

УДК 629.1.01

Способ уменьшения тормозного пути вагона электропоезда путем усовершенствования конструкции клещевого механизма тормозного устройства

С. Н. Коржов¹, П. А. Поляков², И. А. Яицков¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

²Набережночелнинский институт Казанского федерального университета, Россия, 423812, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 68/19

Для цитирования: Коржов С. Н., Поляков П. А., Яицков И. А. Способ уменьшения тормозного пути вагона электропоезда путем усовершенствования конструкции клещевого механизма тормозного устройства // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 349–359. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-349-359

Аннотация

Цель: определить возможность улучшения тормозных характеристик электропоездов путем усовершенствования клещевых механизмов тормозных устройств. **Методы:** сравнение тормозного пути вагонов электропоездов, движущихся на спуске по кривому участку и оснащенных тормозными устройствами с серийными и усовершенствованными клещевыми механизмами. Расчет тормозных характеристик проводился путем имитационного моделирования, созданного в пакете прикладных программ ResurDyne. Проводилась оценка влияния угловых перемещений тормозных колодок на характеристики торможения вагонов электропоездов. **Результаты:** при торможении на кривом участке были выявлены локальные зоны контактирующих площадок в парах «колодка — диск». Установлено, что угловые и линейные перемещения тележек, вызванные перераспределением масс в системах «вагон — тележка — колесная пара» и инерционной нагрузкой вагона, оказывают влияние на локальный контакт в парах «колодка — колесо». Было выявлено, что при движении на спуске на кривом участке крен колесных пар приводит к образованию зазоров между поверхностями колодки и диска с одного из краев колодки. Для увеличения площади контакта в тормозных устройствах и компенсации перераспределения масс между тележками в процессе торможения была усовершенствована конструкция клещевого механизма, обеспечивающая наклон осей колодки. Тормозной путь вагона электропоезда при использовании усовершенствованной конструкции клещевого механизма тормозного устройства был снижен на 43,3%. **Практическая значимость:** показана необходимость уточнения методики оценки тормозных свойств электропоездов при движении на кривых участках пути. Ее корректировка позволит повысить безопасность эксплуатации пассажирских электропоездов. Предложенное усовершенствование тормозного устройства позволит снизить локальный износ колодок, что повысит эффективность торможения и работоспособность тормозного устройства в целом.

Ключевые слова: электропоезд, тормозное устройство, кривой участок пути, усовершенствованный клещевой механизм, тормозной путь

Введение

Нормативные документы, регламентирующие требования к проверке тормозного оборудования, не предполагают методики проведения испытаний проверки систем безопасности

на кривых участках пути. В связи с этим необходимо провести анализ научных исследований, посвященных повышению эффективности тормозного оборудования. Основное внимание научного сообщества, занимающегося этими

вопросами, сосредоточено на колодочных тормозах как наиболее распространенных в железнодорожном транспорте.

В работе [1] была предложена система оценки технического состояния поверхности катания методом бесконтактного теплового контроля поверхности катания и колодочного тормоза грузового подвижного состава. В работе [2] проведены экспериментальные исследования по изучению износа при скользящем контакте «колесо — рельс». В зависимости от дистанции скольжения колеса по рельсу изменялись температура в контакте и характеристики повреждения как рельса, так и колес. В статье [3] выявлено, что проводимые исследования не учитывают дискретный и пространственный подвод теплоты к рабочим поверхностям тормозных дисков. Была выявлена неоднородность проводимых исследований тепловой нагруженности на протяжении 25 лет. В диссертации [4] исследовалось термомеханическое растрескивание ободьев колесных пар и рабочих поверхностей тормозных дисков. В работе [5] предлагалась конструкция тормозного устройства, компенсирующая подвижность колодок при торможении. Данная конструкция обеспечивала поворот тормозного блока с помощью двух шарниров вращения. В статье [6] рассматривались вибрации, вызванные трением в паре «колодка — диск». В работе [7] исследовались тепловая нагруженность и напряженно-деформированное состояние тормозных дисков с различной конфигурацией отверстий на рабочих поверхностях дисков. Для снижения тепловой нагруженности на рабочих поверхностях дисков выполнялись щелевые и смешанные отверстия для снижения турбулизации воздушного потока.

В статье [8] для оценки маневренности подвижного состава создавались трехмерные динамические модели в программе Simpack.

Результаты моделирования показали, что возникающая боковая сила при торможении подвижного состава увеличивала коэффициент схода с рельсов по сравнению с качением без нагрузки. Рыскание колесной пары ограничивалось тормозными колодками, и пятно контакта поверхности катания колеса с рельсом увеличилось по сравнению с качением без нагрузки. Проведенный анализ показал, что моделирование процесса торможения подвижного состава рассматривается либо на уровне системы «подвижной состав — железнодорожный путь», либо на уровне систем «колесо — рельс», «колодка — рельс» и «колодка — диск». В первом случае тормозные усилия задаются функционально и подводятся к осям колесных пар, препятствуя их качению. При этом нет взаимосвязи между характеристиками тормозных устройств на линейные и угловые перемещения кузова и другие элементы подвижного состава. Во втором случае рассматриваемые системы не учитывают влияние колебаний кузова и тележек вагона на процесс образования температурной напряженности распределения контактных нагрузок в указанных парах. В связи с этим фактом необходимо рассмотреть влияние взаимодействия рабочих пар тормозных устройств на тормозные характеристики вагона электропоезда, совершающего экстренное торможение на криволинейном участке. В качестве объектов исследования целесообразно рассмотреть тормозные устройства с серийным и усовершенствованным клещевым механизмом для сравнения характеристик эффективности торможения подвижного состава.

Материалы и методы

Для оценки тормозной эффективности электропоезда на кривых участках проводилось моделирование процесса экстренного торможения двух различных типов тормозных

устройств, оснащенных серийными и усовершенствованными клещевыми механизмами. Усовершенствованные клещевые механизмы предполагали наклон колодок в продольном и поперечном направлениях тележек электропоезда. Для моделирования были разработаны твердотельные модели немоторных тележек электропоездов с тормозными устройствами, оснащенными серийными и усовершенствованными клещевыми механизмами (рис. 1). Имитационное моделирование движения и торможения вагонов электропоездов проводилось с помощью пакетов прикладной программы RecurDyn.

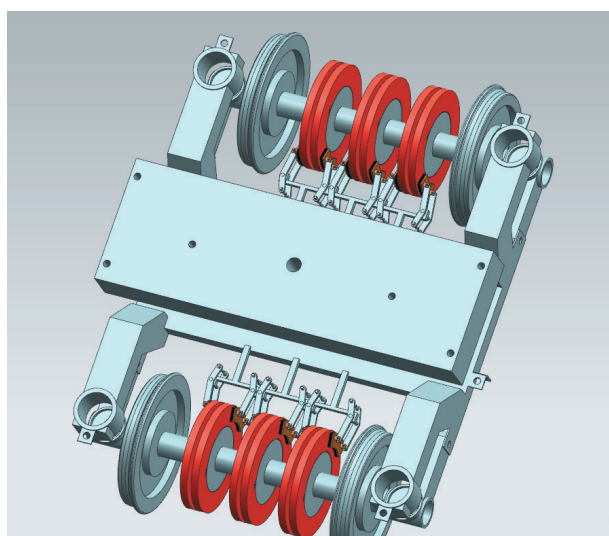
Методика проводимых испытаний предполагала разгон вагона электропоезда до значения установившегося движения (90 км/ч), разворот и экстренное торможение на спуске по кривым участкам. Для достижения вагоном установившейся скорости для тела задавалось выражение подвода крутящего момента на колесные пары, осуществляемого по закону АКISPL (ABS $((VX(1, 2, 1) / 1000 \cdot 3.6)), 0, 3, 0) \cdot \text{MIN}(1.0, (\text{InputV_kmph-VX}(1, 2, 1) / 1000 \cdot 3.6) \cdot 1.4)$).

Для имитации движения вагонов электропоезда по кривому участку на кузов вагона действовал крутящий момент, записанный в виде функции $90000000 \cdot (\text{step}(\text{time}, 0, 0, 51, 0) + \text{step}(\text{time}, 51, 0, 52, 1) - \text{step}(\text{time}, 119, 0, 120, 1))$. В результате два исследуемых электропоезда начинали процесс торможения с одинаковых позиций скорости и точки начала тормозного режима (рис. 2).

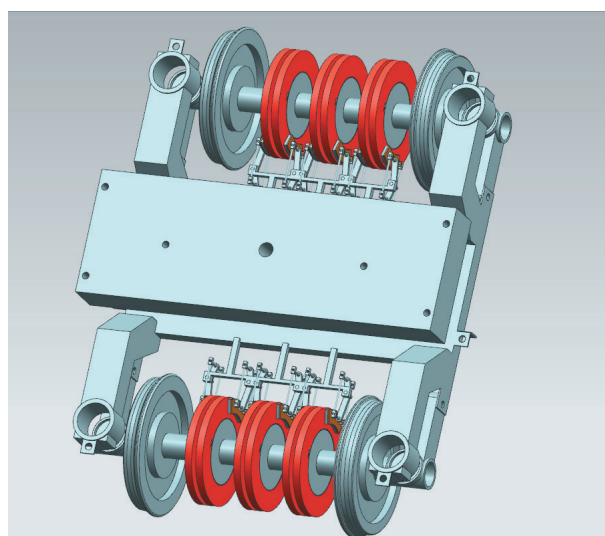
Для реализации тормозного режима на рычаги тормозного устройства прикладывалось идентичное усилие, записанное в виде функций:

- для вагона с серийными клещевыми механизмами $54800 \cdot (\text{step}(\text{time}, 0, 0, 104.88, 0) + \text{step}(\text{time}, 104.88, 0, 105.88, 1))$;
- для вагона с усовершенствованными клещевыми механизмами устройствами $54800 \times (\text{step}(\text{time}, 0, 0, 103, 0) + \text{step}(\text{time}, 103, 0, 104, 1))$.

Величина тормозного усилия выбиралась исходя из передаточного числа в клещевом механизме и величины усилия одной колодки на тормозной диск 21,7 кН (при 0,38 МПа) для тормозного блока 866.00.00.000 как основного



а



б

Рис. 1. Трехмерные модели немоторных тележек электропоездов с тормозными устройствами: с серийными (а) и усовершенствованными (б) клещевыми механизмами

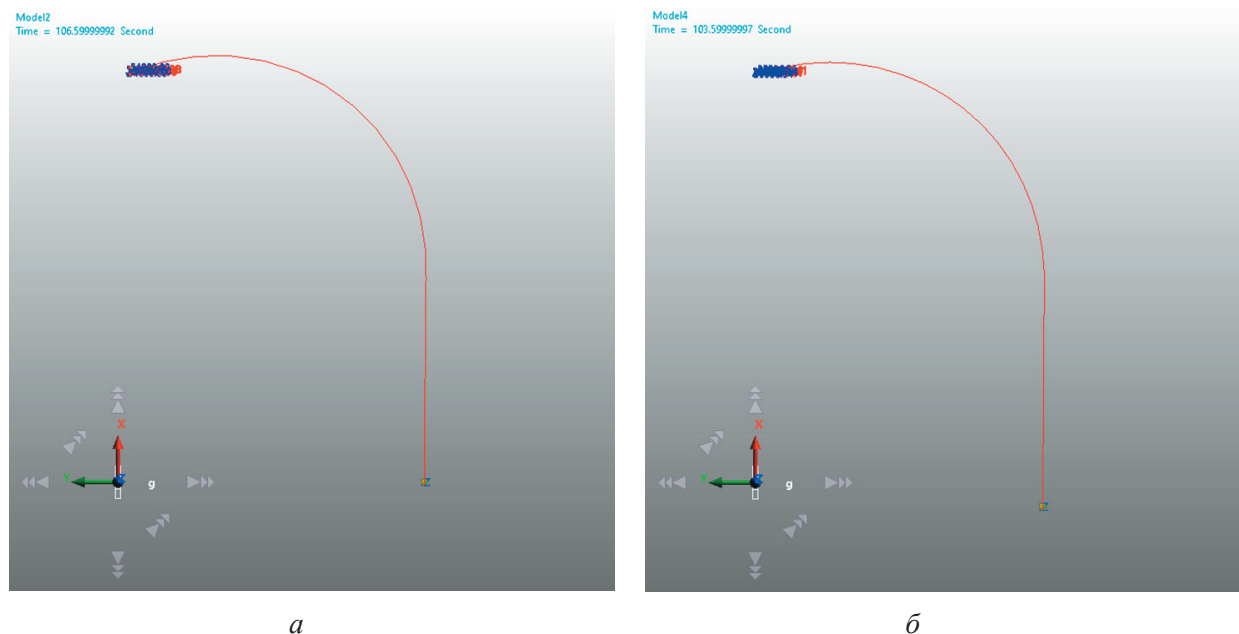


Рис. 2. Моменты и точки начала тормозного режима вагонов электропоездов с тормозными устройствами, оснащенными серийными (*a*) и усовершенствованными (*б*) клещевыми механизмами

прототипа, используемого на современных электропоездах.

Для компенсаций линейных и угловых перемещений колодок относительно рабочих поверхностей тормозного диска в усовершенствованных тормозах использовались актуаторы, корректирующие положения колодок. При имитационном моделировании работа актуаторов задавалась функциями: для передних осей обеих тележек вагона $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 103.5, 0) + \text{step}(\text{time}, 103.5, 0, 104, -42)$; для задних осей обеих тележек вагона $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 103.5, 0) + \text{step}(\text{time}, 103.5, 0, 104, 30)$.

Результатом моделирования являлись диаграммы изменения скоростей и ускорений движения вагонов до полной остановки (рис. 3).

С использованием значений замедлений на отрезках торможения были рассчитаны тор-

мозные пути для двух моделируемых вагонов. Тормозной путь для электропоезда с немоторными тележками, оснащенными серийными клещевыми механизмами (при замедлении $1,27 \text{ м/с}^2$), составил 246 м, а для электропоезда, оснащенного усовершенствованными клещевыми механизмами (при замедлении $0,55 \text{ м/с}^2$), — 568 м. При экстренном торможении путь до полной остановки при применении усовершенствованных клещевых механизмов уменьшился на 43,3 %.

Данный факт достигался за счет эффективного использования площадей рабочих пар тормозных устройств при торможении на кривых участках железнодорожного пути.

Положения колодок по осям колесных пар при торможении на кривом участке железнодорожного пути для вагона электропоезда

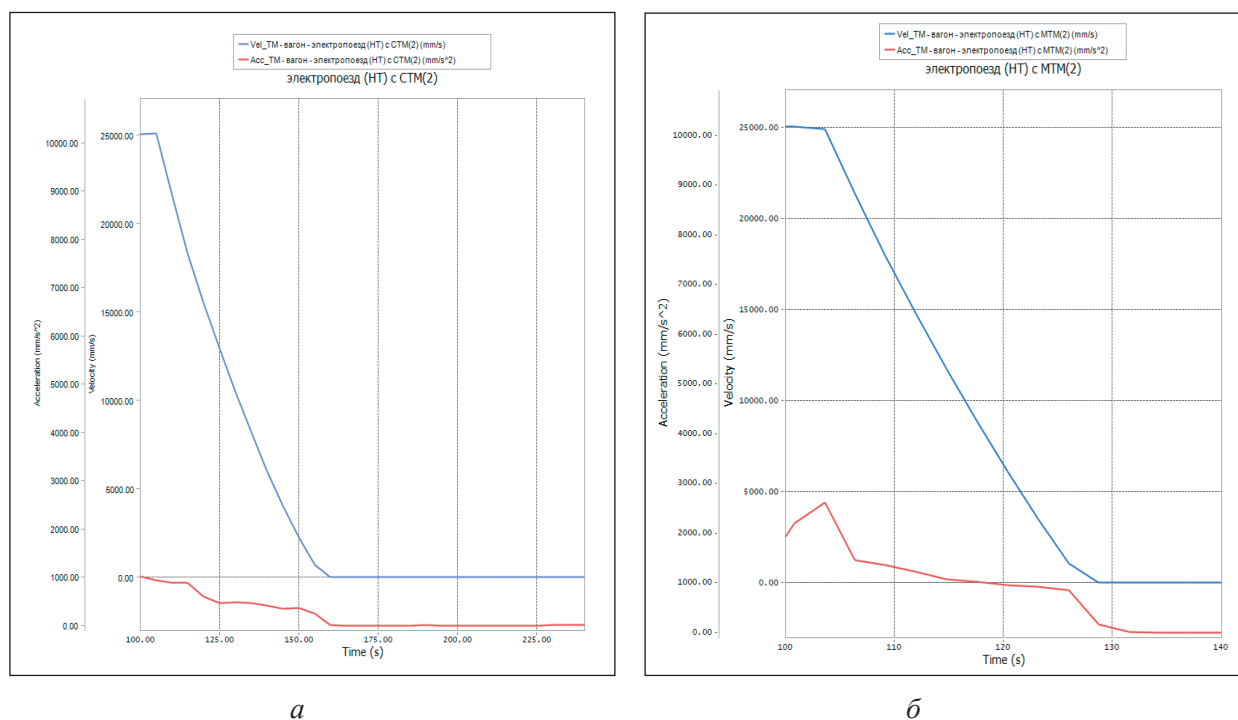


Рис. 3. Изменение скоростей и ускорений кузова вагона электропоездов с немоторными тележками и тормозными устройствами с серийными (а) и усовершенствованными (б) клещевыми механизмами

с серийными клещевыми механизмами представлены на рис. 4.

При прохождении кривого участка оси колесных пар и тележки отклонялись на различные углы, что вызывало локальное соприкосновение колодок с рабочими поверхностями диска. Тормозные устройства, расположенные ближе к внутреннему радиусу поворота, имели меньший зазор между колодками и рабочими поверхностями диска, чем устройства, которые располагались у наружного радиуса. Необходимо отметить, что даже в рамках одного тормозного блока присутствовало смещение контактов в парах «колодка — диск». Левые колодки касаются верхним краем, а правые колодки касаются нижним краем.

В связи с перераспределением нагрузок между тележками одного вагона края колодок тормозных устройств с серийным клещевым механизмом выступали за внешний периметр

тормозных дисков. Передняя тележка являлась наиболее нагруженной, в результате чего клещевой механизм, закрепленный на тележке, опускался под действием сил инерции и нижние края колодок выступали за обод диска. Задняя тележка в процессе торможения, наоборот, разгружалась, что приводило к смещениям клещевого механизма вдоль оси OZ . В результате смещения верхние края колодок выступали за ободья тормозного диска. Угловые и линейные смещения уменьшали площади контакта в парах тормозных устройств, что в итоге отразилось на увеличении тормозного пути при движении по кривым участкам.

На рис. 5 представлены результаты моделирования взаимодействия пар тормозных устройств с усовершенствованными клещевыми механизмами.

Согласно проведенному моделированию, получены следующие результаты: колодки

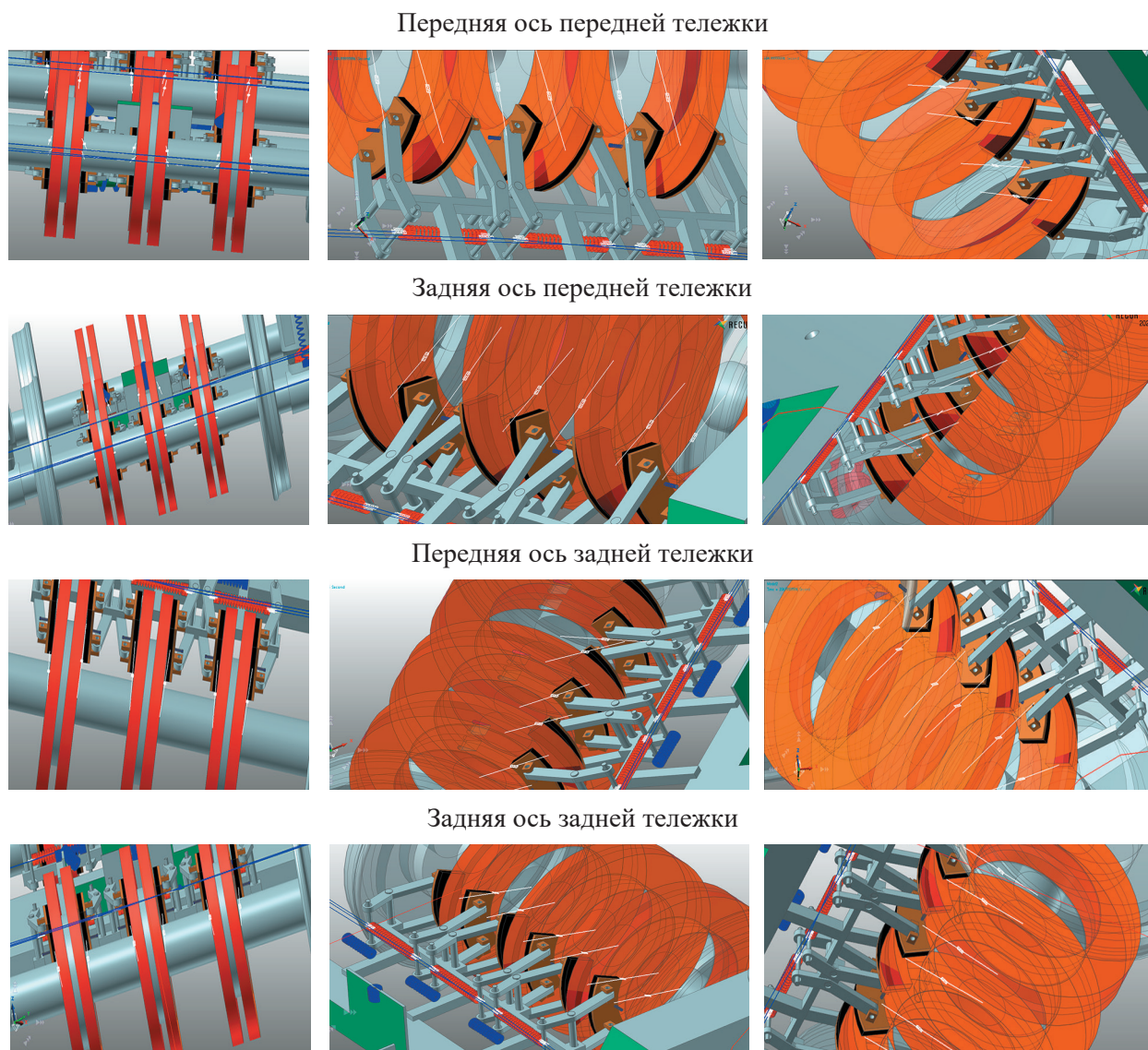


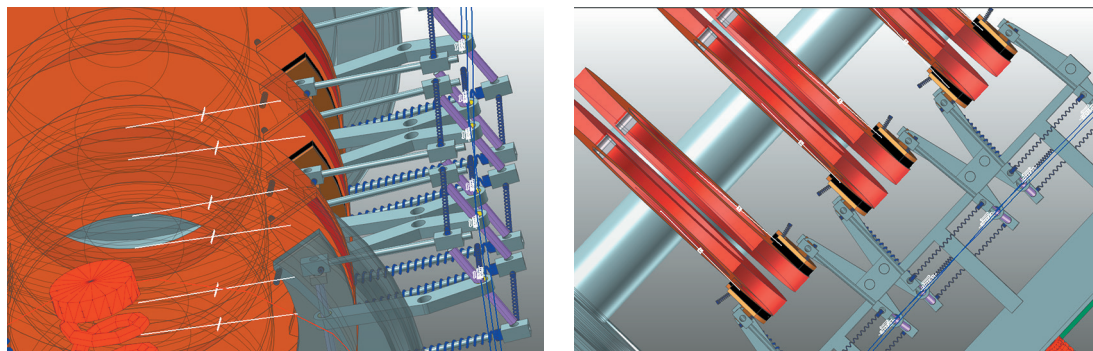
Рис. 4. Положение колодок относительно поверхностей дисков для тормозных устройств с серийными клещевыми механизмами для колесных пар передней и задней немоторных тележек

полностью по всей площади прилегали к рабочим поверхностям диска за счет поворота колодок относительно продольной оси тележек. Зазора между трущимися поверхностями не наблюдалось.

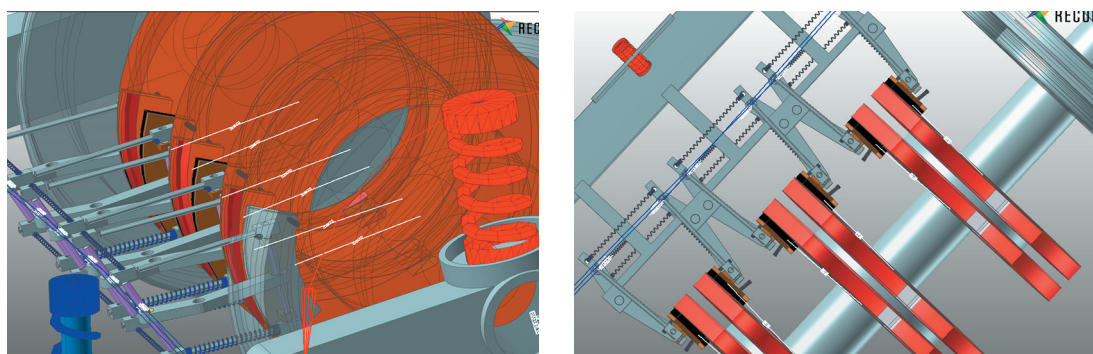
Перераспределение масс между тележками приводило к аналогичным перемещениям клещевых механизмов вместе с тележками. Данные перемещения корректировались с помощью актуаторов, управляющих накло-

ном осей колодок (рис. 6). Тренды изменения углов рыскания передних и задних колодок соответствуют тренду угла рыскания вагона. В интервале с 103,5 до 104 с выполнялась корректировка угла рыскания колодок после прижатия их к рабочим поверхностям диска. В начале прижатия 103 с угол рыскания для передних колодок под действием сил трения изменился с $8,9^\circ$ до $23,54^\circ$, что соответствовало исследованиям

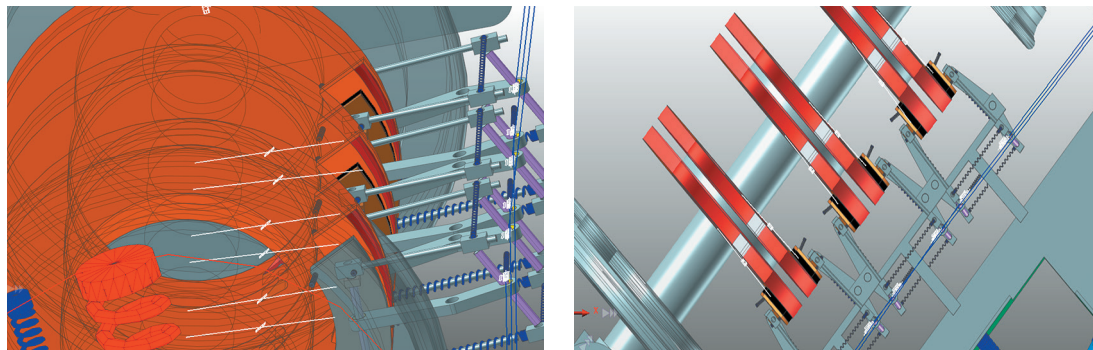
Передняя ось передней тележки



Задняя ось передней тележки



Передняя ось задней тележки



Задняя ось задней тележки

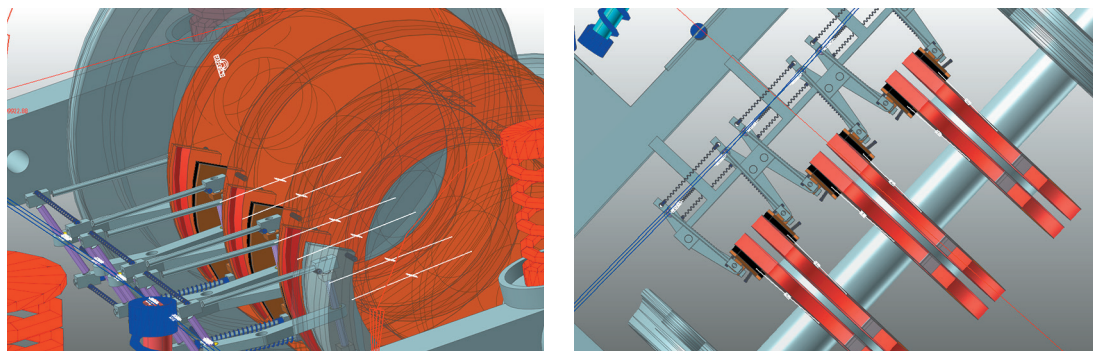


Рис. 5. Положение тормозных колодок относительно поверхностей дисков для тормозных устройств с усовершенствованными клещевыми механизмами немоторных тележек

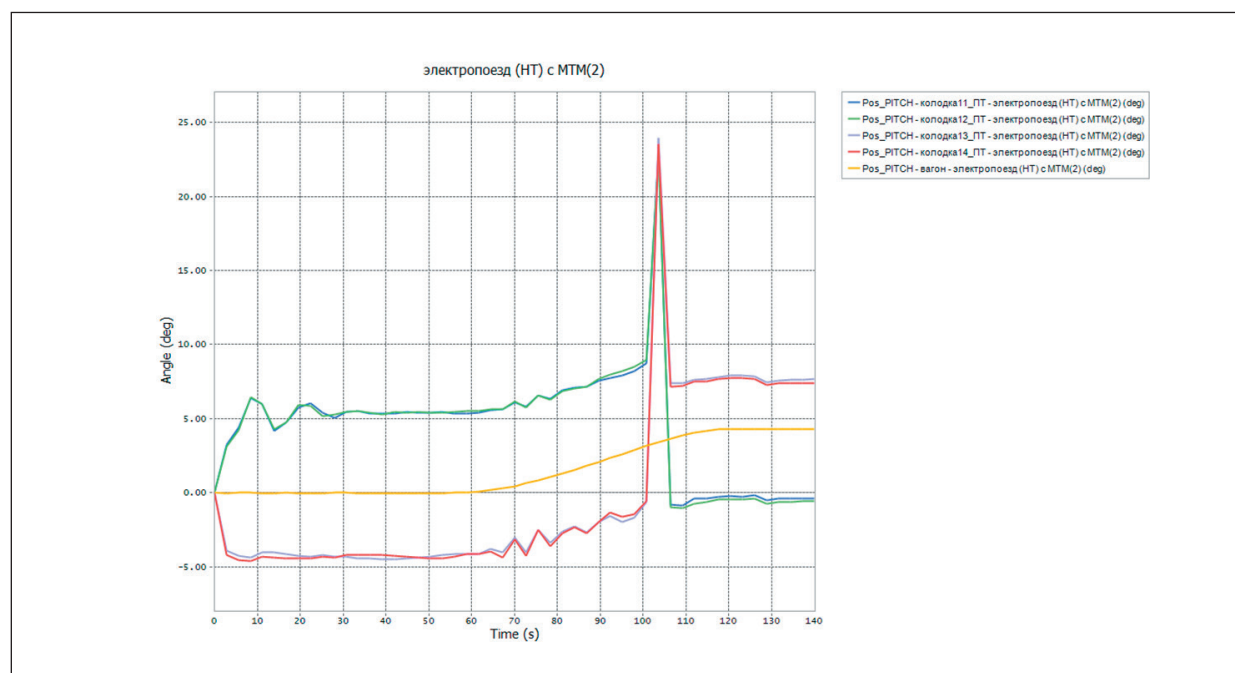


Рис. 6. Изменение углов рыскания вагона и передних колодок (11 и 12) и задних колодок (13 и 14) левого тормозного блока передней тележки вагона электропоезда

по самоустанавливающимся креплениям для накладок тормозных колодок [9]. По завершении корректировки актуаторами угол рыскания для передних колодок снизился с $23,54^\circ$ до $-0,99^\circ$. Для задних колодок процесс взаимодействия, начавшийся с 103 с, изменил угол рыскания с $-0,57^\circ$ до $23,97^\circ$. Процесс корректировки позволил изменить угол рыскания с $23,97^\circ$ до значений $7,18^\circ$.

В результате поворота осей колодок относительно оси OY края колодок не выступали за ободья тормозных дисков, что позволило использовать всю площадь колодки эффективно.

Заключение

Тормозное оборудование электропоездов является одним из контуров системы безопасности всего подвижного состава, усовершенствование которого непосредственно влияет на безопасность транспортного процесса.

Для оценки его эффективности необходимо использовать как характеристики процесса торможения в целом всего состава, так и косвенные параметры, характеризующие работу отдельного узла или детали тормозного оборудования. В статье рассматривалось имитационное моделирование твердотельных моделей вагонов электропоездов с немоторными тележками и тормозными устройствами с различными конструкциями клещевых механизмов при торможении на спуске на кривых участках пути.

В качестве объектов исследования использовались модели серийных тормозных устройств дисково-колодочного типа, устанавливаемые на электропоездах ЭС2Г, и тормозные устройства с усовершенствованными клещевыми механизмами, обеспечивающими наклон колодки в продольном и поперечном направлениях. Моделирование процесса торможения на кривом участке вагона с тормозными

устройствами с серийными клещевыми механизмами показало, что крен колесных пар и крен рамы тележки неравны из-за отсутствия жесткой связи между ними, в результате чего между колодками и рабочими поверхностями диска образовывались зазоры с различных краев колодки. Величины зазора различались между тормозными блоками одной оси колесной пары.

При прохождении кривого участка с поворотом налево в рамках одного тормозного блока левая колодка контактировала с поверхностью диска верхним краем, а правая — нижним краем. Перераспределение масс при торможении оказывало влияние на положение колодок относительно поверхностей диска. На передней тележке нижние края колодок выступали за ободья тормозных дисков передней и задней колесных пар, для задней тележки выступающими краями являлись верхние. При моделировании процесса торможения вагона с тормозными устройствами с усовершенствованными клещевыми механизмами зазора между колодками и рабочими поверхностями дисков не было. В результате крен колесных пар компенсировался наклоном осей колодок в поперечном направлении. Для компенсации перераспределения масс и действия инерционной нагрузки углы рыскания колодок корректировались с помощью актуаторов, установленных на осях приводов клещевого механизма. По результатам моделирования применение усовершенствованной конструкции клещевого механизма позволило сократить тормозной путь на 43,3%.

Список источников

1. Шалупин П.И. Совершенствование диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава на основе имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Уральский государственный университет путей сообщения. Екатеринбург, 2021. 20 с.
2. Research On Wheel/Rail Contact Surface Temperature and Damage Characteristics During Sliding Contact of a Wheel / Y. Wei [et al.] // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024. No. 71. 201 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00540-5>
3. Deressa K.T., Ambie D.A. Thermal Load Simulations in Railway Disc Brake: A Systematic Review of Modelling Temperature, Stress and Fatigue // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. No. 29. Pp. 2271–2283. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09662-y>
4. Mandeep S.W. Mechanical Braking Systems for Trains. A Study of Temperatures, Fatigue and Wear by Experiments and Simulations. Thesis For the Degree of Doctor of Philosophy in Solid and Structural Mechanics. 2019. 31 p.
5. Дисковый тормоз транспортного средства подвижного состава железных дорог: патент на изобретение, RU 2390449 C2; заявка № 2008100648/11; опубл. 27.05.2010.
6. Lorang X., Chiello O. Stability and Transient Analysis in the Modelling of Railway Disc Brake Squeal // *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems* / B. Schulte-Werning [et al.] // *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. 2008. Vol 99. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74893-9_63
7. Simulation and Optimization of Train Brake Disc Based on Coupling Characteristics of FEM and Thermal Flow Density Method / G. Qi [et al.] // *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 40617. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24247-6>
8. Assessment of the curving performance of heavy haul trains under braking conditions / L. Yang [et al.] // *Journal of Modern Transport*. 2015. Vol. 23. Pp. 169–175. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0075-1>

9. Friction-Induced Stick-Slip Vibration Behavior in High-Speed Train Friction Brake with Triangularly Supported Blocks / G. Liu [et al.] // *Nonlinear Dynamics*. 2025. Vol. 113. Pp. 21013–21050. URL: <https://doi.org/10.1007/s11071-025-11298-7>

Дата поступления: 18.03.2026

Решение о публикации: 21.04.2026

Контактная информация:

КОРЖОВ Сергей Николаевич — аспирант;
ksn@engcenter.ru

ПОЛЯКОВ Павел Александрович —
доктор техн. наук, доцент;
polyakov.pavel88@mail.ru

ЯИЦКОВ Иван Анатольевич — доктор техн. наук,
профессор; yia@rgups.ru

A Method of Reducing the Braking Distance of an Electric Train Car by Improving the Design of the Clamping Mechanism of the Braking Device

S. N. Korzhov¹, P. A. Polyakov², I. A. Yaitskov¹

¹Rostov State Transport University, 2 Rostovskogo strelkovogo polka narodnogo opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

²Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, 68/19 Mira ave., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia

For citation: *Korzhov S.N., Polyakov P.A., Yaitskov I.A. A Method of Reducing the Braking Distance of an Electric Train Car by Improving the Design of the Clamping Mechanism of the Braking Device // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 349–359. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-349-359 (In Russian)*

Abstract

Objective: to determine the possibility of improving the braking characteristics of electric trains by improving the clamping mechanisms of braking devices. **Methods:** comparison of the braking distance of electric train wagons moving downhill along a curved section equipped with brake devices with serial and improved pincer mechanisms. The braking characteristics were calculated using simulation modeling created in the RecurDyne application software package. The influence of angular movements of the brake pads on the brake characteristics of electric train cars was evaluated. **Results:** when braking on a curved section, local areas of contact pads in “pad — disc” pairs were identified. It has been established that angular and linear movements of trolleys caused by the redistribution of masses in the “wagon — cart — wheelset” systems and the inertial load of the wagon affect the local contact in the “shoe — wheel” pairs. It was found that when driving downhill on a curved section, the roll of the wheelsets leads to the formation of gaps between the surfaces of the shoe and the disc from one of the edges of the shoe. To increase the contact area in the braking devices and compensate for the redistribution of masses between the trolleys during braking, the design of the pincer mechanism has been improved, which ensures the tilt of the shoe axes. The braking distance of the electric train carriage was reduced by 43.3% when using the improved design of the clamping mechanism of the braking device. **Practical importance:** the necessity of clarifying the methodology for evaluating the braking properties of electric trains when driving on curved sections of track is shown. Its adjustment will improve the safety of passenger electric trains. The proposed improvement of the brake device will reduce the local wear of the pads, which will increase the brake efficiency and the performance of the brake device as a whole.

Keywords: electric train, braking device, curved section of track, improved pincer mechanism, braking distance

References

1. Chalupina P.I. Sovershenstvovanie diagnosticheskogo obespecheniya beskontaktnogo teplovogo kontrolya kolodochnykh tormozov gruzovogo podvizhnogo sostava na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Improvement of Diagnostic Support for Non-Contact Thermal Control of Brake Pads of Freight Rolling Stock Based on Simulation Modeling], PhD in Engineering, diss., Yekaterinburg, 2021, 20 p. (In Russian)
2. Wei Y., Han J., Yang T., et al. Research On Wheel/Rail Contact Surface Temperature and Damage Characteristics During Sliding Contact of a Wheel, *Journal of Engineering and Applied Science*, 2024, no. 71, 201 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00540-5>
3. Deressa K.T., Ambie D.A. Thermal Load Simulations in Railway Disc Brake: A Systematic Review of Modelling Temperature, Stress and Fatigue, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, no. 29, pp. 2271–2283 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09662-y>
4. Mandeep S.W. Mechanical Braking Systems for Trains, A Study of Temperatures, Fatigue and Wear by Experiments and Simulations. Thesis For the Degree of Doctor of Philosophy in Solid and Structural Mechanics, 2019, 31 p.
5. Patent no. 2390449, Russian Federation, IPC B61H 5/00, Diskovyy tormoz transportnogo sredstva podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Disc Brake of a Railway Rolling Stock Vehicle], appl. January 9, 2008, publ. July 20, 2009, bul. no. 20. (In Russian)
6. Lorang X., Chiello O. Stability and Transient Analysis in the Modelling of Railway Disc Brake Squeal. In: Schulte-Werning B., et al. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2008, vol. 99. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74893-9_63
7. Qi G., et al. Simulation and Optimization of Train Brake Disc Based on Coupling Characteristics of FEM and Thermal Flow Density Method, *Scientific Reports*, 2025, no. 15, 40617. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24247-6>
8. Yang L., et al. Assessment of the Curving Performance of Heavy Haul Trains Under Braking Conditions, *Journal of Modern Transport*, 2015, vol. 23, pp. 169–175. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0075-1>
9. Liu G., et al. Friction-Induced Stic-Slip Vibration Behavior in High-Speed Train Friction Brake with Triangularly Supported Blocks, *Nonlinear Dynamics*, 2025, vol. 113, pp. 21013–21050. URL: <https://doi.org/10.1007/s11071-025-11298-7>

Received: March 18, 2026

Accepted: April 21, 2026

Author's information:

Sergey N. KORZHOV — Postgraduate Student;
ksn@engcenter.ru

Pavel A. POLYAKOV — Dr. Sci. in Engineering;
Associate Professor;
polyakov.pavel88@mail.ru

Ivan A. YAITSKOV — Dr. Sci. in Engineering;
Professor; yia@rgups.ru