

## ЭНЕРГОНАКОПИТЕЛЬНАЯ ТОРМОЗНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ОБОРУДОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

*Исаков В.С., Ерейский А.В., Дериглазов В.С., Ткаченко А.Н.*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова, Новочеркасск*

**Ключевые слова:** тормозные устройства, энергонакопительное торможение, накопитель энергии, мотор-колесо, дифференциальный редуктор, мобильное транспортное средство, электропривод.

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность совершенствования энергонакопительных тормозных устройств с маховичным накопителем, присоединенным к приводу технологической или транспортной машины посредством дифференциального планетарного передаточного механизма. Подобное конструктивное решение позволяет аккумулировать в маховике кинетическую энергию тормозимого объекта с последующим использованием при разгоне без преобразования в другие виды энергии. В случае применения предложенной энергонакопительной тормозной системы в конструкции мобильной машины сказываются ограничения, связанные с отсутствием локальной сети для сброса энергии приводного двигателя, работающего в генераторном режиме, а также невозможностью продолжительного сохранения кинетической энергии в маховичном накопителе. В качестве конструктивного решения по совершенствованию предложенной ранее схемы энергонакопительной тормозной системы рассмотрена возможность применения вместо маховика мотор-колеса, которое включает в свою конструкцию обратимый электродвигатель и колесо – элемент, обладающий значительным моментом инерции. Использование мотор-колеса позволит преобразовывать сохраненную кинетическую энергию в электрическую с сохранением в электрохимическом аккумуляторе мобильной машины. Произведенный анализ конструкций существующих мотор-колес позволил остановить выбор на прямоприводных мотор-колесах, позволяющих с большей эффективностью сохранять кинетическую энергию транспортной машины и с меньшими потерями преобразовывать ее в электрическую. Предложено схемное решение энергонакопительной тормозной системы с применением мотор-колеса в качестве накопителя и преобразователя кинетической энергии тормозимой машины, и обоснован принцип ее функционирования. Предварительная оценка объемов накапливаемой и сохраняемой в бортовом электрохимическом аккумуляторе энергии подтверждает работоспособность и эффективность предлагаемого конструктивного решения.

## ACCUMULATIVE BRAKING SYSTEM FOR MOBILE VEHICLES WITH ELECTRIC DRIVE

*Isakov V.S., Ereisky A.V., Deriglazov V.S., Tkachenko A.N.*

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk*

**Keywords:** braking systems, accumulative braking, energy accumulator, in-wheel motor, differential gearbox, mobile vehicle, electric drive.

**Abstract.** The study considers the possibility of improving accumulative braking systems with a flywheel accumulator connected to the drive of a technological machine or a transport vehicle by means of a differential planetary transmission gear system. This design solution allows accumulating the kinetic energy of the decelerating body in the flywheel. It can be subsequently used during acceleration without conversion into other types of energy. When the proposed accumulative braking systems are used in a mobile machine, there are limitations associated with the lack of a local network for energy discharge of the drive motor operating in the generator mode. It is also impossible to save kinetic energy in the flywheel accumulator for a long time. In order to improve the previously proposed design of the accumulative braking system, we considered the possibility of using an in-wheel motor instead of a flywheel. It consists of a reversible electric motor and a wheel as an element with a significant moment of inertia. The use of an in-wheel motor will make it possible to convert the accumulated kinetic energy into electrical energy, which will be stored in the electrochemical accumulator of the mobile vehicle. We analysed the designs of existing in-wheel motors and chose the direct-drive motors, as they allow to save the kinetic energy of the transportation vehicle more efficiently and to convert it into electrical energy with less losses. In this article, we proposed a schematic design of the accumulative braking system with an in-wheel motor as an accumulator and a converter of the kinetic energy of the braking machine, and substantiated the principle of its functioning. A preliminary assessment of the amounts of energy accumulated and stored in the on-board electrochemical accumulator confirmed the applicability and efficiency of the proposed design.

## Введение

Стремительный рост цен на энергоносители, ограниченность природных ресурсов нефти и газа, проблемы с обеспечением экологической безопасности обусловили, с одной стороны, новые нормативные требования и стандарты для технических средств и их приводов, а с другой, желание производителей предоставить экономически более выгодные, конкурентноспособные, энергосберегающие предложения для потребителей. В частности для мобильных транспортных средств разработаны и внедрены электрические и гибридные приводы, предложены двигатели, использующие альтернативные виды топлива. Однако, общей тенденцией при конструировании машин при любых видах приводов остается достижение минимального энергопотребления рабочими и исполнительными органами, накапливание энергии на холостом ходе, обратном движении, при торможении и т.п. с целью ее дальнейшего использования. В этой связи разработка новых энергосберегающих и энергонакопительных конструкций и модулей для технологических и транспортных машин является актуальными направлениями исследований.

## Возможности энергонакопительного торможения транспортных средств

Авторами в предыдущих работах [1, 2] предлагались конструкции энергонакопительных тормозных систем для механизма передвижения тележки мостового крана, поворотной платформы экскаватора и т.д. При определенной доработке аналогичные системы могут быть предложены и для транспортных мобильных машин, оборудованных новыми типами двигателей.

В энергонакопительную систему (рис. 1) входят электродвигатель 5, присоединенный к водилу 2 дифференциального планетарного редуктора 4, ходовое колесо тележки крана 7 соединенные с большим солнечным колесом 3 редуктора 4 и маховичным накопителем в присоединенным к малому солнечному колесу 1.

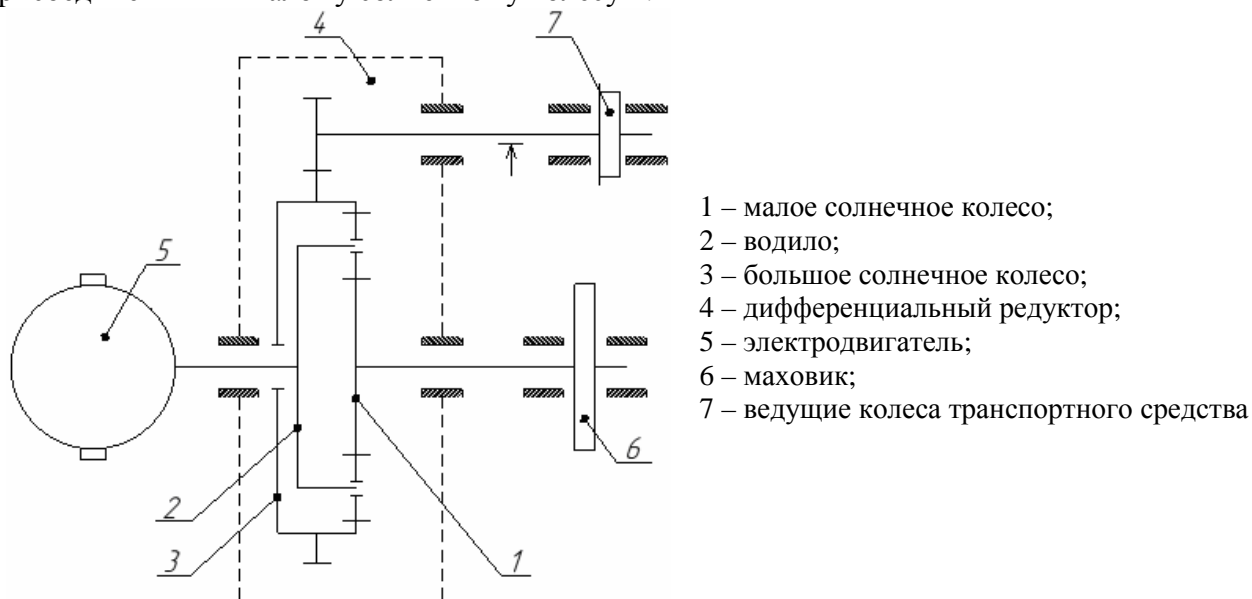


Рис. 1. Схема энергонакопительной тормозной системы с дифференциальным планетарным редуктором

Процесс торможения проходит в два этапа. В момент начала торможения двигатель 5 переводится в генераторный режим и величина тока двигателя определяет момент на его валу и соответственно интенсивность торможения. При этом снимается тормозное усилие с маховика 6, который разгоняется, получая кинетическую энергию транспортного средства. Момент на валу электродвигателя создает сопротивление на водиле дифференциального редуктора позволяя кинетической энергии тележки разогнать маховик.

Первый этап торможения тележки проходит до полной остановки двигателя, после чего двигатель переводится в двигательный режим с сохранением величины и направления

момента на его валу. Второй этап торможения продолжается до полной остановки тележки. При этом в течение всего процесса торможения маховик накапливает кинетическую энергию, которая передается от тележки благодаря моменту создаваемому на водиле.

Теоретические и экспериментальные исследования применения энергонакопительного торможения, проведенные на математической модели и экспериментальной установке, подтвердили ее работоспособность и эффективность.

Исследования динамики функционирования энергонакопительной тормозной системы позволили провести регрессионный анализ и разработать рекомендации по конструированию подобных систем применительно к механизмам передвижения грузоподъемных машин.

Одним из важных направлений совершенствования подобных энергонакопительных систем может быть их установка на мобильные транспортные средства не связанные с внешней сетью (электромобиль, электропогрузчики и т.д.)

В случаях применения энергонакопительных тормозных устройств в конструкции мобильных машин необходимо учитывать условия их эксплуатации (частота цикла, время остановки, продолжительность и повторяемость цикла) [3, 4].

Мобильные транспортно-технологические машины, оборудованные электроприводом, в зависимости от условий эксплуатации могут иметь различные по продолжительности и интенсивности циклы, различное время остановки и стоянки, перемещаться под углом к горизонту. То есть каждый рабочий цикл может отличаться от предыдущего. В связи с чем использование маховичного накопителя энергии для сохранения кинетической энергии тормозимого транспортного средства может быть недостаточно эффективным [5, 6]. Например, при продолжительной стоянке в маховике будут иметь место потери кинетической энергии.

Можно отметить, что в настоящее время существует целый ряд технических решений от различных авторов, позволяющих осуществлять энергонакопительное торможение посредством гидравлических, пневматических, электрических, электромеханических, инерционных и комбинированных накопителей [7-9].

Все они имеют свои достоинства и недостатки и некоторые предложения уже находят применение в конструкциях производимых транспортных средств.

### **Анализ конструкций мотор-колес и их классификация**

В данной работе анализируются возможности использования в качестве накопителя энергии для мобильных машин устройства позволяющего преобразовывать кинетическую энергию в электрическую и сохранять в аккумуляторной батарее [10].

В качестве устройства сохранения энергии авторами предлагается мотор-колесо. В предлагаемой системе мотор-колесо рассматривается не по прямому назначению как элемент ходовой части автомобиля, а как инерциод, имеющий возможность накапливать кинетическую энергию связанный с генератором в единое целое и имеющий возможность преобразовывать кинетическую энергию в электрическую. То есть как генератор с большим моментом инерции или симбиоз маховика и генератора.

Конструктивно мотор-колеса разделяют на редукторные (GearedHubMotor) и безредукторные или прямоприводные (DirectDrive), (рис. 2).

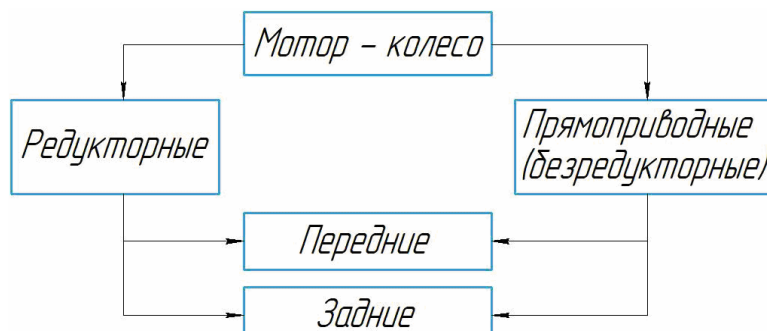


Рис. 2. Классификация мотор-колес

Редукторные мотор-колеса представляют собой тип электрических моторов с встроенным редуктором и обгонной муфтой. Они используются в электрических велосипедах и других электрических транспортных средствах. Редукторные мотор-колеса отличаются от прямоприводных моторов тем, что они имеют более высокую частоту вращения мотора и более высокий крутящий момент. Редуктор снижает высокую частоту вращения мотора и увеличивает крутящий момент, что обеспечивает более эффективную работу при низких скоростях и на подъемах.

Однако, при движении накатом, редукторные мотор-колеса не создают противодействия, поскольку обгонная муфта отключает мотор, и он не вращается, в отличие от директ-драйв моторов. Редукторные мотор-колеса имеют более высокую надежность и мощность, чем директ-драйв моторы, но они также могут иметь больший вес и стоимость.

Прямоприводные мотор-колеса (DirectDrive), представляют собой электрические двигатели, которые находятся внутри втулки колеса и напрямую приводят его в движение без использования редуктора. Это означает, что внешний корпус мотора является частью колеса, и вся мощность передается непосредственно на колесо без потерь на передачу через редуктор. Это делает их более эффективными и более тихими, чем редукторные мотор-колеса.

Прямоприводные мотор-колеса также обладают высокой мощностью и возможностью развивать большую скорость. Они обычно используются в электровелосипедах, электромотоциклах и электросамокатах, которые рассчитаны на скорость от 40 км/ч. Также они обладают высокой надежностью и меньшим количеством движущихся частей, что снижает вероятность поломок и увеличивает срок их службы.

Однако у прямоприводных мотор-колес есть некоторые недостатки. Они могут быть тяжелее редукторных мотор-колес, и могут противодействовать при педалировании и движении накатом, что может ухудшить эффективность и увеличить расход электроэнергии. Они также не подходят для использования на пересеченной местности, так как могут иметь скромные тяговые характеристики.

Прямоприводные мотор-колеса лучше подходят для систем рекуперации энергии. Это связано с тем, что они не имеют внутренних передач, которые создают потери энергии при передаче мощности от мотора к колесу. Таким образом, прямоприводные мотор-колеса могут генерировать более высокие уровни рекуперации, чем редукторные мотор-колеса. Однако важно отметить, что эффективность рекуперации энергии зависит от многих факторов, включая тип и состояние аккумулятора, технические характеристики мотора и колеса, а также условия эксплуатации, такие как скорость и стиль езды [11].

Наибольший интерес представляют прямоприводные (безредукторные) мотор-колеса, которые могут применяться в качестве маховичного накопителя при высокой частоте рабочего цикла и преобразовывать накопленную кинетическую энергию в электрическую в случае длительного перерыва между циклами.

### **Возможности применения мотор колес в конструкции энергонакопительной тормозной системы**

Конструкция энергонакопительной тормозной системы для мобильного транспортного средства может иметь вид (рис. 3).

Функционирование предлагаемой системы будет осуществляться в следующей последовательности. Процесс торможения осуществляется из режима установившегося движения, когда энергия от приводного двигателя передается от вала 4 дифференциального планетарного редуктора к большому солнечному колесу, сведенному посредством трансмиссии 10 транспортного средства с ходовыми колесами 1. На вал мотор-колеса 8 наложен стояночный тормоз 11.

В процессе установившегося движения транспортного средства электродвигатель 5 передает крутящий момент ходовым колесам 1 через дифференциальный редуктор 9 и трансмиссию 10 получая энергию от аккумулятора 7.

В течение торможения снимается тормозное усилие в тормозе 11 и двигатель переводится в генераторный режим с передачей энергии в аккумулятор 7 и создавая на валу водила опорный момент для передачи кинетической энергии транспортного средства накопителю 8.

Торможение выполняется до остановки двигателя 5, после чего он переводится в двигательный режим, сохраняя на валу величину и направление момента.

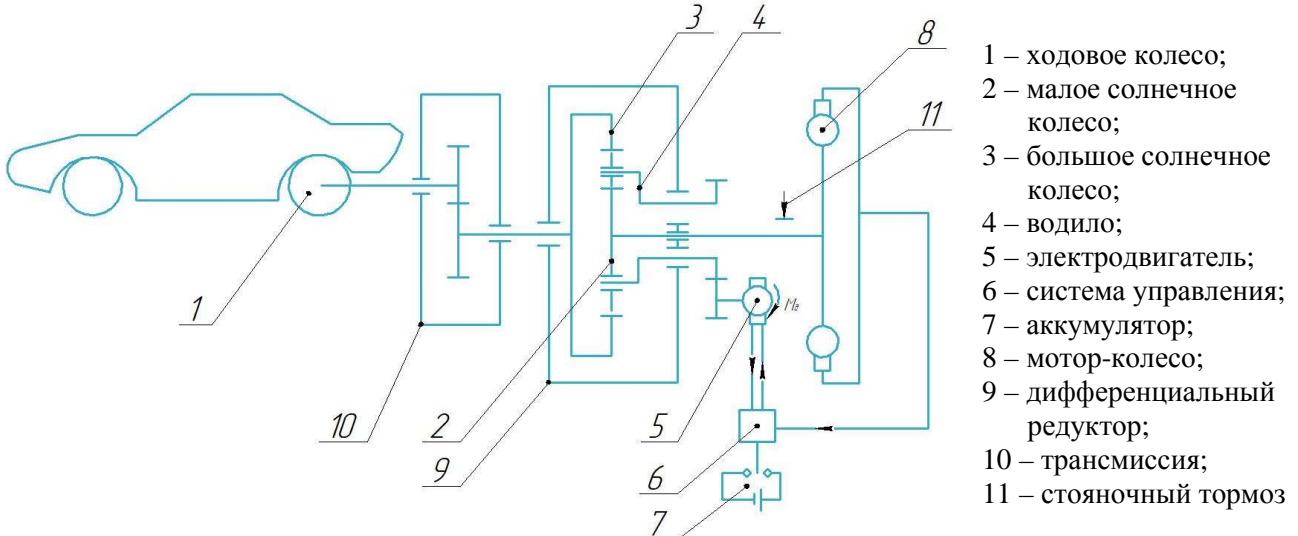


Рис. 3. Энергонакопительная тормозная система мобильного транспортного средства

Интенсивность торможения будет определяться величиной момента на валу электродвигателя [12]. Далее процесс осуществляется до полной остановки транспортного средства.

Использование мотор-колеса в качестве накопителя энергии позволит сохранять кинетическую энергию транспортного средства в подвижных массах мотор-колеса не преобразуя ее при высокой частоте рабочего цикла транспортного средства. В случае необходимости (продолжительная стоянка, частоты и продолжительности рабочего цикла) можно преобразовывать кинетическую энергию подвижных масс мотор-колеса в электрическую.

Такой принцип функционирования предлагаемой энергонакопительной тормозной системы позволяет применять ее на мобильных транспортных средствах не связанных с локальными электрическими сетями.

Для подтверждения работоспособности и эффективности предлагаемого конструктивного решения авторами проведены исследования на математической модели показавшие расширение возможностей энергонакопительного торможения в случае применения мотор-колеса в качестве накопителя.

На графике (рис. 4) представлены зависимости количества накапливаемой энергии в инерционной части мотор-колеса (зеленая кривая) и преобразованной энергии переданной в электрохимический аккумулятор мобильного транспортного средства (черная кривая) в зависимости от величины тока приводного двигателя определяющего интенсивность замедления.

### Основные результаты и выводы

На основании проведенных исследований разработана конструкция и принцип функционирования энергонакопительной тормозной системы с применением мотор-колеса в качестве накопителя энергии, позволяющая более эффективно использовать сохраняемую в процессе торможения кинетическую энергию мобильного транспортного средства оборудованного электрическим приводом.

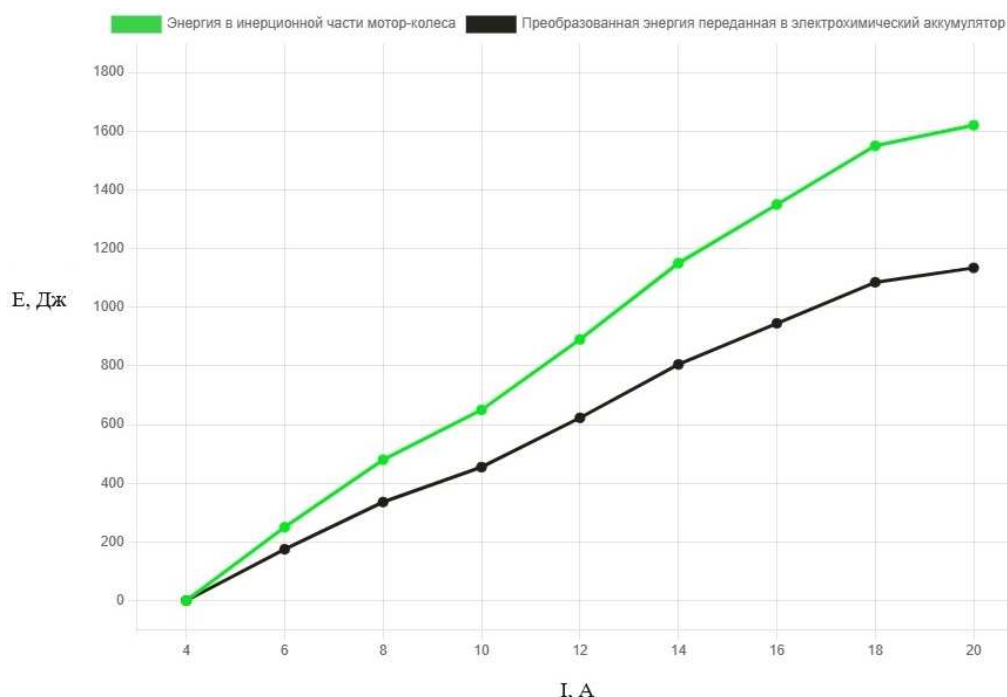


Рис. 4. Зависимость количества накопленной энергии в инерционной части мотор-колеса и преобразованной энергии переданной в аккумулятор от величины управляющего воздействия

#### Список литературы

- Исаков В.С., Ерейский А.В. Повышение эффективности применения энергосберегающих технологий в процессах торможения подъемно-транспортных, строительных и горных машин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2018. №3. – С. 80-88. – doi.org/10.17213/0321-2653-2018-3-80-88.
- Исаков В.С., Ерейский А.В., Кветкин А.А. Структурный анализ тормозных энергосберегающих систем транспортно-технологических машин // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S13. – С. 11. – URL: [transport-kgasu.ru/files/N13-11TKR19.pdf](http://transport-kgasu.ru/files/N13-11TKR19.pdf).
- Степаненко В. П. Определение параметров накопителей энергии комбинированных силовых установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. 8. – С. 166-174.
- Щербаков В.С., Корытов М.С., Шершнева Е.О. Ограничение колебаний груза, перемещаемого мостовым краном: монография. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2018. – 154 с.
- Корытов М.С., Щербаков В.С., Беляков В.Е. Моделирование и исследование колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2019. – Т. 16, № 5(69). – С. 526-533.
- Герbst В.А. Влияние гибкого подвеса груза на торможение крановой тележки // Известия вузов. Машиностроение. – 1960. – № 8. – С. 148-154.
- Хмара Л.А., Холодов А.П. Повышение эффективности бульдозера путем использования гидропневмоаккумулирующей системы // Строительные и дорожные машины. – 2012. – Т. 3. – С. 33-37.
- Мятеж А.В., Ярославцев М.В. Определение энергоёмкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4(47). – С. 62-65.
- Железнов Е.И., Железнов Р.Е. Моделирование работы устройства управления инерционной тормозной системы прицепа // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. – 2014. – Т. 9, № 19. – С. 24-27.
- Джента Дж. Накопление кинетической энергии: Теория и практика современных маховичных систем / пер. с англ. Н.М. Жмудь, В.Л. Кулакова; под ред. Г.Г. Портнова. – М.: Мир, 1988. – 428 с.
- Ярославцев М.В. Определение потерь в тяговом приводе автономного транспортного средства с комбинированной энергетической установкой методом имитационного моделирования // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 9 частях. Часть 5. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2015. – С. 174-176.
- Носко А.Л. Методика оценки изменения тормозного момента применительно к тормозам грузоподъемных машин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 5(686). – С. 37-44.

## References

1. Isakov V.S., Ereyskiy A.V. Improving the efficiency of energy-saving technologies use in the braking processes of lifting tools, construction and mining machines // News of universities. The North Caucasus region. Series: Technical Sciences. 2018, no. 3, pp. 80-88. doi.org/10.17213/0321-2653-2018-3-80-88.
2. Isakov V.S., Ereyskiy A.V., Kvetkin A.A. Structural analysis of braking energy-saving systems of transport and technological machines // Technique and technology of transport. 2019, no. S13, pp. 11. URL: transport-kgasu.ru/files/N13-11TKR19.pdf.
3. Stepanenko V. P. Determination of combined power plants energy storage devices parameters// Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2016, no. 8, pp. 166-174.
4. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Shershneva E.O. Limitation of cargo fluctuations moved by a bridge crane: monograph. – Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SIBADI), 2018. – 154 p.
5. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Belyakov V.E. Modeling and investigation of cargo fluctuations moved by a lifting crane // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy. 2019, vol. 16, no. 5(69), pp. 526-533.
6. Gerbst V.A. The influence of flexible cargo suspension on a crane trolley braking// News of universities. Mechanical engineering. 1960, no. 8, pp. 148-154.
7. Khmara L.A., Kholodov A.P. Increasing the efficiency of a bulldozer usage in a hydropneumatic accumulating system // Construction and road machines. 2012, vol. 3, pp. 33-37.
8. Myatezh A.V., Yaroslavtsev M.V. Determination of the energy intensity of the onboard buffer capacitor energy storage for urban electric transport // Transport of the Russian Federation. 2013, no. 4(47), pp. 62-65.
9. Zheleznov E.I., Zheleznov R. Simulation of the trailer inertial braking system control device operation// News of Volgograd State Technical University. Series: Ground Transport Systems. 2014, vol. 9, no. 19, pp. 24-27.
10. Genta J. Accumulation of kinetic energy: Theory and practice of modern flywheel systems / translated from English by N.M. Zhmud, V.L. Kulakov; edited by G.G. Portnov. – M.: World, 1988. – 428 p.
11. Yaroslavtsev M.V. Determination of losses in the traction drive of an autonomous vehicle with a combined power plant by the simulation modeling method // Science. Technology. Innovations, Collection of scientific papers in 9 parts. Part 5. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2015. – P. 174-176.
12. Nosko A.L. Methodology for assessing the change in braking torque in relation to the lifting machines brakes // News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2017, no. 5(686), pp. 37-44.

### *Сведения об авторах:*

### *Information about authors:*

<b>Исаков Владимир Семенович</b> – профессор, доктор технических наук	<b>Isakov Vladimir Semenovich</b> – Professor, doctor of technical sciences
<b>Ерейский Андрей Владимирович</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Ereyskiy Andrey Vladimirovich</b> – candidate of technical sciences, Assistant professor
<b>Дериглазов Вячеслав Сергеевич</b> – ассистент	<b>Deriglazov Vyacheslav Sergeevich</b> – assistant
<b>Ткаченко Андрей Николаевич</b> – студент	<b>Tkachenko Andrey Nikolaevich</b> – master student
dvskl21@gmail.com	

Получена 26.09.2023