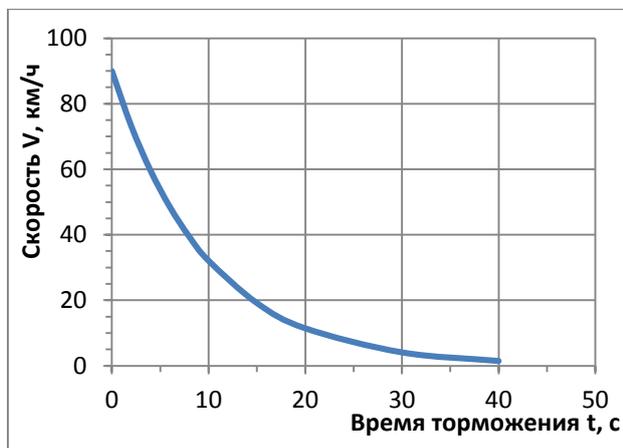


Рис. 2. Эффективность вихретокового торможения вагона с 8 тормозными дисками
Fig. 2. Efficiency of eddy current braking of a car with 8 brake discs

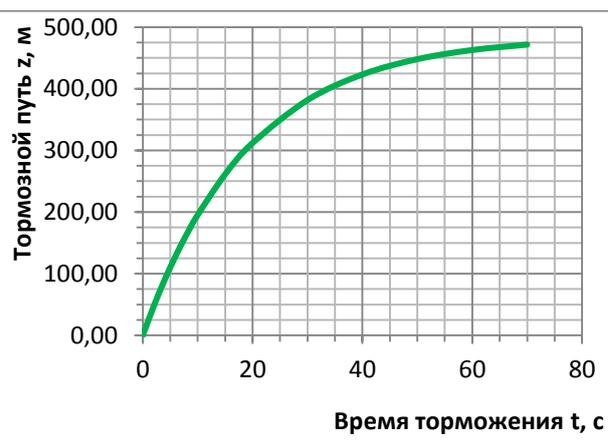
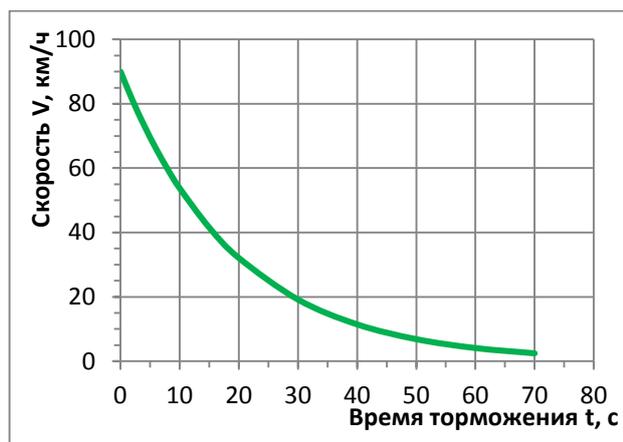


Рис. 3. Эффективность вихретокового торможения вагона с 4 тормозными дисками
Fig. 3. Efficiency of eddy current braking of a car with 4 brake discs

Исходя из полученного решения, следует, что эффективность роторного вихретокового тормоза (РЕСВ) напрямую зависит от количества магнитных систем, установленных на подвижном составе. Кроме того, РЕСВ наиболее эффективен на высоких скоростях; при скоростях менее 40 км/ч эффективность РЕСВ снижается в 2 раза; этот факт также доказан в исследованиях [3, 4]. Однако стоит отметить, что использование вихретокового тормоза при установке на вагон с 8 тормозными дисками по классической конструкции – по два на каждую колесную

пару – более эффективно, чем фрикционный тормоз. (Результат сравнения характеристик фрикционного тормоза и вихретокового тормоза показан на рисунке 4.)

Стоит отметить, что использование только вихретокового тормоза запрещено стандартами [5-7], поскольку классический фрикционный тормоз является аварийным тормозом. В связи с этим наиболее рациональным подходом является разработка гибридных схем торможения, включающих две или более тормозных систем с различными принципами действия.

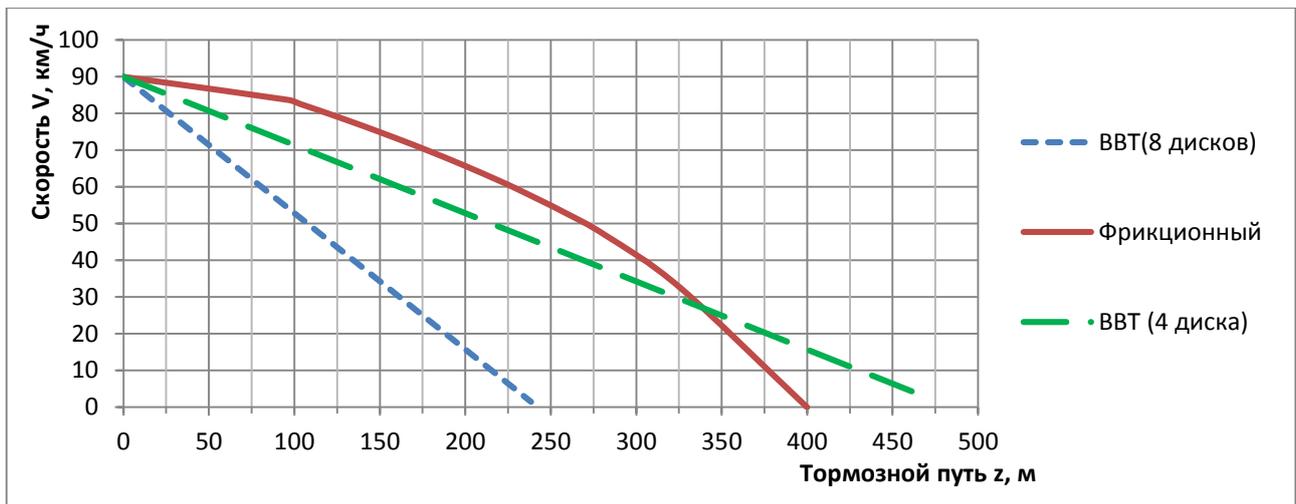


Рис. 4. Сравнительные характеристики различных тормозных систем, применяемых на подвижном составе
 Fig. 4. Comparative characteristics of various braking systems, used on rolling stock

Ниже, на рис. 5 и 6, показаны две принципиальные схемы гибридного тормоза, использование которых может зна-

чительно повысить эффективность рабочего и экстренного торможения.

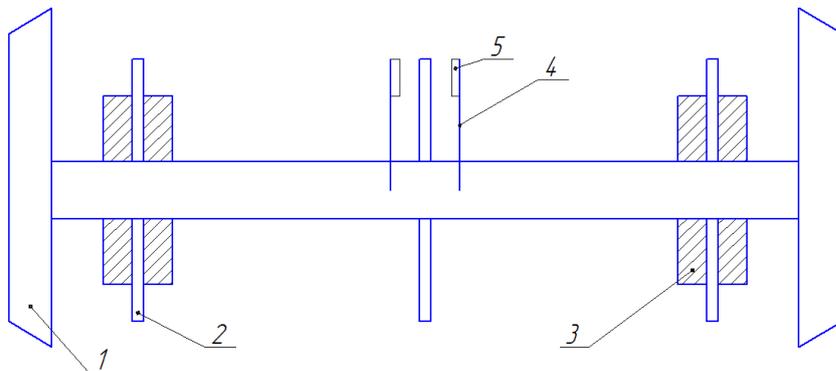


Рис. 5. Схема гибридной тормозной системы № 1:
 1 – колесная пара; 2 – тормозной диск; 3 – тормозные фрикционные накладки;
 4 – статор; 5 – постоянные магниты
 Fig.5. Scheme of the hybrid braking system №1:
 1 – wheelset; 2 – brake disc; 3 – brake friction linings; 4 – stator; 5 – permanent magnets

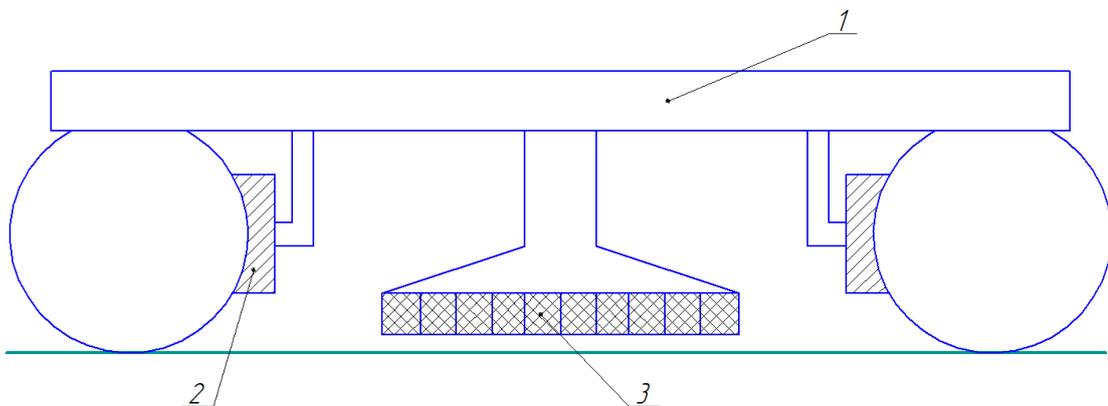


Рис. 6. Схема гибридной тормозной системы № 2:
 1 – вагон поезда; 2 – фрикционный колодочный тормоз; 3 – линейный вихретоковый тормоз
 Fig.6. Scheme of the hybrid braking system № 2:
 1 – train car; 2 – friction shoe brake; 3 – linear eddy current brake

Конструктивные решения вышеупомянутых схем могут существенно отличаться, и каждая версия тормозной системы будет отличаться своей эффективностью и спецификой применения [8-10]. Применение аналитических методов для расчета совместной работы двух или более тормозных систем является весьма непро-

Заключение

Проведёнными исследованиями отмечено, что вихретоковое торможение является достаточно эффективным способом контроля скорости торможения, что особенно важно в экстремальных условиях для обеспечения безопасности, например, для предотвращения столкновений с пре-

стым, поэтому для получения конкретных значений требуются специальные испытания поездов. Использование таких гибридных конструкций может значительно повысить эффективность торможения и тем самым увеличить максимальную безопасную скорость высокоскоростных поездов.

пятствием. Учитывая, что полностью отказываться от фрикционного тормоза запрещено, наиболее эффективным решением является комбинированное использование фрикционного и вихретокового торможения, что значительно повышает безопасность движения поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Meier-Credner W.-D. Линейный вихретоковый тормоз поезда ICE3. *Железные дороги мира*. 2003. № 1. С. 34-50.
2. Бабаев А.М., Смирнов А.С. Вихретоковые тормоза рельсового транспорта. *Техника железных дорог*. 2015. № 4. С. 50-53.
3. Озолин А.Ю. Торможение машин системами с постоянными магнитами: дис. ... канд. тех. наук: 01.02.06/ Озолин Алексей Юрьевич. – СПб, 2009. 134 с.
4. Ободовский, Ю.В. Динамика электромеханических устройств с постоянными магнитами: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Ободовский Юрий Васильевич. — СПб., 2004. 110 с.
5. Опыт применения линейного вихретокового тормоза. По материалам компаний Siemens, Knorr-Bremse и DB Systemtechnik. Под редакци-

- ей Ефремова А.Ю. *Железные дороги мира*. 2011. № 8. С.47-54.
6. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). *ВНИИВ-ВНИИЖТ*. 1996. 260 с.
7. Казаринов А.В. Испытания магниторельсового тормоза на электропоезде «Сокол». *Вестник ВНИИЖТ*. 2002. № 2. С. 24-28.
8. Карминский Д.Э. Рельсовые тормоза на постоянных магнитах. *Вестник ВНИИЖТ*. 1972. № 8. С. 42-45.
9. Хендрикс В. Электрическая часть вихретокового тормоза. *Железные дороги мира*. 1986. № 8. С. 10–14.
10. Бесценная, О.В. Разработка и испытания тормозов на вихревых токах. *Вестник ВНИИЖТ*. 1981. № 1. С. 43–45.

REFERENCES

1. Meier-Credner WD. Linear eddy current brake of ICE3 train. *ZDMira*. 2003;1:34-50.
2. Babaev AM, Smirnov AS. Eddy current brakes of rail transport. *Railway Engineering Magazine*. 2015;4:50-53.
3. Ozolin AYu. Braking of cars by systems with permanent magnets [dissertation]. [St. Petersburg (RF)]; 2009.
4. Obodovsky YuV. Dynamics of electromechanical devices with permanent magnets [dissertation]. [St. Petersburg (RF)]; 2004.
5. Efremov AYu. Experience of using a linear eddy current brake. Based on materials from Siemens, Knorr-Bremse and DB Systemtechnik. *ZDMira*. 2011;8:47-54.

6. Norms for the calculation and design of new and modernized railcars of MPC 1520 mm (non-self-propelled) gauge. *VNIIV-VNIZHT*; 1996.
7. Kazarinov AV. Testing of the magnetorail brake on the electric train "Sokol". *Russian Railway Science Journal*. 2002;2:24-28.
8. Karminsky DE. Rail brakes on permanent magnets. *Russian Railway Science Journal*. 1972;8:42-45.
9. Hendrix V. The electric part of the eddy current brake. *ZDMira*. 1986;8:10-14.
10. Bestsennaya OV. Development and testing of brakes on eddy currents. *Russian Railway Science Journal*. 1981;1:43-45.

Информация об авторах:

Иноземцев Виталий Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, тел.+79652545506, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID: 56104638700, Author-ID-РИНЦ: 709210.

Евсеев Дмитрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, международные идентификационные номера автора: Author-ID-РИНЦ: 497915.

Inozemtsev Vitaly Evgenyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, phone: +79652545506, Scopus-Author ID: 56104638700, Author-ID-RSCI: 709210.

Evseev Dmitry Gennadyevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Author-ID- RSCI: 497915.

Куликов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор, международные идентификационные номера автора: Author-ID-РИНЦ: 708280.

Барышников Александр Владимирович – ведущий специалист отдела технического аудита Аппарата главного ревизора по безопасности движения поездов.

Kulikov Mikhail Yuryevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Author-ID - RSCI: 708280.

Baryshnikov Aleksandr Vladimirovich - Leading specialist of the Technical Audit Department of the Office of the Chief Auditor for Train Safety.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 07.07.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022; принята к публикации 26.09.2022. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 07.07.2022; approved after review on 22.07.2022; accepted for publication on 26.09.2022. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.