



Научная статья
УДК 629.113
EDN: OFPYNH
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-682-693

Разработка способа обеспечения стабильности процесса торможения путём совершенствования конструкции тормозных механизмов

П.А. Поляков^{1✉}

¹ Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия

Резюме. Цель – создание способа обеспечения стабильности и эффективности процесса торможения путем дифференциации фрикционных накладок тормозных колодок дисковых тормозных механизмов колодочного типа. В исследованиях применялась дифференциация времени взаимодействия пар трения и их площади, обеспечивающего наибольшие показатели стабильности тормозных механизмов. В работе применялись разработанные автором нестандартизированное стендовое оборудование и сегментарные тормозные механизмы, обеспечивающие дифференциацию пар трения по площади. Используя взаимосвязь между поперечным перемещением колодок и развиваемым тормозным моментом фрикционного узла, был разработан способ построения результирующего тормозного момента. В результате стендовых испытаний коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента разработанных дисковых тормозных механизмов колодочного типа с шестью прижимающими элементами увеличились на 12,2 и 34,9%. Данные значения получены в сравнении с серийными тормозными механизмами, оснащенными моноприжимающим механизмом с единой тормозной колодкой. Расхождения между моделируемыми и полученными данными в ходе стендового эксперимента по критериям стабильности составили в среднем: по коэффициентам стабильности и колебания тормозного момента для рассматриваемых трех вариантов тормозных механизмов 5,1 и 6,7% соответственно. Дифференциация прижимающих элементов и сегментирование тормозных колодок оказывает эффект увеличения критериев стабильности и эффективности торможения для дисковых тормозных механизмов колодочного типа. Анализ зависимости поперечного перемещения и развиваемого тормозного момента позволил моделировать гарантированный результат по критерию стабильности и колебания тормозного момента дисковых тормозных механизмов колодочного типа. Апробация проведенных стендовых испытаний дала возможность утверждать, что разработанная модель получения результирующего тормозного момента для тормозного механизма с сегментными колодками может использоваться для проектирования пар трения с закладываемыми параметрами.

Ключевые слова: тормозной механизм, прижимающий элемент, дифференциация, сегментная тормозная колодка, коэффициенты стабильности, колебания тормозного момента

Для цитирования: Поляков П.А. Разработка способа обеспечения стабильности процесса торможения путём совершенствования конструкции тормозных механизмов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 682–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-682-693>. EDN: OFPYNH.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Developing the method ensuring stable braking via advanced design of braking devices

Pavel A. Polyakov^{1✉}

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract. The aim is to develop a method for ensuring the stability and efficiency of the braking process by differentiating the friction linings of brake pads of pad-type disc braking mechanisms. The research applied differentiation of the interaction time of friction pairs and their area, which provides the highest stability indicators of braking mechanisms. The non-

standardized bench equipment developed by the author, as well as segmental braking mechanisms providing differentiation of friction pairs by area were used in the study. A method of designing the resultant braking torque was developed using the relationship between the transverse movement of the pads and the developed braking torque of the friction unit. As a result of bench tests, the stability and fluctuation coefficients of the braking torque of the developed pad-type disc brake mechanisms with six pressing elements increased by 12.2 and 34.9%. These values were obtained as compared to serial brake mechanisms equipped with a monopressing mechanism with a single brake pad. The discrepancies between the simulated and obtained data during the bench test on the stability criteria averaged 5.1 and 6.7% for the stability coefficients and braking torque fluctuations for the three brake mechanism variants under consideration, respectively. Differentiation of pressing elements and segmentation of brake pads has the effect of increasing the stability criteria and braking efficiency for pad-type disc brakes. With the analysis of the dependence of the transverse displacement and the developed braking torque, a guaranteed result on the stability criterion and braking torque fluctuations of pad-type disc brakes was modeled. Based on the conducted bench tests, the model developed for obtaining the resultant braking torque for the braking mechanism with segmental pads can be used for designing friction pairs with the set parameters.

Keywords: brake mechanism, clamping element, differentiation, segmented brake pad, stability coefficients, braking torque fluctuations

For citation: Polyakov P.A. Developing the method ensuring stable braking via advanced design of braking devices. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):682-693. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-682-693>. EDN: OFPYHH.

ВВЕДЕНИЕ

Современные дисковые тормозные механизмы колодочного типа оснащаются различными типами прижимающих механизмов, в зависимости от отрасли их применения (рис. 1 а, б). Дисковые тормозные механизмы колодочного типа непосредственного действия в основном устанавливаются на автотранспортных средствах, что обеспечивает им быстродействие и сравнительно небольшой по модулю тормозной момент. Тормозные механизмы, оснащенные передаточным меха-

низмом, используются в подвижном составе железнодорожного транспорта, что позволяет увеличить величину тормозного момента за счет больших значений прижимающих сил. Увеличение модуля тормозного момента является мерой эффективности тормозных механизмов, но помимо нее другим критерием эффективности работы выступает характеристика стабильности тормозного момента во времени процесса торможения.

Изменение критерия тормозного момента во временном лаге обусловлено за счет дис-

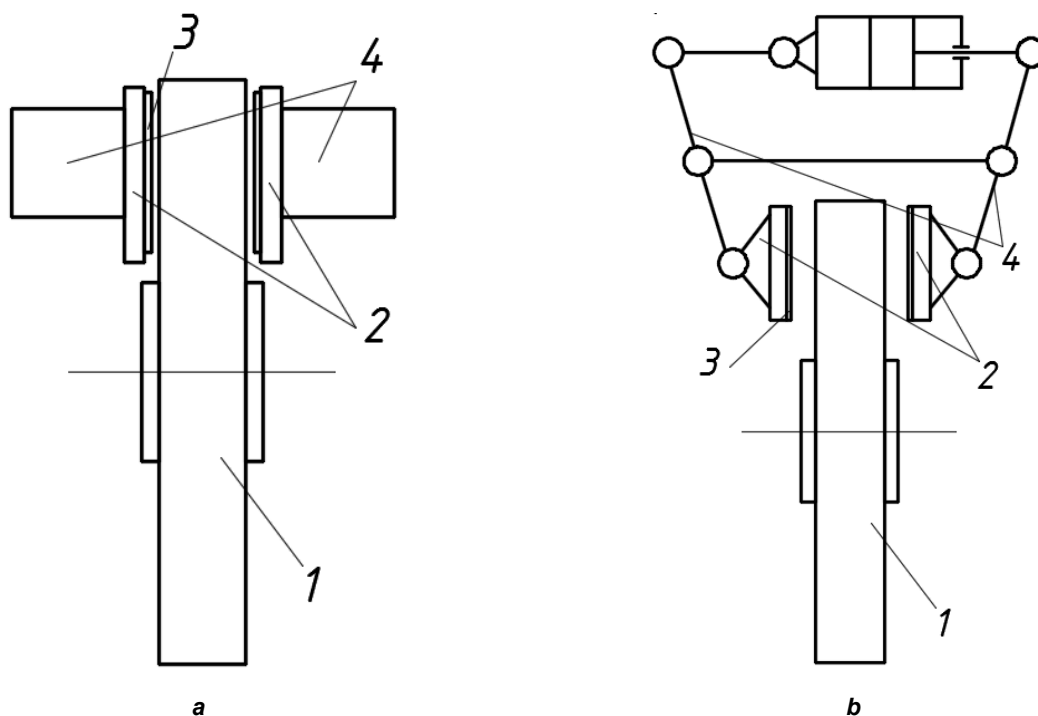


Рис. 1. Дисковые тормозные механизмы колодочного типа непосредственного воздействия (а) и с передаточным механизмом (б): 1 – тормозной диск, 2 – тормозная колодка, 3 – фрикционная накладка, 4 – прижимающий механизм

Fig. 1. Pad-type disc brake mechanisms of direct action (a) and with a transmission gear (b): 1 – brake disc, 2 – brake pad, 3 – friction facing, 4 – clamping mechanism

кретности контакта рабочих поверхностей тормоза постоянным изменением площадки контакта из-за деформирования микровыступов на взаимодействующих рабочих поверхностях. Динамическое взаимодействие в месте контакта фрикционной накладки и рабочей поверхности тормозного диска напоминает колебательный процесс, созданный перемещением тормозной колодки и свободным краем рабочих поверхностей тормозного диска.

В работе [1] определялось влияние коэффициентов демпфирования (b) на критерии стабильности тормозных механизмов. С помощью построенной конечно-элементной модели определялись соотношения коэффициентов демпфирования i -х элементов в паре трения на критерии стабильности трибоконтакта. В результате исследований изучены различные типы распространения затухания по модам. Были замечены два основных эффекта: эффект переключения и эффект сглаживания. Первое всегда стабилизирует тормоз, в то время как ко второму это не относится. Сочетание этих двух эффектов может сделать тормоз более неустойчивым в зависимости от распространения дополнительного демпфирования. В работе [2] рассматривались две многомерные модели, в которых величина коэффициента демпфирования, как и местоположение демпфирующих элементов, определены в качестве ключевых факторов стабильности. Кроме того, воспроизводился дестабилизирующий эффект демпфирования задней пластины тормоза, который сравним с действием прокладок. В статье [3] приводились экспериментальные данные о влиянии микронеровностей поверхности диска поезда на распределение температурного поля по площади и изменение коэффициента трения. Полученные результаты CFD-модели были изложены в виде рекомендаций по предельной эксплуатации дисков поездов, при этом аналитической связи между исследуемыми параметрами не приведено. В статьях [4–6] дано решение обратной задачи, связанной с определением конструктивных параметров из известных значений тормозного момента и распределения контактного давления по площади рабочих поверхностей на основе структурно-параметрического синтеза. Несмотря на комплексный подход проектирования тормоза, данный расчет показал, что однозначного значения тормозного момента не существует и исходя из заданного значения можно полу-

чить ряд конструктивных значений диска с различными конфигурациями прижимающего механизма. Исследование [7] посвящено разработке модели дискового тормоза с распределенными параметрами для моделирования высокочастотного визга. Сравнение измеренных и рассчитанных частот вынужденных колебаний показало, что модальная связь, вызванная деформацией накладки, может действовать как генератор визга. В работе [8] основное внимание уделялось характеристике формирования слоя трения и корреляции свойств слоя с характеристиками полимерматричных композитов. Механохимическое взаимодействие, происходящее в процессе трения, сравнивалось с ситуацией «без трения», когда «эквивалентные» температура и контактное давление, соответственно, были приложены к одному и тому же материалу. В статье [9] приведен сравнительный анализ тормозных дисков, выполненных из серого чугуна и углеродокерамики. Преимуществом углеродно-керамических соединений являются снижение веса и достижение высоких значений коэффициентов трения даже при высоких температурах. Недостатками данного материала являются стоимость применения и относительно высокая температура начала эффективного торможения по сравнению с обычными металлическими дисками. В статьях [10–13] приводится зависимость развиваемого тормозного усилия на курсовую устойчивость при различных режимах движения автомобилей. В исследовании [14] предлагается трехслойная конструкция тормозной колодки, на основе которой создана динамическая модель «тормозной диск – тормозная колодка с шестью степенями свободы» и проанализированы факторы, влияющие на нестабильность системы. В статье [15] изучена тенденция изменения износа во время торможения, а также проанализировано влияние тормозной нагрузки и начальной скорости торможения на износ. В исследовании [16] создан полный факторный расчет с использованием упрощенной версии ранее разработанного клеточно-автоматического подхода для исследования влияния четырех факторов на коэффициент трения и износ. В статье [17] представлена стратегия управления распределенными электродвигателями – по одному на колесо – для максимального рекуперативного торможения. Контроллер управляет совместным торможением между

несколькими электродвигателями и гидравлическими тормозами, которые по-прежнему необходимы для обеспечения максимальной эффективности торможения автомобиля. В работе [18] на основе модели гибридной неопределенности предлагается оптимизация конструкции дискового тормоза с гибридными неопределенностями на основе надежности для изучения оптимальной конструкции для снижения скрежета. В исследовании [19] приводится влияние распределения удельного давления на увеличение тормозного момента на основе конструкции тормозного диска с коническими рабочими поверхностями. В работе [20] исследуется деформация сжатия тормозных колодок при регулировке модуля упругости материала и изменения формы тормозной накладки.

Согласно проведенному анализу литературных источников, можно сделать вывод, что основное внимание уделяется влиянию конструктивных или технологических параметров рабочих поверхностей на эксплуатационные характеристики тормозных механизмов. Стабильность торможения оценивается в основном изменением коэффициента трения во времени взаимодействия, не учитывающим колебательный характер взаимодействия тормозных колодок и рабочих поверхностей тормозного диска. Используя проведенный анализ научных исследований, можно сформулировать два основных направления

стабилизации процесса торможения:

Первое связано с изменением материалов трения во фрикционном узле, что подразумевает увеличение износа взаимодействующих поверхностей.

Второе заключается в совершенстве конструкции тормозного механизма с дискретным трибоконтактом по времени и площади. Изменение трибоконтакта по времени и площади позволяет использовать существующие материалы фрикционных накладок при переменных количествах сегментных тормозных колодок.

Для сегментирования тормозных колодок необходимо оснастить их индивидуальным силовым приводом. Согласно схеме (рис. 2), индивидуальный силовой привод 1 воздействует на сегментную колодку 2. На тормозные колодки наклеены фрикционные накладки 3. Поочередно каждая из сегментных колодок прижимается к рабочей поверхности тормозного диска 4.

Для автоматического регулирования работы тормозного привода была разработана система управления тормозными прижимающими элементами (рис. 3), которая включала в себя непосредственно сами прижимающие элементы 1, соленоиды 2, обеспечивающие включение и отключение подачи тормозной

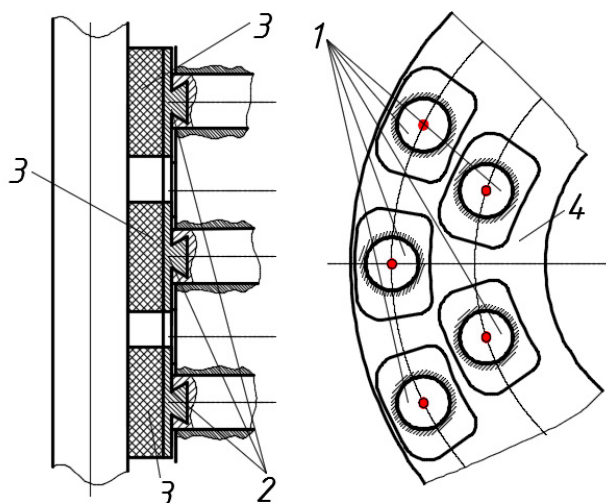


Рис. 2. Дисковый тормозной механизм колодочного типа с сегментными колодками:
1 – прижимающий элемент; 2 – тормозная колодка;
3 – фрикционная накладка; 4 – тормозной диск
Fig. 2. Pad-type disc brake with segmented pads:
1 – clamping element; 2 – brake pad; 3 – friction facing; 4 – brake disc

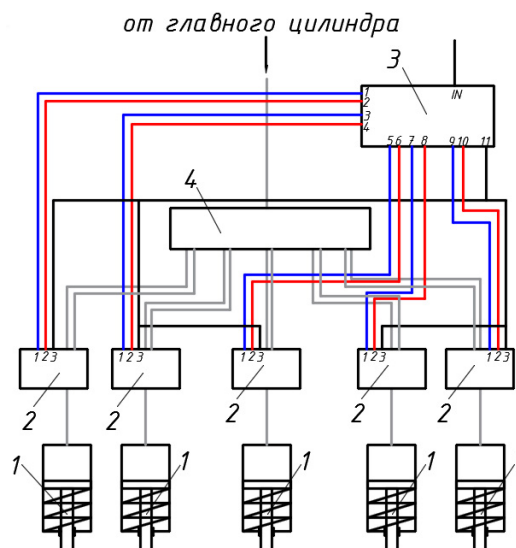


Рис. 3. Система управления прижимающими механизмами тормозных механизмов с гидравлическим приводом тормозной системы:
1 – прижимающий элемент;
2 – соленоид; 3 – плата управления прижимающим механизмом; 4 – гидроблок ABS
Fig. 3. Control system of brake device clamping mechanisms with the braking system hydraulic drive:
1 – clamping element; 2 – solenoid coil; 3 – clamping mechanism control board; 4 – ABS hydraulic unit

жидкости к прижимающим элементам, плату управления соленоидами 3, работающую на основе сигналов из блока антиблокировочной системы (АБС) 4. Система управления подачей тормозной жидкости может работать автономно относительно блока АБС, что позволяет с учетом нагрузки, приходящейся на колесо, и угловой скорости тормозящего колеса прижимать/отводить тормозные колодки от поверхности тормозного диска. Для испытания данного способа повышения стабильности и эффективности торможения вместо работы автоматической системы управления прижимающими элементами выполнялось ручное управление прижимающими элементами с сегментными колодками в условиях стендовых испытаний.

Для проведения стендового эксперимента был разработан стенд для исследования эксплуатационных параметров дисковых тормозных механизмов колодочного типа (рис. 4).

Электропривод осуществляет вращения тормозного диска через коробку передач, вывешенную на опорах качения с возможностью поворота вокруг оси вращения валов. Для осуществления торможения к рабочим поверхностям тормозного диска прижимались две колодки серийным тормозным суппортом, работающим от пневмопривода грузового автомобиля, либо разработанным суппортом с сегментными тормозными колодками с индивидуальными прижимающими элементами на основе гидропривода. Гидропривод индивидуальных тормозных колодок был выбран с точки зрения плавности работы в процессе взаимодействия рабочих поверхностей фрикционного узла. Замеры тормозного момента

производились с помощью S-образного тензометрического датчика, расположенного между стационарной опорой и рычагом, сочлененным с коробкой передач (рис. 5). При торможении в коробке возникал реактивный момент, стремящийся повернуть корпус коробки против вращения ее валов. Рычаг, закрепленный на корпусе коробки передач, создавал усилие на тензометрическом датчике. В результате электрический сигнал передавался на весовой терминал с дальнейшим построением кривой растягивающей силы во временном интервале при помощи программы PIC18F2550 USB HID Oscilloscope DR1r1.

Для расчета тормозного момента M_T при стендовых испытаниях использовалась зависимость:

$$M_T = P_c U_i r_{np}, \quad (1)$$

где P_c – растягивающая сила, определяемая с помощью тензодатчика, Н; U_i – передаточное число i -й передачи коробки передач; r_{np} – приведенный радиус от оси вращения вала коробки передач до точки крепления рычага к тензодатчику, м.

Для определения поперечного перемещения каждой сегментной тормозной колодки при взаимодействии с рабочей поверхностью диска использовался инклинометр-гирискон WitMotion HWT905-TTL (см. рис. 6). При этом проводились замеры развиваемого тормозного момента для каждой сегментной тормозной колодкой в каждом ряду. Последовательность, количество циклов и время начала работы каждой сегментной колодки указано в таблице.

С помощью инклинометра-гирископа WitMotion HWT905-TTL было смоделировано попереч-

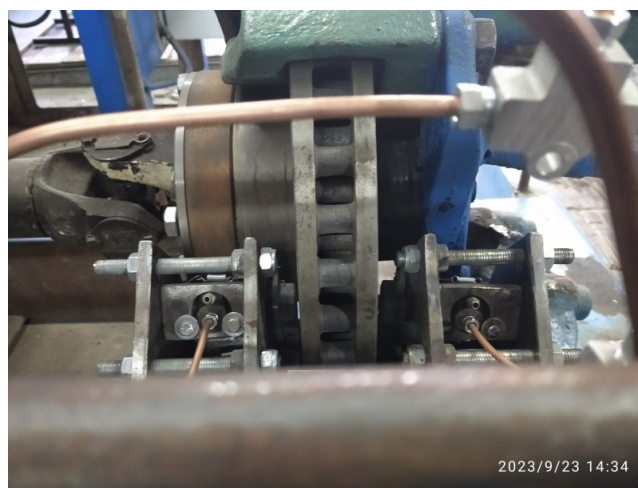


Рис. 4. Общий вид стенда для исследования эксплуатационных параметров дисковых тормозных механизмов колодочного типа

Fig. 4. General view of the test bench to study the operational parameters of pad-type disc brakes



Рис. 5. Способ установки тензодатчика для измерения тормозного момента

Fig. 5. Strain gauge installation method to assure the braking torque

ное перемещение сегментных тормозных колодок для дисковых тормозных механизмов колодочного типа с тремя (рис. 7 а), пятью (рис. 7 б) и шестью (рис. 7 с) сегментными колодками.

Согласно последовательности, количеству циклов и времени начала работы каждой сегментной колодки и полученных величин тормозного момента в ряду сегментных колодок, были смоделированы тормозные моменты при взаимодействии сегментных колодок с рабочими поверхностями тормозного диска дисковых тормозных механизмов колодочного типа с тремя (рис. 8 а), пятью (рис. 8 б) и шестью (рис. 8 с) сегментными колодками.

В связи с наложением работы некоторых сегментных тормозных колодок друг на друга величины результирующих тормозных моментов для тормозных механизмов с тремя, пятью и шестью сегментными колодками будут иметь следующий вид (рис. 9). На диаграмме результирующих тормозных моментов для каждого тормоза с i -м количеством сегментных колодок (M_{Ti}) во времени (τ) рассчитывался коэффициент стабильности (K_{cmi}):

$$K_{cmi} = \frac{M_{Tcpi}}{M_{Tmaxi}}, \quad (2)$$

Количество циклов, начало работы, продолжительность работы прижимающих элементов тормозных механизмов
Number of cycles, operation start, duration of brake mechanism clamping element operation

Дисковые тормозные механизмы колодочного типа с сегментными колодками			
Номер прижимающего элемента	Продолжительность работы, с	Количество циклов	Время начала работы, с
Первый	2,4	9	0
Второй	2,0	11	0
Третий	2,0	10	+0,5
Четвертый	2,4	6	+0,5
Пятый	2,0	10	+1,1
Шестой	2,4	8	+1,1



Рис. 6. Инклинометр-гироскоп WitMotion HWT905-TTL

Fig. 6. Whitmotion HWT905-TTL gyroscope inclinometer

где M_{Tcpi} , M_{Tmaxi} – величины среднего и максимального тормозных моментов для тормоза с i -м количеством сегментных колодок, Нм.

Как видно из графиков результирующего тормозного момента, для тормозного механизма с тремя прижимающими элементами кривая тормозного момента имела апериодические колебания по всему диапазону торможения. Это обеспечивалось смещением работы циклов каждого прижимающего элемента относительно других. На всей диаграмме встречались четыре просадки тормозного момента ввиду совпадения поперечных перемещений трех сегментных колодок. Для оценки стабильности и эффективности силовых факторов расчет проводился от времени устоявшегося тормозного момента (0,5 с). Коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента составили 0,965 и 0,77.

При моделировании результирующего тормозного момента тормозного механизма с пятью прижимающими элементами кривая тормозного момента на протяжении всего установившегося времени торможения имела незначительные колебания значений, что определялось достаточным количеством перекрытия перемещений сегментных колодок устройства в целом. K_{cm} и K_{kmm} составили

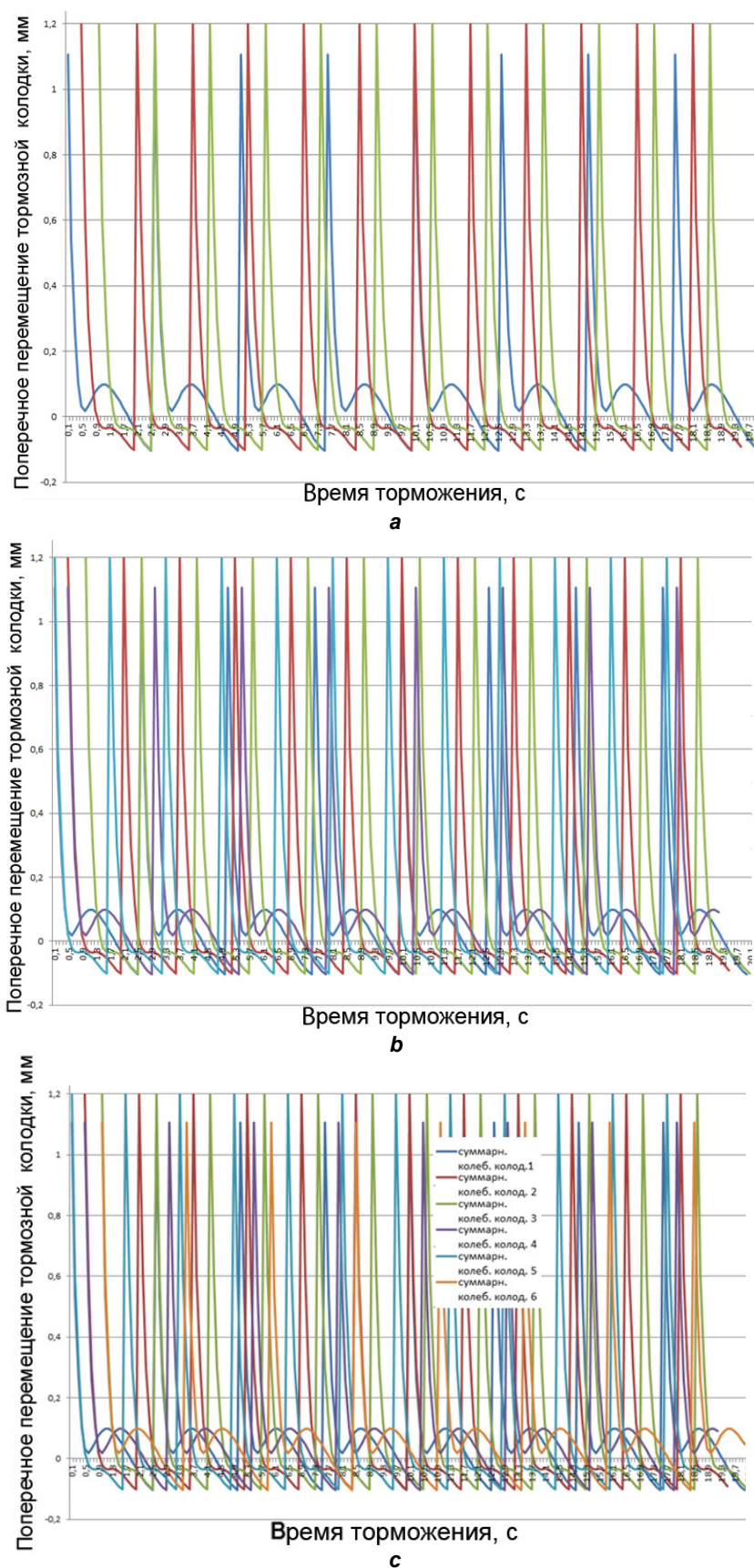


Рис. 7. Изменение поперечных перемещений колодок тормозных механизмов во времени при циклическом взаимодействии: а – с тремя; б – с пятью; в – с шестью сегментными колодками
Fig. 7. Variation in transverse movements of brake pads over time under cyclic interaction: a – with three segmented pads; b – with five segmented pads; c – with six segmented pads

0,984 и 0,89 соответственно. Дополнение к тормозному механизму с пятью прижимающими элементами еще одного прижимающего элемента позволило увеличить коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента до значений 0,991 и 0,961.

Для апробации моделируемых диаграмм результирующих тормозных моментов были проведены стендовые испытания дисковых тормозных механизмов колодочного типа с различным количеством сегментных тормозных колодок. В качестве контролируемых параметров использовались время взаимодействия каждой сегментной колодки, начало взаимодействия, количество циклов (см. таблицу) и развиваемый тормозной момент механизмом. За аналогичное время циклического торможения (20 с), как при моделировании, была построена диаграмма тормозных моментов для моноприжимающего и полиприжимающих механизмов тормозных механизмов с сегмент-

ными тормозными колодками (рис. 10).

Согласно апробации разработанного способа обеспечения стабильности торможения, проведенные стендовые испытания тормозных механизмов различных типов с разным количеством сегментных тормозных колодок показали рост показателей стабильности у тормозных механизмов различных типов с шестью прижимающими элементами относительно дисковых тормозных механизмов колодочного типа с моноприжимающим механизмом и едиными колодками:

- коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента увеличились на 12,2 и 34,9% соответственно;

- разница между моделируемыми и экспериментальными данными коэффициентов стабильности и колебания тормозного момента в среднем для трех вариантов тормозных механизмов составила в среднем 5,1 и 6,7%.

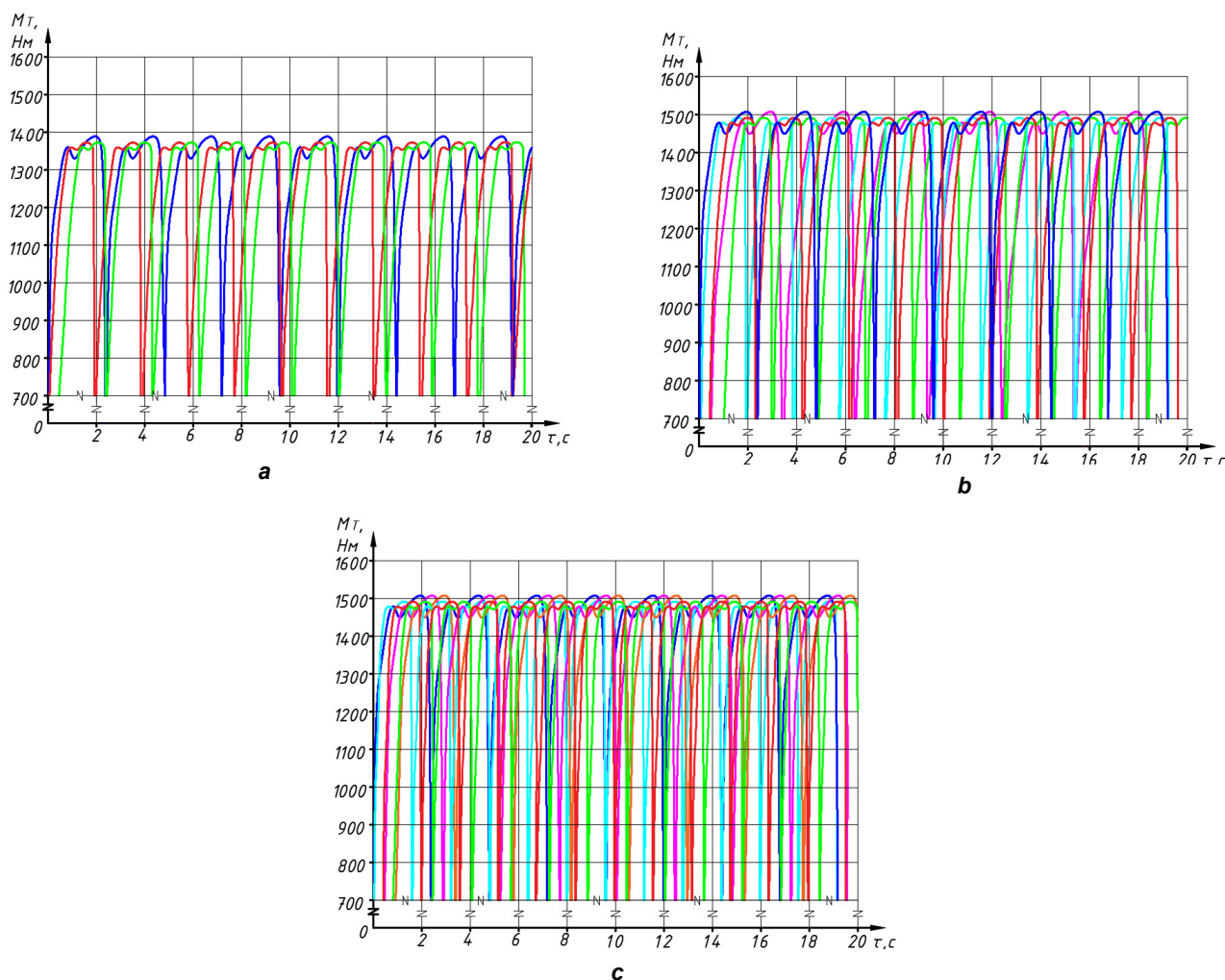


Рис. 8. Моделируемые диаграммы тормозного момента дисковых тормозных механизмов колодочного типа (M_τ) во времени при циклическом взаимодействии: а – с тремя; б – с пятью; в – с шестью прижимающими элементами
Fig. 8. Simulated diagrams of the braking torque of pad-type disc brake devices (M_τ) over time under cyclic interaction: а – with three clamping elements; б – with five clamping elements; в – with six clamping elements

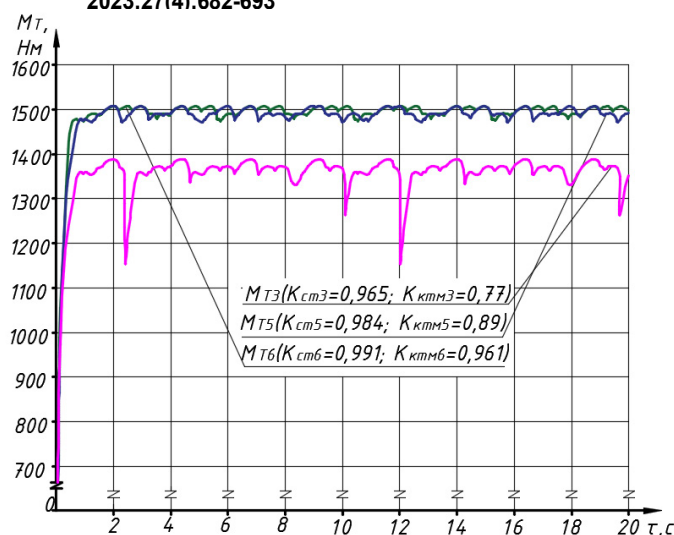


Рис. 9. Моделируемые диаграммы результирующего тормозного момента дисковых тормозных механизмов колодочного типа во времени при циклическом взаимодействии: с тремя, пятью и шестью прижимающими элементами

Fig. 9. Simulated diagrams of the resulting braking torque of pad-type disc brake devices over time under cyclic interaction with three, five and six clamping elements

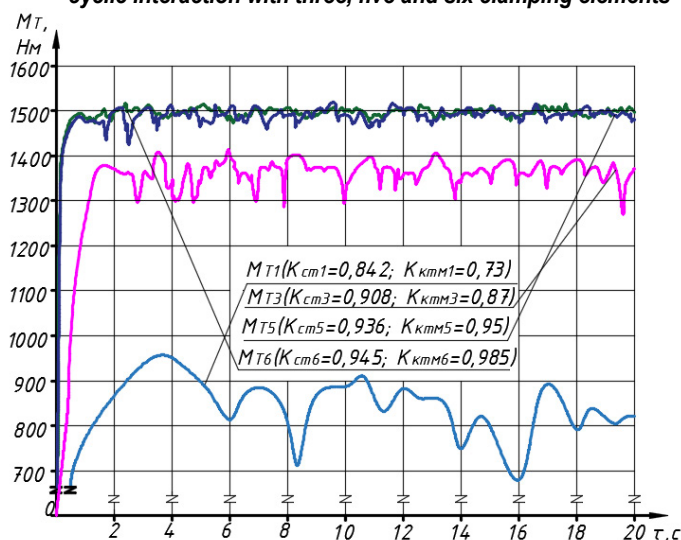


Рис. 10. Диаграммы тормозного момента механизмов с сегментными колодками в зависимости от количества прижимающих элементов и серийных дисковых тормозных механизмов колодочного типа

Fig. 10. Braking torque of segmented pad devices vs the number of clamping elements and serial pad-type disc brake mechanisms

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении необходимо отметить, что дифференцирование прижимающих элементов и тормозных колодок способствует росту параметров стабильности и эффективности торможения для различных типов дисковых тормозных механизмов колодочного типа. Проведенное моделирование изменения поперечного перемещения тормозных колодок и развиваемого тормозного момента способствует построению проектируемых тормозных механизмов с гарантированными величинами выходных характеристик и параметров их стабильности в период взаимодействия рабочих

поверхностей. Апробация при проведении стендовых испытаний дала показатели расхождения данными коэффициентов стабильности и колебания тормозного момента для трех объектов исследования 5,1 и 6,7% соответственно. Увеличение значений коэффициентов стабильности и колебания тормозного момента для тормозного механизма с шестью сегментными тормозными колодками относительно моноприжимающего тормозного механизма с единой колодкой объяснимо снижением влияния геометрии взаимодействующих поверхностей.

Список источников

1. Fritz G., Sinou J.-J., Duffal J.-M., Jezequel L. Effects of damping on brake squeal coalescence patterns—application on a finite element model // *Mechanics Research Communications*. 2007. Vol. 34. No. 2. P. 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.09.012>.
2. Wehner J.-H., Jekel D., Sampaio R., Hagedorn P. Optimization of finite element models of disc brakes // *Part of the SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology book series*. Cham: Springer, 2018. P. 31–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62713-7_4.
3. Bulthé A.L., Desplanques Y., Degallaix G., Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking // *Wear*. 2007. Vol. 263. Iss. 7-12. P. 1230–1242. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.052>.
4. Поляков П.А. Метод проектирования тормозного механизма дисково-колодочного типа с использованием структурно-параметрического синтеза тормозного механизма // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2021. № 12. С. 547–555. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2021-22-12-547-555>. EDN: VYPNKD.
5. Поляков П.А. Функционально-структурная модель структурно-параметрического синтеза тормозного механизма // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщений*. 2021. № 4. С. 32–43. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_4_32. EDN: ZZLSBQ.
6. Яицков И.А., Литвинов А.Е., Поляков П.А., Задаянчук Н.А. Структурно-параметрический синтез дисково-колодочного тормоза // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщений*. 2021. № 2. С. 75–85. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_2_75. EDN: NYXZGN.
7. Flint J., Hultén J. Lining-deformation-induced modal coupling as squeal generator in a distributed parameter disc brake model // *Journal of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 254. Iss. 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4052>.
8. Filip P., Weiss Z., Rafaja D. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications // *Wear*. 2002. Vol. 252. Iss. 3-4. P. 189–198. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00873-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00873-0).
9. Konca B. Material selection of brake rotors for sports cars // *MECH 202 TERM PROJECT*. 2019. 16 p. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.13813865>.
10. Li Peilong, Xu Hongmei. Braking efficiency and stability of chassis braking system of combine harvester: the theoretical derivation and virtual prototype simulation // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6713231>.
11. Chen Qingzhang, Liu Youhua, Li Xuezhi. Stability control of vehicle emergency braking with tire blowout // *International Journal of Vehicular Technology*. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/436175>.
12. Wang Fahui, Lu Yongjie, Li Haoyu. Heavy-duty vehicle braking stability control and HIL verification for improving traffic safety // *Journal of Advanced Transportation*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5680599>.
13. Yin Guodong, Jin XianJian. Cooperative control of regenerative braking and antilock braking for a hybrid electric vehicle // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/890427>.
14. Pan Gongyu, Chen Lei. Impact analysis of brake pad backplate structure and friction lining material on disc-brake noise // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7093978>.
15. Zhang S., Hao Q., Liu Y., Jin L., Ma F., Sha Z., et al. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6250694>.
16. Wahlström J. A Factorial design to numerically study the effects of brake pad properties on friction and wear emissions // *Advances in Tribology*. 2016. 10 p. <https://doi.org/10.1155/2016/8181260>.
17. Vignati M., Belloni M., Tarsitano D., Sabbioni E. Optimal cooperative brake distribution strategy for IWM vehicle accounting for electric and friction braking torques // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1088805>.
18. Lü Hui, Yu Dejie. Stability optimization of a disc brake system with hybrid uncertainties for squeal reduction // *Shock and Vibration*. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3497468>.
19. Поляков П.А., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Голиков А.А., Виниченко В.О. Математическое моделирование удельного давления тормозного механизма // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2020. № 5. С. 20–25. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-5-20-25>.
20. Gu Yihong, Liu Yucheng, Lu Congda. Effect of compressive strain of brake pads on brake noise // *Shock and Vibration*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8832363>.

References

1. Fritz G., Sinou J.-J., Duffal J.-M., Jezequel L. Effects of damping on brake squeal coalescence patterns—application on a finite element model. *Mechanics Research Communications*. 2007;34(2):181-190. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.09.012>.
2. Wehner J.-H., Jekel D., Sampaio R., Hagedorn P. Optimization of finite element models of disc brakes. In: *Part of the SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology book series*. Cham: Springer; 2018, p. 31-48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62713-7_4.

org/10.1007/978-3-319-62713-7_4.

3. Bulthé A.L., Desplanques Y., Degallaix G., Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking. *Wear*. 2007;263(7-12):1230-1242. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.052>.
4. Polyakov P.A. The method of designing a disc-pad brake mechanism of the structural-parametric synthesis of the brake mechanism. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2021;12:547-555. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2021-22-12-547-555>. EDN: VYPNKD.
5. Polyakov P.A. Functional-structural model of the structural-parametric synthesis of the braking mechanism. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshchenij = Published by Vestnik RGUPS, Rostov State Transport University*. 2021;4:32-43. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_4_32. EDN: ZZLSBQ.
6. Yaickov I.A., Litvinov A.E., Polyakov P.A., Zadayanchuk N.A. Structural and parametric synthesis of disc-pad and brake. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshchenij = Published by Vestnik RGUPS, Rostov State Transport University*. 2021;2:75-85. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_2_75. EDN: NYXZGN.
7. Flint J., Hultén J. Lining-deformation-induced modal coupling as squeal generator in a distributed parameter disc brake model. *Journal of Sound and Vibration*. 2002;254(1):1–21. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4052>.
8. Filip P., Weiss Z., Rafaja D. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*. 2002;252(3-4):189-198. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00873-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00873-0).
9. Konca B. Material selection of brake rotors for sports cars. In: *MECH 202 TERM PROJECT*. 2019, 16 p. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.13813865>.
10. Li Peilong, Xu Hongmei. Braking efficiency and stability of chassis braking system of combine harvester: the theoretical derivation and virtual prototype simulation. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6713231>.
11. Chen Qingzhang, Liu Youhua, Li Xuezhi. Stability control of vehicle emergency braking with tire blowout. In: *International Journal of Vehicular Technology*. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/436175>.
12. Wang Fahui, Lu Yongjie, Li Haoyu. Heavy-duty vehicle braking stability control and HIL verification for improving traffic safety. In: *Journal of Advanced Transportation*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5680599>.
13. Yin Guodong, Jin XianJian. Cooperative control of regenerative braking and antilock braking for a hybrid electric vehicle. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/890427>.
14. Pan Gongyu, Chen Lei. Impact analysis of brake pad backplate structure and friction lining material on disc-brake noise. In: *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7093978>.
15. Zhang S., Hao Q., Liu Y., Jin L., Ma F., Sha Z., et al. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6250694>.
16. Wahlström J. A factorial design to numerically study the effects of brake pad properties on friction and wear emissions. In: *Advances in Tribology*. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8181260>.
17. Vignati M., Belloni M., Tarsitano D., Sabbioni E. Optimal cooperative brake distribution strategy for iWM vehicle accounting for electric and friction braking torques. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1088805>.
18. Lü Hui, Yu Dejie. Stability optimization of a disc brake system with hybrid uncertainties for squeal reduction. In: *Shock and Vibration*. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3497468>.
19. Polyakov P.A., Fedotov E.S., Polyakova E.A., Golikov A.A., Vinichenko V.O. Mathematical modeling of brake specific pressure. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2020;5:20-25. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-5-20-25>.
20. Gu Yihong, Liu Yucheng, Lu Congda. Effect of compressive strain of brake pads on brake noise. In: *Shock and Vibration*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8832363>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Поляков Павел Александрович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Транспортные процессы
и технологические комплексы»,
Кубанский государственный технологический
университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, Россия
✉ polyakov.pavel88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0576-5398>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel A. Polyakov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Transport processes
and technological complexes,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia
✉ polya-kov.pavel88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0576-5398>

Вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.10.2023 г.;
одобрена после рецензирования 27.10.2023 г.;
принята к публикации 06.11.2023 г.

Contribution of the author

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by author.

Information about the article

The article was submitted 20.10.2023 ;
approved after reviewing 27.10.2023;
accepted for publication 06.11.2023.