

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/15>

УДК 630 : 629.11.02/098



Имитационное моделирование работы рекуперативных электромагнитных амортизаторов, установленных в подвеске лесовозного автопоезда

Валерий И. Посметьев, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Вадим О. Никонов , 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Виктор В. Посметьев, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Владимир А. Зеликов, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В данной статье решается проблема повышения энергоэффективности процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Опыт эксплуатации показывает, что более 10 % энергии топлива расходуется лесовозным автопоездом на процессы трения в подвесках его звеньев. Обоснована актуальность целесообразности преобразования, накопления и полезного использования рассеиваемой в подвеске автопоезда энергии. Потенциал современных разработок российских и зарубежных ученых в области преобразования энергии колебаний в электрическую энергию различными по конструкции амортизаторами подвесок является достаточно значительным. При проектировании рекуперативных электромагнитных амортизаторов, все еще возникают проблемные вопросы, связанные с их ограниченной генерируемой мощностью. С целью повышения производительности генерирования электрической энергии, предложена перспективная конструкция рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах. Исследование выполнялось на основе методов математического и имитационного моделирования. При изменении высоты неровностей от 0,1 до 0,9 м рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 0,34 до 10,5 кВт. При движении лесовозного автопоезда со скоростью 20 км/ч по неровностям опорной поверхности малой высоты – 0 ... 0,2 м, рекуперативные амортизаторы генерируют ограниченную мощность, не превышающую 1,35 кВт. При высоте неровностей опорной поверхности – 0,4 ... 0,6 м рекуперативные амортизаторы генерируют мощность в диапазоне от 4,2 до 6,8 кВт. При увеличении скорости движения автопоезда от 10 до 30 км/ч рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 1,17 до 7,94 кВт. Использование полученных результатов позволит конструкторам на стадии проектирования осуществлять доработку аналогичных конструкций рекуперативных электромагнитных амортизаторов.

Ключевые слова: лесовозный автомобиль-тягач, рекуперативный электромагнитный амортизатор, поверхность лесовозной дороги, численное интегрирование, магнитная индукция, рекуперированная электрическая мощность, компьютерная программа, кольцевые магниты, производительность

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Имитационное моделирование работы рекуперативных электромагнитных амортизаторов, установленных в подвеске лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 260–279. – Библиогр.: с. 275–278 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/15>.

Поступила 11.04.2024. *Пересмотрена* 25.04.2024. *Принята* 25.04.2024 *Опубликована онлайн* 17.06.2024

Article

Simulation modeling of the operation of regenerative electromagnetic shock absorbers installed in the suspension of a timber road train

Valerii I. Posmetev¹, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Vadim O. Nikonov¹ , 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Viktor V. Posmetev¹, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Vladimir A. Zelikov¹, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

¹*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

This article solves the problem of increasing the energy efficiency of the process of removing timber by logging road trains. Operating experience shows that more than 10 % of the fuel energy is consumed by a timber road train on friction processes in the suspensions of its links. The relevance of the feasibility of transformation, accumulation and beneficial use of energy dissipated in the suspension of a road train is substantiated. The potential of modern developments by Russian and foreign scientists in the field of converting vibration energy into electrical energy using suspension shock absorbers of various designs is quite significant. When designing regenerative electromagnetic shock absorbers, problematic issues still arise related to their limited generated power. In order to increase the productivity of electrical energy generation, a promising design of a regenerative electromagnetic shock absorber based on permanent magnets has been proposed. The study was carried out based on mathematical and simulation modeling methods. When the height of unevenness changes from 0.1 to 0.9 m, the recovered electrical power increases from 0.34 to 10.5 kW. When a logging road train moves at a speed of 20 km/h over uneven supporting surfaces of low height – 0 ... 0.2 m, regenerative shock absorbers generate limited power not exceeding 1.35 kW. With a height of unevenness of the supporting surface of 0.4 ... 0.6 m, regenerative shock absorbers generate power in the range from 4.2 to 6.8 kW. When the speed of the road train increases from 10 to 30 km/h, the recovered electrical power increases from 1.17 to 7.94 kW. The use of the results obtained will allow designers to refine similar designs of regenerative electromagnetic shock absorbers at the design stage.

Keywords: *logging truck, regenerative electromagnetic shock absorber, logging road surface, numerical integration, magnetic induction, recovered electrical power, computer program, ring magnets, productivity*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A. (2024). Simulation modeling of the operation of regenerative electromagnetic shock absorbers installed in the suspension of a timber road train. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, №. 2 (54), pp. 260-279 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/15>.

Received 11.04.2024. *Revised* 25.04.2024. *Accepted* 25.04.2024. *Published online* 17.06.2024.

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем лесозаготовительной промышленности, является повышение энергоэффективности процесса вывозки лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом. Известно, что автомобильный транспорт потребляет более 50 % всех производимых нефтепродуктов. Несмотря на это, только 10-16 % энергии топлива расходуется лесовозным автопоездом с двигателем внутреннего сгорания на полезную работу при движении в процессе транспортирования лесоматериалов. Остальная часть энергии – 84-90 %, расходуется на трение и рассеивается в виде тепла в окружающее пространство. При этом около 10 % от этой рассеиваемой энергии расходуется на тепловые потери в подвеске лесовозного автопоезда. Более высокая скорость движения автопоезда, более низкий уровень обустроенности лесовозных дорог сопровождаются возрастанием рассеивания энергии [1].

Подвеска современного лесовозного автопоезда является одним из важнейших узлов ходовой части, от которого зависит управляемость, комфортность, маневренность, а также безопасность движения при вывозке древесины в существующих дорожных условиях. Неустановившиеся режимы движения лесовозного автопоезда сопровождаются возникновением между его поддресоренными и неподдресоренными массами значительных динамических нагрузок, которые за счет демпфирующих свойств и жесткости подвески преобразуются из кинетической энергии колебаний массы в энергию тепла, которая через детали подвески непроизводительно рассеивается в окружающую среду. Такую рассеиваемую энергию целесообразно преобразовывать, накапливать и полезно использовать в технологическом оборудовании автопоезда, а также для питания приборов и систем лесовозного автомобиля-тягача. Это позволит сократить расход топлива автопоездом на 5-6 % при вывозке лесоматериалов, и, как следствие снизить транспортные расходы, от которых зависит конечная стоимость вывозимых лесоматериалов [2-8].

Исследованием вопросов рекуперации энергии в подвесках автомобильных транспортных средств в настоящее время занято большое количество, как российских, так и зарубежных ученых.

Внимание многих этих ученых направлено на разработку перспективных рекуперативных электромагнитных амортизаторов, которые не только обладают демпфирующими свойствами для гашения колебаний возникающих при движении автомобильных транспортных средств в условиях недостаточно обустроенных дорог, но и возможностью генерирования электрической энергии [9-23].

В статье J. Zhang и др. (2022) [9] предложена, а также исследована на основе математического моделирования устанавливаемая на автомобиле рекуперативная подвеска шарико-винтового типа, использующая в качестве алгоритма активного управления пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор, обладающий высокой надежностью, простотой и стабильным управлением. Подвеска рассматриваемого типа состоит из пружины, демпфера, рекуперативного привода, контроллера, аккумулятора, датчика ускорения кузова, энергерегенеративного двигателя и шарико-винтового механизма. В режиме рекуперации энергии вертикальная вибрация подвески преобразуется во вращательное движение ротора двигателя, генерирующего электроэнергию, накапливаемую в аккумуляторе для дальнейшего полезного использования. Установлено, что с увеличением частоты вибрации подвески происходит возрастание мощности рекуперации электрической энергии. Применение пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора позволяет оптимизировать плавность движения транспортного средства.

G. Ну и др. (2021) [10] в своей работе рассмотрели особенности проектирования магнитоэологических амортизаторов для автомобильных транспортных средств, обладающих в сравнении с обычными гидравлическими амортизаторами лучшими управляемостью и демпфированием, а также обеспечивающих повышение комфорта и ходовых качеств автомобилей. Создаваемая демпфирующая сила исследуемого амортизатора контролируется током возбуждения. Когда амортизатор подвергается воздействию вибрации, возвратно-поступательное движение поршня вызывает изменение объемов в полостях амортизатора и рабочая жидкость перетекает через демпфирующий канал. Катушка возбуждения

равномерно намотана на поршне. При подаче на катушку напряжения, вокруг нее создается магнитное поле, способствующее возникновению реологического эффекта, изменяющего вязкость и предел текучести рабочей жидкости, и, следовательно, давление в полостях амортизатора, тем самым достигая эффекта управления создаваемой демпфирующей силой. Для более точного исследования характеристик демпфирования магнитореологических амортизаторов была разработана имитационная модель мультифизической связи, позволившая выполнить анализ взаимодействия электромагнитного поля, полей потока и структурных напряжений. Результаты моделирования позволили установить, что сила демпфирования составляет 1134,6 Н, регулируемый коэффициент демпфирования – 9,1 при приложенном токе 1,4 А. Кроме этого, выявлено, что сила демпфирования увеличивается с повышением приложенного тока.

Н. Song и др. (2024) [11] в своем исследовании рассмотрели проблему снижения производительности, надежности, а также ухудшения характеристик подвески транспортного средства при использовании в его конструкции рекуперативных амортизаторов с шарико-винтовой передачей. Разработана динамическая модель рекуперативной подвески, позволившая исследовать негативное влияние инерционной массы на изменение характеристик подвески. Установлено, что при вертикальном возвратно-поступательном перемещении подвески вращающиеся детали создают чрезмерный ударный момент, ускоряющий их повреждение и оказывающий негативное воздействие на работу подвески. Предложена усовершенствованная конструкция рекуперативной подвески, позволяющая за счет снижения ускорения подрессоренной массы и более эффективного демпфирования динамических нагрузок улучшить комфорт при вождении и управляемость транспортного средства. Усовершенствование заключается в установке между рекуперативным амортизатором и колесом подавителя высокочастотной вибрации. При движении автомобиля по неровностям дороги, вертикальные колебания подвески при помощи реечной и планетарной передачи преобразуются из механической энергии вибрации в электрическую энергию. Наличие контроллера в

подвеске обеспечивает два режима управления подвеской – режим энергопотребления и режим поглощения энергии.

Y. Jia и др. (2018) [12] в своей статье акцентировали внимание на фундаментальной проблеме всех существующих подходов к рекуперации энергии в подвесках автомобилей, заключающейся в том, что большая часть энергии вибрации по-прежнему рассеивается в окружающее пространство через детали амортизатора. Накопление энергии происходит в основном за счет паразитного демпфирования, составляющего лишь небольшую долю от общего демпфирования пружинного амортизатора. Рассмотрена перспективная рекуперативная подвеска, в конструкции которой используются амортизаторы с постоянными магнитами, обеспечивающие значительное увеличение генерируемой энергии за счет прямого подключения электромагнитного преобразователя в качестве основного демпфера. Установлено, что предлагаемая подвеска может генерировать до 100 кВт энергии при движении автомобиля со скоростью более 105 км/ч по ровной дороге с твердым покрытием, при этом обеспечивая среднее ускорение реакции – $0,315 \text{ м/с}^2$. Нелинейная восстанавливающая сила магнитного амортизатора обеспечивает лучший комфорт и управляемость автомобиля в сравнении с механическими, пневматическими и гидравлическими амортизаторами.

В работе М.-Т. Duong и др. (2018) [13] была рассмотрена проблема недостаточной мощности, генерируемой при движении автомобиля рекуперативной подвеской. На этой основе была предложена и исследована усовершенствованная конструкция рекуперативной подвески, сочетающая в себе механический амортизатор с электрическим генератором. Внешний диаметр амортизатора составлял 110 мм, внутренний – 40 мм, а его длина – 243 мм. Основными недостатками предлагаемого амортизатора являются его высокие сила сцепления и магнитная сила, отрицательно влияющие на безопасность и комфорт движения. Использование такой конструкции позволяет повысить рекуперированную мощность на 59,7 % без изменения габаритных параметров амортизатора. При скорости вибрации 0,25 м/с, максимальная мощность, генерируемая амортизатором, составила 225 Вт.

L. Bowen и др. (2019) [14] исследовали в своей работе потенциал рекуперации энергии двух различных типов ротационных электромагнитных амортизаторов. Первый – амортизатор с шариковинтовой передачей энергии. Второй – амортизатор с кабельным динамическим сбором энергии, который в качестве основного элемента преобразования поступательного перемещения во вращательное движение использует стальной трос и пару шкивов. Разработаны динамические модели для исследуемых типов электромагнитных амортизаторов. Установлено, что при движении автомобиля по дорогам различного уровня обустроенности, рекуперированная мощность изменяется в диапазоне от 400 до 1200 Вт. Использование амортизатора с кабельным динамическим сбором энергии позволяет генерировать на 80-110 % больше энергии в сравнении другим исследуемым амортизатором.

J. Lee и др. (2021) [15] в своей работе исследовали процесс рекуперации энергии в подвеске автомобиля. Основными элементами такой подвески, являлись линейный электромагнитный генератор и синхронный понижающий преобразователь. Генерируемая электроэнергия могла передаваться в аккумулятор, а демпфирующая сила амортизатора регулировалась контролируемым током генератора. Кроме этого, ток батареи может контролироваться синхронным понижающим преобразователем и оказывает влияние на мощность генератора. Демпфирующие силы амортизатора регулируются по мере того, как он продолжает передавать генерируемую мощность. Предложенный алгоритм управления работой рекуперативной подвеской обеспечивает непрерывное питание аккумулятора независимо от положения и скорости генератора. Это устраняет необходимость в дорогостоящих датчиках позиционирования и измерения скорости. Установлено, что в исследуемом диапазоне колебаний, воспринимаемых при движении подвеской автомобиля, значение максимальной мощности генерируемой амортизатором изменяется, в диапазоне от 69 до 225 Вт.

S. Alhumaid и др. (2022) [16] в своей работе изучили возможность рекуперации энергии колебаний подвески путем использования амортизаторов с пьезоэлектрическими и электромагнитными преобразователями. Предложено пьезоэлектрическое

устройство позволяющее преобразовывать механическую энергию в полезную электрическую энергию. Пьезоэлектрические диски установлены между магнитными пластинами и внутренней поверхностью кольца статора. Пьезоэлектрическое устройство приводится в движение однонаправленным амортизатором, включающим вращательный механизм, состоящий из пары реек и шестерен. При вращении встроенные в амортизатор пьезоэлектрические элементы возбуждаются силами магнитного отталкивания или притяжения. Рассматриваемое пьезоэлектрическое устройство обладает прочной конструкцией, а также может надежно работать в широком диапазоне частот. Установлено, что исследуемая рекуперативная подвеска способна вырабатывать высокие и относительно устойчивые значения напряжений холостого хода независимо от частот возбуждения.

U. Jamolov и др. (2022) [17] в своей статье представили методологию проектирования узлов автомобилей методом конечных элементов, которую можно применять для усовершенствования и оптимизации рекуперативных электромагнитных амортизаторов подвески транспортного средства. Предлагаемый амортизатор имеет переменную, надежную демпфирующую силу, а электрическая энергия преимущественно регенерируется на высоких частотах подвески. Сравнение динамических характеристик автомобилей с предлагаемыми электромагнитными амортизаторами и с традиционными гидравлическими амортизаторами показало, что в исследуемом диапазоне скоростей индекс комфортности не изменился, индекс сцепления колес с дорогой ухудшился по причине более низкого коэффициента демпфирования. Регенеративный амортизатор может генерировать непрерывную мощность 15 Вт при движении автомобиля по ровной дороге со скоростью 35 км/ч, а также безопасно работать при неисправности электронной схемы, обеспечивая демпфирование колебаний в условиях короткого замыкания. Предлагаемый рекуперативный амортизатор в сравнении с традиционным гидравлическим амортизатором, является экологически безопаснее, а также предотвращает образование побочных продуктов при попадании рабочей жидкости в окружающее пространство.

J. A. Reyes-Avendano и др. (2021) [18] в своей работе рассмотрели вопрос о безопасности замены традиционных гидравлических амортизаторов в подвеске автомобиля рекуперативными амортизаторами с шарико-винтовыми передачами, обеспечивающими аналогичные характеристики демпфирования, а также возможность восстановления части энергии, непроизводительно рассеиваемой в окружающее пространство. Предложена конструкция рекуперативного амортизатора с механическим линейным приводом, позволяющая функционально воспроизводить динамическое поведение пассивного амортизатора за счет возможности активного воздействия на его рабочие параметры изменением сопротивления нагрузки.

J. Huang и др. (2020) [19] исследовали в своей статье магнитореологическую регенеративную систему подвески автомобиля, обеспечивающую при его движении в различных дорожных условиях улучшение комплексных характеристик подвески, а также эффективное восстановление и последующее использование потенциальной энергии вибрации. Такая подвеска обладает простой конструкцией, низким энергопотреблением, а также адаптируема к различным изменяющимся дорожным условиям. Разработана модель регенеративной системы подвески, оснащенной амортизаторами с трубчатым линейным двигателем на постоянных магнитах. Результаты моделирования показывают, что система регенеративной подвески с улучшенным управлением отвечает требованиям естественной резонансной частоты подвески транспортного средства, эффективно повышает комфорт вождения, а также обладает значительной регенеративной способностью.

A. Casavola и др. (2020) [20] в своей работе основное внимание уделили гибким многоцелевым стратегиям проектирования систем управления, позволяющим найти оптимальное решение между обычными показателями управляемости на дороге, комфортом езды, а также количеством генерируемой энергии. Предложена электромеханическая рекуперативная система подвески автомобиля, в которой каждый амортизатор оснащен линейным электродвигателем с активным управлением. Установлено, что активное управление рекуперативной подвеской автомобиля обеспечивает большее количество генерируемой энергии при идентичных требованиях к комфорту езды.

R. Zhang и др. (2018) [21] в своей статье разработали классификацию и выполнили оценку современных технологий регенеративных амортизаторов. Существующие технологии, используемые в регенеративных системах амортизатора, были подразделены на три типа в зависимости от механизмов преобразования: прямой привод, непрямой привод и гибридный привод. Ограничением использования регенеративных амортизаторов с прямым приводом является их массово-габаритные параметры. Основным ограничением регенеративного амортизатора с непрямым приводом является сложность механизма преобразования движения, оказывающая влияние на динамику движения автомобиля и на ухудшение управляемости. Установлено, что потенциал преобразования энергии колебаний подвески в электрическую энергию рекуперативным амортизатором позволяет существенно снизить расход топлива автомобильным транспортным средством. При рациональной системе управления достигаются оптимальные параметры динамических характеристик автомобиля и рекуперации электрической энергии амортизатором. Повышение эффективности рекуперативных амортизаторов достигается использованием магнитов и катушек больших размеров, а также осуществлением ими демпфирования, как на фазе сжатия, так и расширения при движении амортизатора.

X. Hu и др. (2019) [22] в своей работе выполнили оценку потенциала снижения вредных выбросов при движении автомобиля, оснащенного рекуперативной подвеской, генерируемой и накапливаемой в аккумуляторе электрической энергии. На основе разработанной модели получена связь между параметрами управления рекуперативной подвеской и образующимися в процессе движения автомобиля вредными выбросами. Для достижения наилучшей эффективности между динамическими характеристиками и экологическими показателями предложены два набора оптимальных параметров управления, а также рекомендации их использования в процессе эксплуатации автомобиля. Установлено, что рекуперативная подвеска дает возможность снизить количество вредных выбросов на 4,5 % от общего объема выбросов автомобилем при движении по обустроенной ровной дороге. Также выявлено, что с ухудшением уровня обустроенности дороги количество вредных выбросов значительно сокращается.

Ф. Коу и др. (2018) [23] исследовали с целью согласования характеристик демпфирования с параметрами рекуперации энергии предложенную конструкцию полуактивной рекуперативной подвески автомобиля с электрогидравлическим приводом. Установлено, что при подаче синусоидального сигнала с частотой 2 Гц и амплитудой 30 мм среднеквадратическое значение ускорения массы амортизатора оптимизированной полуактивной рекуперативной подвески снижается на 22,23 %, а рекуперативная мощность возрастает на 40,51 % при удовлетворении требований, предъявляемых к комфортности, устойчивости и безопасности движения автомобиля.

Приведенный выше анализ научных работ дает возможность сделать вывод, что потенциал современных разработок в области рекуперации энергии различными по конструкции амортизаторами, является достаточно значительным. Их практическое применение способствует снижению расхода топлива за счет генерирования электрической энергии, оптимизировать плавность движения, повысить комфортность, улучшить управляемость и ходовые качества автомобиля, изменять демпфирующие характеристики в зависимости от дорожных условий, а также снизить количество вредных выбросов при движении автомобиля. Несмотря на это, при проектировании таких амортизаторов, все еще возникают проблемные вопросы, направленные на: повышение эффективности генерирования электрической энергии такими амортизаторами; достижение совместимости применения с различными моделями автомобилей; уменьшение массовых и габаритных параметров; повышение коэффициента полезного использования; снижение стоимости изготовления; упрощение сложности конструкции; обеспечение более плавной работы; повышение надежности работы [24].

Результаты исследований, выполненные ранее, позволили предложить перспективные конструкции подвесок для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом, оснащенных электромагнитными амортизаторами (рис. 1). Устанавливаемые в подвеске автопоезда рекуперативные электромагнитные амортизаторы на постоянных магнитах обладают высокой надежностью, а также увеличенной

производительностью генерирования электрической энергии. При неустановившихся режимах движения лесовозного автопоезда, в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог, закрепленные на подвеске автопоезда рекуперативные амортизаторы совершают возвратно-поступательные перемещения в вертикальной плоскости. Это сопровождается генерированием электрической энергии, ее накоплением в аккумуляторной батарее с последующим полезным использованием для питания приборов и систем лесовозного автомобиля-тягача [25].

Целью работы является повышение энергоэффективности лесовозного автопоезда, за счет использования в его подвеске разработанных рекуперативных электромагнитных амортизаторов, обеспечивающих повышения производительности генерирования электрической энергии. Цель работы достигается за счет применения имитационного моделирования, позволяющего исследовать работу рекуперативных электромагнитных амортизаторов, установленных в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объектом исследования в данной работе является процесс генерирования электрической энергии рекуперативными амортизаторами, установленными в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом.

В качестве предмета исследования выступают закономерности влияния конструктивных параметров исследуемых рекуперативных электромагнитных амортизаторов, параметров опорной поверхности лесовозной дороги и условий движения лесовозного автопоезда на показатели эффективности функционирования рекуперативной подвески лесовозного автомобиля-тягача с прицепом.

Дизайн эксперимента или сбор данных

Для оценки эффективности предлагаемой конструкции рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах разработана математическая модель. Подсистема, описывающая движение автопоезда по поверхности лесовозной дороги с изменяющимися в широком диапазоне параметрами ее обустроенности аналогична подсистеме математической модели, разработанной авторами ранее в работе [3].

В рамках этой математической модели автопоезд представлен как два перемещающихся в трех-

мерном пространстве абсолютно твердых тела, контактирующих с поверхностью дороги упруго-вязким взаимодействием (рис. 2).

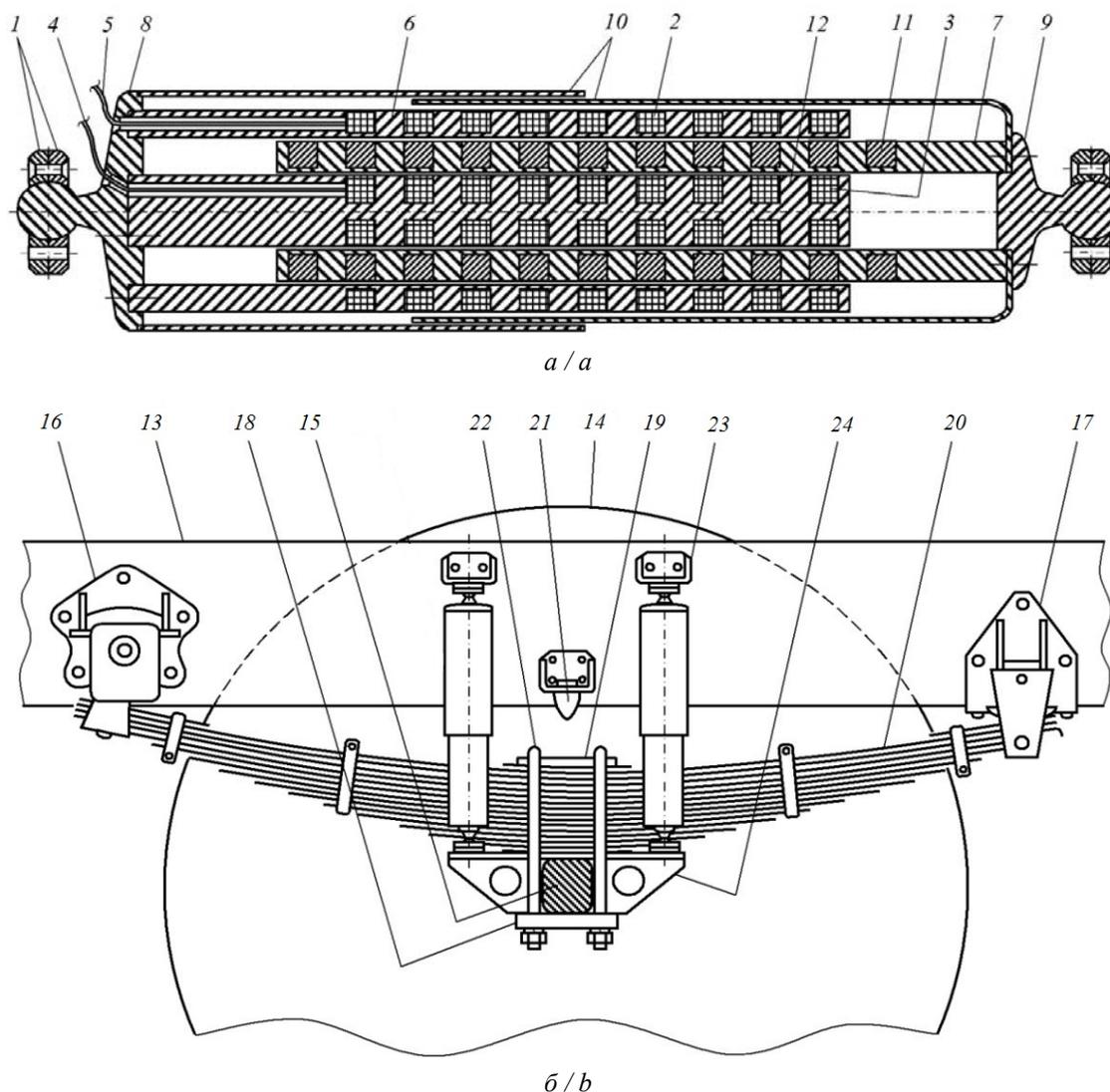


Рисунок 1. Перспективная конструкция подвески лесовозного автомобиля-тягача с прицепом, оснащенная электромагнитными амортизаторами: *a* – схема электромагнитного амортизатора; *б* – схема размещения амортизаторов в подвеске лесовозного автопоезда; 1 – фланцы; 2, 3 – внешняя и внутренняя обмотки; 4, 5 – выводы внутренних и внешних обмоток; 6, 7 – неподвижный и подвижный цилиндры; 8, 9 – крышки; 10 – защитные кожухи; 11 – постоянный кольцевой магнит; 12 – стержень; 13 – рама лесовозного автопоезда; 14 – колесо; 15 – балка моста; 16, 17 – передний и задний кронштейны рессоры; 18, 19 – накладки; 20 – рессора; 21 – буфер; 22 – стремянка; 23, 24 – верхний и нижний кронштейны крепления электромагнитного амортизатора

Figure 1. A promising suspension design for a timber tractor-trailer equipped with electromagnetic shock absorbers: *a* – diagram of an electromagnetic shock absorber; *b* – arrangement of shock absorbers in the suspension logging road train; 1 – flanges; 2, 3 – external and internal windings; 4, 5 – conclusions of internal and external windings; 6, 7 – show fixed and movable cylinders; 8, 9 – covers; 10 – protective casings; 11 – permanenta ring magnet; 12 – rod; 13 – frame of the timber truck train; 14 – wheel ;15 – axle beam; 16, 17 – front and rear spring brackets; 18, 19 – pads; 20 – spring; 21 – buffer; 22 – stepladder; 23, 24 – upper and lower brackets of electromagnetic shock-absorber attachment

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

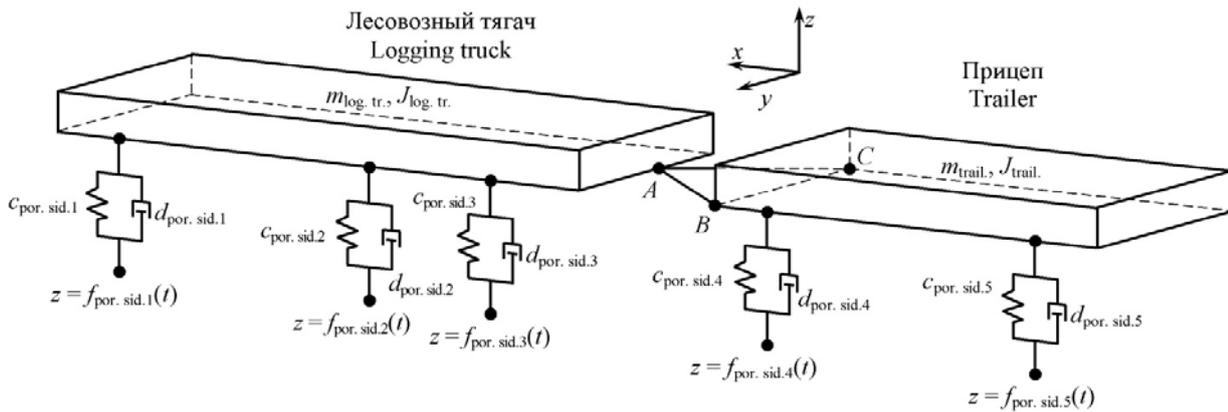


Рисунок 2. Расчетная схема автопоезда, звенья которого оснащены рекуперативными электромагнитными амортизаторами на постоянных магнитах

Figure 2. Design diagram of a timber tractor-trailer with a trailer, equipped with regenerative electromagnetic shock absorbers

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

При моделировании работы рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах использовался численный сеточный метод, при котором на сетке размером 200×200 узлов распределяли кольцевые магниты, каждый из которых в осевом сечении задавался двумя прямоугольниками (рис. 3).

Для расчета поля вектора магнитной индукции используется предположение, что в каждом узле (i, j) сетки, принадлежащей магниту, течет элементарный ток I_{ij} в перпендикулярном к плоскости моделирования направлении. В этом случае расчет поля вектора магнитной индукции (B_{ix}, B_{iy}) производится в приближении бесконечного прямолинейного проводника:

$$\begin{cases} B_{ix} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^{200} \sum_{p=1}^{200} \frac{M_{kp}}{(i-k)^2 + (j-p)^2} (p-j); \\ B_{iy} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^{200} \sum_{p=1}^{200} \frac{M_{kp}}{(i-k)^2 + (j-p)^2} (i-k), \end{cases} \quad (1)$$

где i, j – индексы узла, в которых рассчитываются компоненты B_{ix}, B_{iy} вектора магнитной индукции; μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл·м/А); I_0 – элементарный ток области магнита, принадлежащей одному узлу; k, p – индексы суммирования по всем узлам сетки; M_{kp} – матрица размером 200×200 , содержащая информацию о магните, элементы которой могут принимать три значения: 0, если в данном узле нет магнита, 1 или -1, если в данном узле есть

магнит, и элементарный ток направлен в одну или другую сторону.

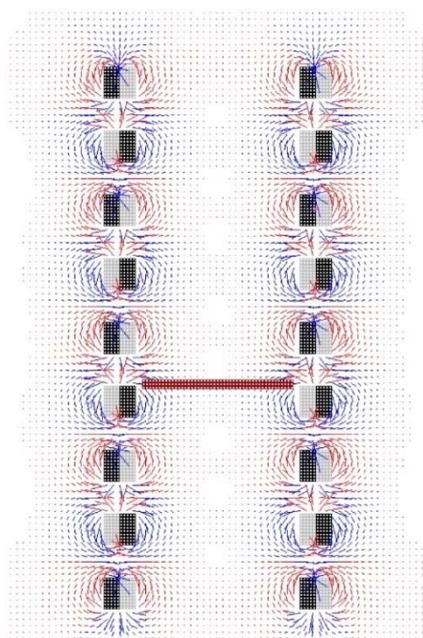


Рисунок 3. Представление в разработанной модели кольцевых магнитов, магнитного поля и единичного витка обмотки

Figure 3. Representation in the developed models of ring magnets, magnetic field and single winding turn

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

После расчета магнитного поля в модели имитируется движение одного витка обмотки вдоль оси магнита и оценивается электродвижущая сила индукции ε по закону Фарадея:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

где Φ – магнитный поток через виток обмотки; t – время.

С учетом численного метода расчета формула Фарадея записывается следующим образом:

$$\varepsilon_j = \frac{v}{d} \cdot k_{II} \cdot \sum_{i=100-R}^{100+R} (|i-100| (B_{ijy} - B_{i,j-1,y})), \quad (3)$$

где ε_i – зависимость электродвижущей силы от продольной осевой координаты рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах; v – скорость движения витка в осевом направлении; d – шаг сетки; k_{II} – коэффициент пропорциональности; R – радиус витка, выраженный в целом количестве узлов сетки; $i = 100$ – положение оси рекуперативного амортизатора.

Разработанная модель позволила исследовать зависимость электродвижущей силы от времени $\varepsilon(t)$ при движении единичного витка обмотки вдоль оси рекуперативного амортизатора (рис. 4). На основе сравнительного анализа зависимостей $\varepsilon(t)$ были выбраны оптимальное количество, полярность и геометрические параметры кольцевых магнитов.

Основная характеристика предлагаемых рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах, рассчитываемая при проведении компьютерных экспериментов должна позволять оценивать эффективность процесса преобразования и накопления энергии. В этой связи, в качестве такой характеристики принималась рекуперированная электрическая мощность.

На каждом шаге численного интегрирования расчет значения рекуперированной мощности $P_{rec. el. pow.}$ выполнялся следующим образом:

$$P_{rec. el. pow.}(t) = \frac{U_{rec.}}{R_{load}}, \quad (4)$$

где $U_{rec.}$ – напряжение, создаваемое системой

рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах; R_{load} – электрическое сопротивление нагрузки, включенной в сеть, либо внутреннее сопротивление аккумулятора при накоплении энергии.

Зная электродвижущую силу индукции ε и суммарное сопротивление обмоток и нагрузки R , мгновенная мощность рекуперативного электромагнитного амортизатора, определялась по формуле:

$$P_{aver.}(t) = \frac{(\varepsilon(t) - U)^2}{R}, \quad (5)$$

где U – плавающий средний уровень напряжения, обеспечиваемый RC-фильтром.

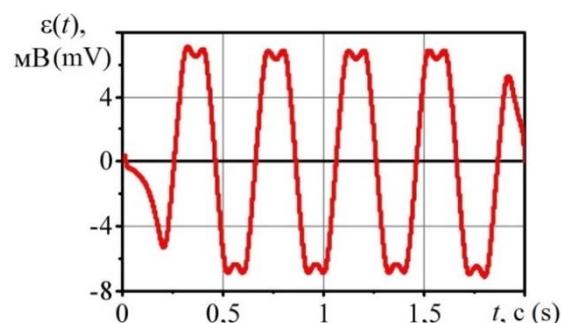


Рисунок 4. Зависимость электродвижущей силы от времени $\varepsilon(t)$ при движении одного витка обмотки вдоль системы из восьми кольцевых магнитов с чередующейся полярностью

Figure 4. Dependence of electromotive force on time $\varepsilon(t)$ at movement of one winding turn along the system of eight ring magnets with alternating polarity

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Для исследования математической модели разработана программа для ЭВМ, позволяющая имитировать работу рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах, установленных в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом. Интерфейсная формы вывода результатов моделирования на экран компьютера, приведена на рис. 5.

При исследовании разработанной модели варьировали более 10 основными параметрами модели, и контролировали эффективность системы рекуперации по одному выходному показателю (рис. 6).

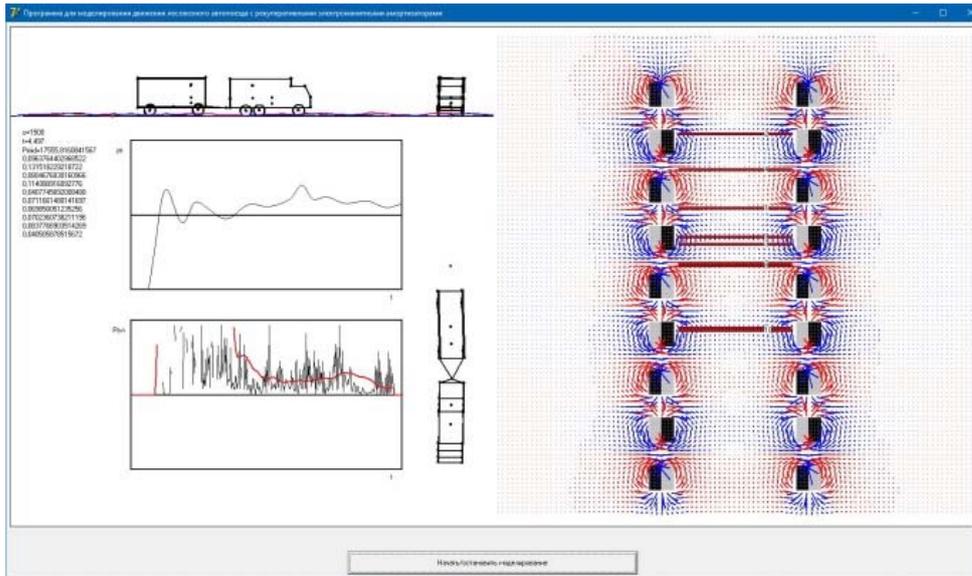


Рисунок 5. Интерфейсная формы вывода результатов моделирования на экран компьютера

Figure 5. Interface form for displaying simulation results on the computer screen

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

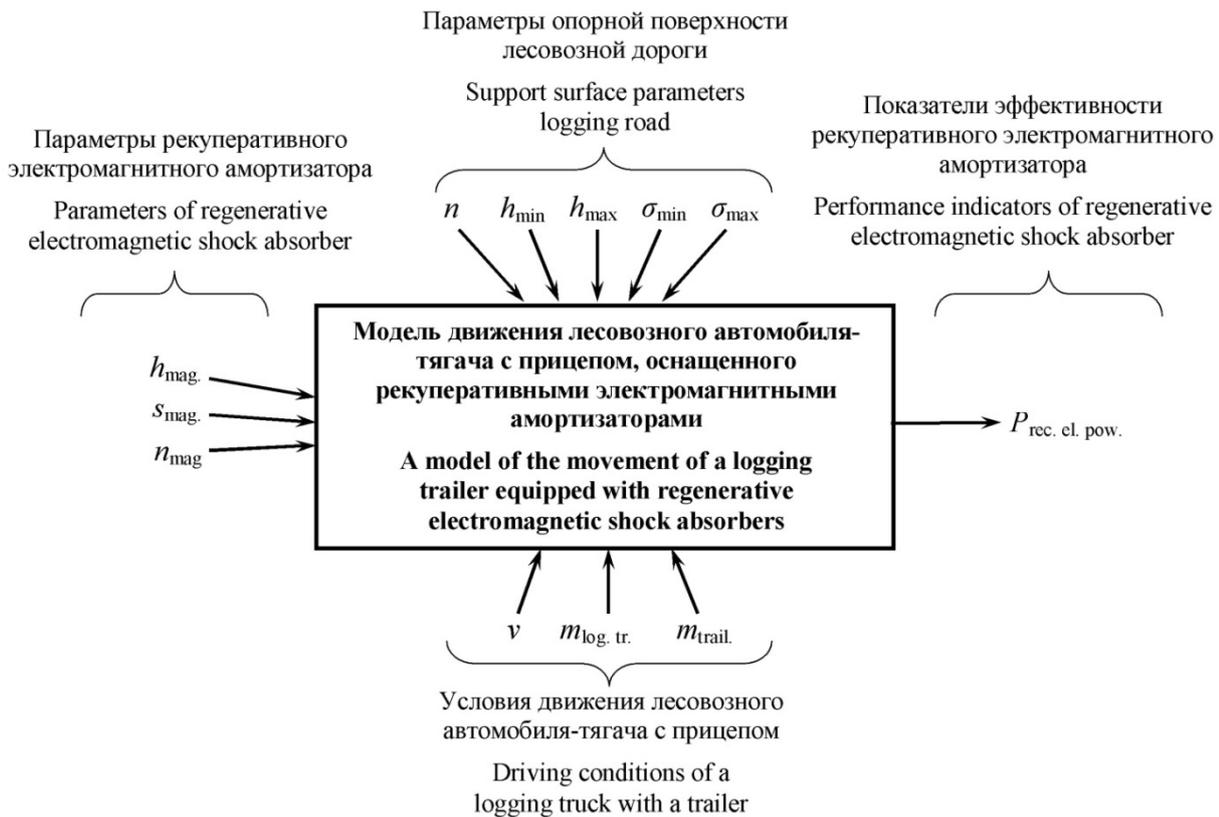


Рисунок 6. Входные и выходные параметры модели

Figure 6. Model input and output parameters

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Все исследуемые входные параметры разделены на три группы. Первая группа – h_{mag} – высота кольцевых постоянных магнитов; s_{mag} – расстояние между кольцевыми постоянными магнитами при их последовательной установке в амортизаторе; n_{mag} – количество кольцевых магнитов. Вторая группа – $m_{\text{log.tr.}}$ – масса лесовозного автомобиля-тягача; m_{trail} – масса прицепа. Третья группа: n – линейная плотность неровностей, имеющих на лесовозной дороге; h_{min} и h_{max} – минимальная и максимальная высоты неровностей; σ_{min} и σ_{max} – мини-

мальная и максимальная длины неровностей. Эффективность рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах оценивается значением рекуперированной электрической мощности $P_{\text{rec. el. pow.}}$.

Результаты

В компьютерных экспериментах изменяли значение высоты h_{mag} кольцевых магнитов на уровнях 20, 30, 40 мм и расстояние между магнитами s_{mag} на уровнях 0, 15, 30 мм (рис. 7). Обнаружено, что наиболее оптимальными являются параметры $h_{\text{mag}} = 20$ мм, $s_{\text{mag}} = 15$ мм.

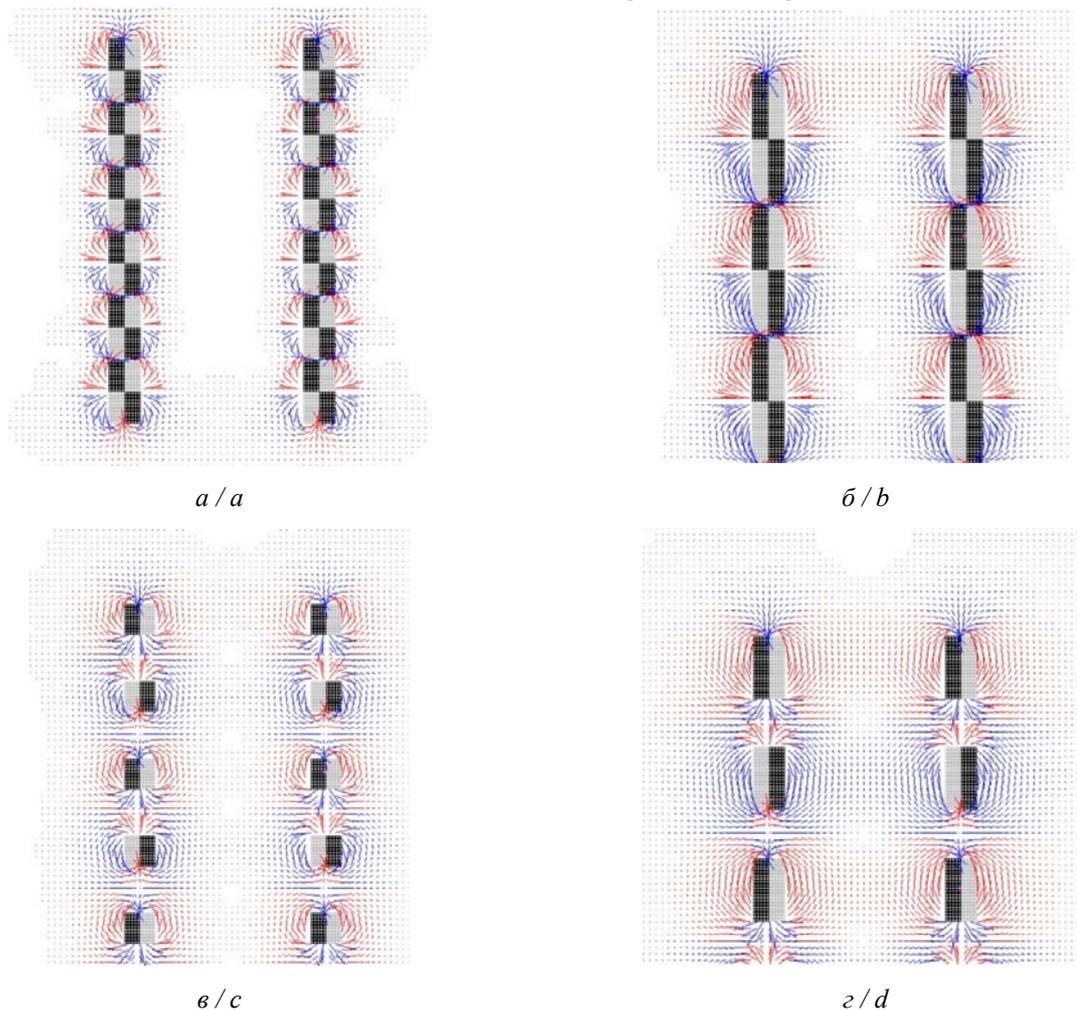


Рисунок 7. Исследуемые наборы кольцевых постоянных магнитов рекуперативного электромагнитного амортизатора: $a - h_{\text{mag}} = 20$ мм, $s_{\text{mag}} = 0$ мм; $б - h_{\text{mag}} = 40$ мм, $s_{\text{mag}} = 0$ мм; $в - h_{\text{mag}} = 20$ мм, $s_{\text{mag}} = 30$ мм; $г - h_{\text{mag}} = 40$ мм, $s_{\text{mag}} = 30$ мм

Figure 7. The studied sets of ring permanent magnets of a regenerative electromagnetic shock absorber: $a - h_{\text{mag}} = 20$ мм, $s_{\text{mag}} = 0$ мм; $b - h_{\text{mag}} = 40$ мм, $s_{\text{mag}} = 0$ мм; $c - h_{\text{mag}} = 20$ мм, $s_{\text{mag}} = 30$ мм; $d - h_{\text{mag}} = 40$ мм, $s_{\text{mag}} = 30$ мм

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

В процессе неустановившегося движения автопоезда по неровностям поверхности лесовозной дороги шток в рекуперативном электромагнитном амортизаторе совершает случайные возвратно-поступательные движения (рис. 8, а). Для исследования колебаний штока в рекуперативном амортизаторе использовали разработанную ранее модель движения автопоезда по опорной поверхности дороги. При движении штока в рекуперативном амортизаторе шесть его обмоток перемешались относительно восьми кольцевых постоянных магнитов, что способствовало возникновению всплесков электродвижущей силы индукции (рис. 8, б).

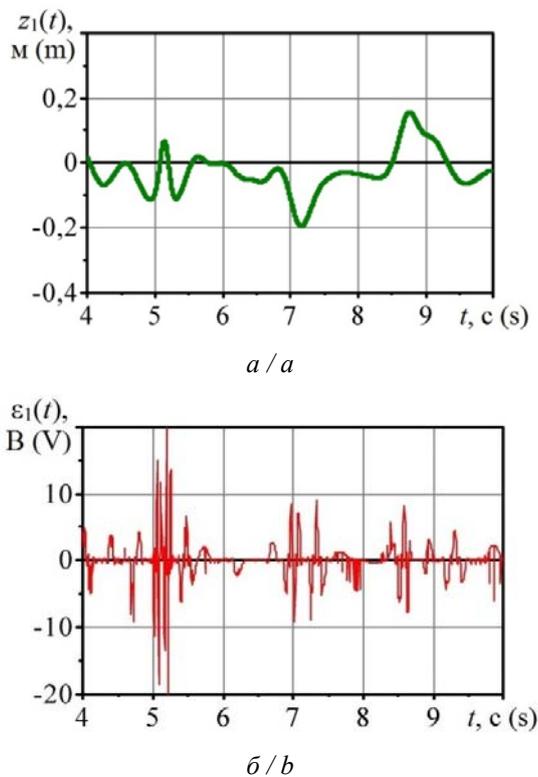


Рисунок 8. Зависимость от времени t координаты штока внутри одного рекуперативного электромагнитного амортизатора $z_1(t) - a$ и электродвижущей силы индукции в данном амортизаторе $\varepsilon_1(t) - б$

Figure 8. Dependence on time t of rod coordinate inside one regenerative electromagnetic shock absorber $z_1(t) - a$ and electromotive force of induction in this shock absorber $\varepsilon_1(t) - b$

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

На полученной зависимости $P_1(t)$ одного рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах можно выделить множество пиков длительностью порядка 0,02 с (рис. 9, а).

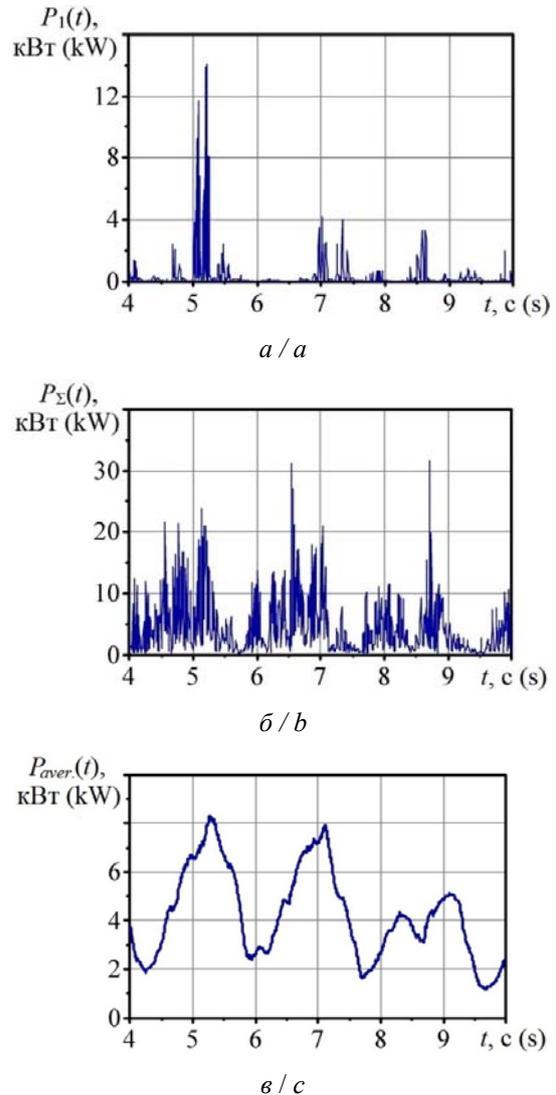


Рисунок 9. Зависимость изменения от времени t значения электрической мощности, вырабатываемой одним рекуперативным амортизаторами $P_1(t) - a$, десятью амортизаторами $P_\Sigma(t) - б$ и электрической мощности после сглаживания RC -фильтром $P_{aver}(t) - в$

Figure 9. Change versus time t electric power values, generated by one regenerative shock absorbers $P_1(t) - a$, ten shock absorbers $P_\Sigma(t) - б$ and electric power downstream smoothing by RC -filter $P_{aver}(t) - в$

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

При одновременном потреблении мощности от шести рекуперативных амортизаторов зависимость мгновенной мощности от времени представляет собой множество узких пиков (рис. 9, б). Для сглаживания генерируемой электрической мощности может быть использован дополнительный RC-фильтр, на выходе которого получается мощность 4,2 кВт (рис. 9, в).

С увеличением высоты неровностей h_{unev} опорной поверхности лесовозной дороги возрастает амплитуда перемещения обмоток рекуперативного электромагнитного амортизатора относительно постоянных магнитов. Это приводит к более интенсивному изменению магнитного потока через катушки, и соответственно к увеличению электродвижущей силы и генерируемой амортизатором электрической мощности. Для изучения влияния средней высоты неровностей h_{unev} опорной поверхности лесовозной дороги проведена серия из 11 компьютерных экспериментов, в которых высота неровностей h_{unev} варьировалась в диапазоне от 0 до 1 м с шагом 0,1 м. Скорость лесовозного автопоезда при этом была постоянной, и составляла 20 км/ч.

Выявлено, что с увеличением высоты неровностей h_{unev} на поверхности моделируемой дороги графики $P_{\text{aver.}}(t)$ изменяются по абсолютной величине, но практически не изменяются по форме (рис. 10).

Зависимость изменения рекуперированной электрической мощности $P_{\text{rec. el. pow.}}$ от высоты неровностей h_{unev} опорной поверхности является практически линейной: при изменении высоты неровностей h_{unev} от 0,1 до 0,9 м рекуперированная электрическая мощность $P_{\text{rec. el. pow.}}$ увеличивается с 0,34 до 10,5 кВт (рис. 11, а). При движении лесовозного автопоезда со скоростью 20 км/ч по неровностям опорной поверхности малой высоты $h_{\text{unev}} = 0 \dots 0,2$ м, рекуперативные электромагнитные амортизаторы позволяют генерировать ограниченную мощность $P_{\text{rec. el. pow.}}$, не превышающую 1,35 кВт. При высоте неровностей h_{unev} опорной поверхности лесовозной дороги – 0,4 ... 0,6 м рекуперативные амортизаторы позволяют генерировать мощность $P_{\text{rec. el. pow.}}$ в диапазоне от 4,2 до 6,8 кВт.

При увеличении скорости движения v лесовозного автомобиля-тягача с прицепом можно ожидать

увеличения частоты колебательных перемещений обмоток относительно постоянных магнитов.

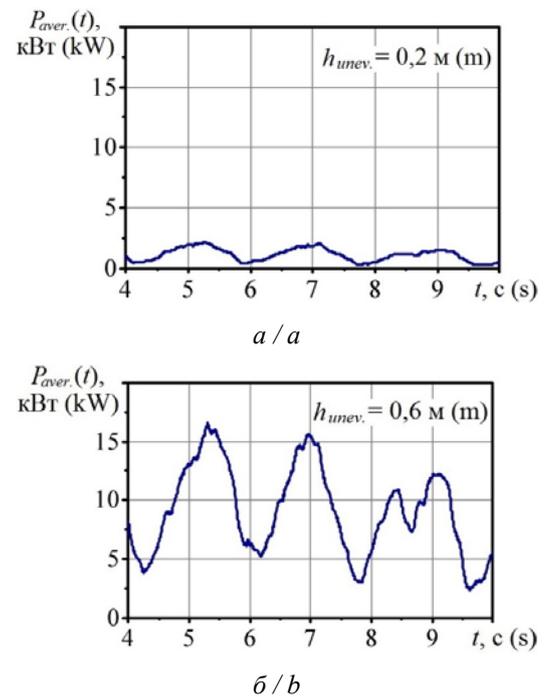


Рисунок 10. Зависимости от времени t суммарной электрической мощности после сглаживания RC-фильтром $P_{\text{aver.}}(t)$ для случаев средней высоты неровностей 0,2 м – а и 0,6 м – б
Figure 10. Dependences of the total electrical power on time t after smoothing with an RC filter $P_{\text{aver.}}(t)$ for cases of average height of irregularities of 0.2 m – a and 0.6 m – b

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Это приводит к увеличению скорости изменения магнитного потока через обмотки, и к росту генерируемой электродвижущей силы и, соответственно, электрической мощности $P_{\text{rec. el. pow.}}$. Для изучения влияния скорости v движения автопоезда производили ее изменение от 0 до 50 км/ч с шагом 5 км/ч. При этом средняя высота неровностей h_{unev} составляла 0,4 м.

Обсуждение

Обнаружено, что зависимость рекуперированной электрической мощности $P_{\text{rec. el. pow.}}$ при увеличении скорости v движения автопоезда носит квадратичный характер (рис. 11, б). При увеличении скорости v движения от 10 до 30 км/ч рекуперированная

электрическая мощность $P_{rec. el. pow.}$ существенно возрастает с 1,17 до 7,94 кВт.

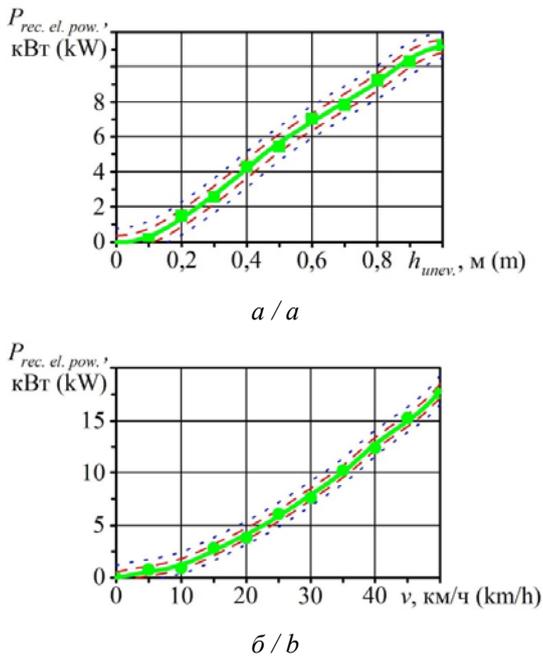


Рисунок 11. Зависимости средней рекуперированной мощности $P_{rec.el.pow.}$ от средней высоты неровностей h_{unev} – а и от скорости движения автопоезда v – б

Figure 11. $P_{rec.el.pow.}$ average recoverable capacity from the average height of the irregularities h_{unev} – а and from the speed of the road train v – б

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Установлено, что эффективность при работе исследуемых рекуперативных амортизаторов достигается при движении автопоезда при диапазоне скоростей от 20 до 30 км/ч. При этом генерируемая амортизаторами рекуперированная электрическая мощность $P_{rec. el. pow.}$ изменяется в диапазоне от 4,2 до 7,94 кВт.

Проведенная работа вносит значительный вклад в разработку рекуперативных подвесок применительно к традиционным, гибридным автомобильным транспортным средствам, а также к электромобилям. Последующее исследование будет учитывать влияние на изменение рекуперированной мощности движения лесовозного автопоезда при прохождении поворотов, с ускорениями, торможениями. Кроме этого, исследование будет включать экспериментальную проверку полученных на основе компьютерных экспериментов зависимостей.

Выводы

Проведенный анализ опубликованных российских и зарубежными исследователями научных статей позволяет сделать вывод, что потенциал современных разработок в области рекуперации электрической энергии различными по конструкции амортизаторами, является достаточно значительным. Несмотря на это, при проектировании таких амортизаторов, все еще возникают проблемные вопросы, решение которых направлено на: повышение эффективности генерирования электрической энергии; достижение совместимости применения с различными моделями автомобилей; уменьшение массовых и габаритных параметров; повышение коэффициента полезного использования; снижение стоимости изготовления; упрощение сложности конструкции; обеспечение их более плавной работы; повышение надежности работы. Для повышения надежности работы рекуперативных амортизаторов, а также увеличения производительности генерирования ими электрической энергии, предложена перспективная конструкция рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах.

Для исследования математической модели разработана программа для ЭВМ, позволяющая имитировать работу рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах, установленных в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом. Зависимости средней рекуперированной мощности при увеличении высоты неровностей и повышении скорости движения автопоезда получены на основании аппроксимации методом наименьших квадратов полиномом второго порядка. При этом статистическая достоверность границ доверительного интервала составила 0,95, а статистическая надежность границ интервала прогнозирования – 0,95.

Установлено, что при движении лесовозного автомобиля-тягача с прицепом со скоростью 20 км/ч по случайной неровной опорной поверхности лесовозной дороги рекуперативные амортизаторы генерируют 4,2 кВт электрической мощности. Полученная зависимость рекуперированной мощности от высоты неровностей опорной поверхности является практически линейной: при изменении высоты не-

ровностей от 0,1 до 0,9 м рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 0,34 до 10,5 кВт.

При движении лесовозного автопоезда со скоростью 20 км/ч по неровностям опорной поверхности малой высоты – 0 ... 0,2 м, рекуперативные электромагнитные амортизаторы позволяют генерировать ограниченную мощность, не превышающую 1,35 кВт. При высоте неровностей опорной поверхности – 0,4 ... 0,6 м рекуперативные амортизаторы позволяют генерировать мощность в диапазоне от 4,2 до 6,8 кВт.

Также выявлено, что зависимость рекуперированной электрической мощности от скорости движения лесовозного автопоезда носит квадратичный

характер. При увеличении скорости движения от 10 до 30 км/ч рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 1,17 до 7,94 кВт. Достижение эффективной работы исследуемых амортизаторов происходит только, начиная со скорости движения лесовозного автомобиля-тягача с прицепом от 20 до 30 км/ч. При этом генерируемая амортизаторами рекуперированная электрическая мощность изменяется в диапазоне от 4,2 до 7,94 кВт.

Список литературы

1. Посметьев, В. И. Оценка актуальности использования рекуперативной подвески с линейным электромагнитным генератором в конструкции лесовозного автомобиля / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. А. Зеликов // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – Т. 2, № 2 (40). – С. 50-63. – Библиогр. : с. 60-61 (27 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-50-63>
2. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 162-179. – Библиогр. : с. 176-177 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>
3. Посметьев, В. И. Обоснование целесообразности оснащения лесовозных автопоездов рекуперативными тягово-сцепными устройствами по результатам имитационного моделирования : монография / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2023. – 204 с. – Библиогр. : с. 185-203 (141 назв.). URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61082376>.
4. Оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. Ю. Мануковский, В. В. Посметьев, А. В. Авдюхин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 3(393). – С. 126-139. – Библиогр. : с. 137-139 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-126-139>.
5. Борисов, В. А. Некоторые вопросы прочности сцепки тягача и полуприцепа-ропуса лесовозного автопоезда / В. А. Борисов, Д. В. Акинин, В. В. Никитин // Resources and Technology. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 12-23. – Библиогр. : с. 21-22 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4702>.
6. Верификация экспериментами моделей скорости движения лесовозов в зависимости от природно-производственных факторов / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, П. М. Мазуркин, Н. А. Брагина // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 108-115. – Библиогр. : с. 113 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-108-115>.
7. Мазуркин, П. М. Рейтинги групп факторов вывозки сортиментов / П. М. Мазуркин, А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников // Resources and Technology. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 37-52. – Библиогр. : с. 50-51 (12 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5803>.
8. Мохирев, А. П. Закономерности ранговых распределений факторов вывозки древесины с лесных участков / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, П. М. Мазуркин // Лесной вестник / Forestry Bulletin, – 2021. – Т. 25, № 4. С. 112-120. – Библиогр. : с. 117-118 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-112-120>.

9. Fractional Order PID Control Based on Ball Screw Energy Regenerative Active Suspension / Zhang J., Liu J., Liu B., Li M. // *Actuators*. 2022, 11(7), 189. – Bibliogr. : pp. 22-23 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/act11070189> (SNIP 0,975).
10. Damping Performance Analysis of Magnetorheological Damper Based on Multiphysics Coupling / Hu G., Wu L., Deng Y., Yu L., Luo B. // *Actuators*, 2021; 10(8), 176. – *Bibliogr.* : pp. 22-23 (30 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/act10080176> (SNIP 0,975)
11. Song H. Research on Inertial Force Attenuation Structure and Semi-Active Control of Regenerative Suspension / Song H., Dong M., Wang X. // *Applied Sciences*, 2024, 14(6), 2314. – *Bibliogr.* : pp. 19-20 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062314> (SNIP 0,573).
12. Jia Y. An Analytical and Numerical Study of Magnetic Spring Suspension with Energy Recovery Capabilities / Jia Y., Li S., Shi Y. // *Energies*, 2018, 11(11), 3126. – *Bibliogr.* : pp. 14-15 (35 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113126> (SNIP 1,025).
13. Duong M.-T. Design of a High-Performance 16-Slot 8-Pole Electromagnetic Shock Absorber Using a Novel Permanent Magnet Structure / Duong M.-T., Chun Y.-D., Hong D.-K. // *Energies*, 2018, 11(12), 3352. – *Bibliogr.* : pp. 11-12 (25 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11123352> (SNIP 1,025).
14. Bowen L. Design and Potential Power Recovery of Two Types of Energy Harvesting Shock Absorbers / Bowen L., Vinolas J., Olazagoitia J. L. // *Energies*, 2019, 12(24), 4710. – *Bibliogr.* : pp. 17-19 (42 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en12244710> (SNIP 1,025).
15. An Energy-Harvesting System Using MPPT at Shock Absorber for Electric Vehicles / Lee J., Chun Y., Kim J., Park B. // *Energies*, 2021, 14(9), 2552. – *Bibliogr.* : pp. 12-14 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092552> (SNIP 1,025).
16. Alhumaid S. A Noncontact Magneto-Piezo Harvester-Based Vehicle Regenerative Suspension System: An Experimental Study / Alhumaid S., Hess D., Guldiken R. // *Energies*, 2022, 15(12), 4476. – *Bibliogr.* : pp. 15-17 (46 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124476> (SNIP 1,025).
17. Jamolov U. Multiphysics Design of an Automotive Regenerative Eddy Current Damper / Jamolov U., Peccini F., Maizza G. // *Energies*, 2022, 15(14), 5044. – *Bibliogr.* : pp. 17-18 (37 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15145044> (SNIP 1,025).
18. Can a Semi-Active Energy Harvesting Shock Absorber Mimic a Given Vehicle Passive Suspension? / Reyes-Avenidaño J. A., Moreno-Ramírez C., Gijón-Rivera C., Gonzalez-Hernandez H. G., Olazagoitia J. L. // *Sensors*. 2021, 21(13), 4378. – *Bibliogr.* : pp. 16-17 (34 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134378> (SNIP 1,317).
19. Huang J. Analysis and Research on the Comprehensive Performance of Vehicle Magnetorheological Regenerative Suspension / Huang J., Wang E., Zhang H. // *Vehicles*, 2020, 2(4), 576-588. – *Bibliogr.* : pp. 587-588 (14 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles2040033> (SNIP 0,955).
20. Casavola A. Optimal Control Strategies for Energy Harvesting by Regenerative Shock Absorbers in Cars / Casavola A., Tedesco F., Vaglica P. // *Vibration*, 2020, 3(2), 99-115. – *Bibliogr.* : pp. 115 (15 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration3020009> (SNIP 1,95).
21. Zhang R. Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems / Zhang R., Wang X., John S. // *Energies*, 2018, 11(5), 1167. – *Bibliogr.* : pp. 37-43 (145 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051167> (SNIP 1,025).
22. Considering Well-to-Wheels Analysis in Control Design: Regenerative Suspension Helps to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Battery Electric Vehicles / Hu X., Sun J., Chen Y., Liu Q., Gu L. // *Energies*, 2019, 12(13), 2594. – *Bibliogr.* : pp. 18-19 (37 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132594> (SNIP 1,025).
23. Nonlinear Modeling and Coordinate Optimization of a Semi-Active Energy Regenerative Suspension with an Electro-Hydraulic Actuator / Kou F., Du J., Wang Z., Li D., Xu J. // *Algorithms*, 2018, 11(2), 12. – *Bibliogr.* : pp. 16-17 (24 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/a11020012> (SNIP 0,913).

24. Посметьев, В. И. Анализ конструкций электромагнитных амортизаторов, рекуперующих энергию в подвесках автомобилей / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. С. Сеницын // Проблемы эксплуатации и перспективы развития автомобильного транспорта : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 05-06 октября 2023 года / отв. редактор В.О. Никонов. – Воронеж, 2023. – С. 31-44. – Библиогр. : с. 41-44 (30 назв.). – DOI: https://doi.org/10.58168/OPPRTD_31-44. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54789870>.

25. Патент № 2799872 Российская Федерация, МПК F16F 15/03, B60G 13/14, H02K 41/02. Рекуперативный амортизатор на основе линейного электродвигателя с постоянными магнитами : № 2023105791 : заявл. 13.03.2023 : опубл. 13.07.2023 / Д. В. Миронов, Р. Н. Хамитов, В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. П. Проговоров, И. В. Матери, С. В. Рослов, А. С. Мирончик ; заявитель Миронов Д. В., Проговоров А. П. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54203825>.

References

1. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Zelikov V. A. *Oценка актуальности использования рекуперативной подвески с линейным электромагнитным генератором в конструкции лесовозного автомобиля* [Assessing the relevance of using a regenerative suspension with a linear electromagnetic generator in the design of a timber truck]. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2022. – Т. 2, № 2 (40). – P. 50-63. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-50-63> (In Russ.).

2. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. A., Posmetev V. V., Chujkov A. S. *Optimizaciya konstruktivnykh parametrov rekuperativnogo scepного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом* [Optimization of design parameters of a regenerative coupling device installed in a timber truck with a trailer]. *Forestry journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1 (49). – S. 162-179. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11> (In Russ.).

3. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. *Obosnovanie celesoobraznosti osnascheniya lesovoznih avtopoezdov rekuperativnimi tyagovo-scepными устройствами по результатам имитационного моделирования* [Justification of the feasibility of equipping timber hauling road trains with regenerative towing devices based on the results of simulation modeling]: monography. – Voronezh, 2023. – 204 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61082376>.

4. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Manukovskij A. Yu., Posmetev V. V., Avdyuhin A. V. *Optimizaciya konstruktivnykh parametrov pnevmogidравлического седель'но-сцепного устройства лесовозного автотрainsа* [Optimization of design parameters of a pneumohydraulic fifth wheel coupling device for a timber road train]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. – 2023. – #. 3(393). – pp. 126-139. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-126-139> (In Russ.).

5. Borisov V. A., Akinin D. V., Nikitin V. V. *Nekotorye voprosy prochnosti scepki tyagacha i polupriceparospuska lesovozного автотрainsа* [Some issues of the strength of the coupling of a tractor and a semi-trailer-dissolution of a timber road train]. *Resources and Technology*. – 2019. – Т. 16, №. 3. – P. 12-23. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4702> (In Russ.).

6. Mokhirev A. P., Rukomoinikov K. P., Mazurkin P. M., Bragina N. A. *Verifikaciya eksperimentami modelej skorosti dvizheniya lesovozov v zavisimosti ot prirodno-proizvodstvennykh faktorov* [Verification by experiments of models of the speed of movement of timber trucks depending on natural and production factors]. *Forestry Bulletin*. – 2021. – Т. 25, №. 2. – P. 108-115. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-108-115> (In Russ.).

7. Mazurkin P. M., Mohirev A. P., Rukomojnikov K. P. *Rejtingi grupp faktorov vyvozki sortimentov* [Ratings of groups of factors for the removal of logs]. *Resources and Technology*. – 2021. – Т. 18, №. 3. – P. 37-52. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5803> (In Russ.).

8. Mohirev A. P., Rukomojnikov K. P., Mazurkin P. M. *Zakonomernosti rangovykh raspredelenij faktorov vyvozki drevесiny s lesnyh uchastkov* [Patterns of rank distributions of wood removal factors from forest areas]. *Forestry Bulletin*. – 2021. Т. 25. № 4. P. 112-120. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-112-120> (In Russ.).

9. Zhang J., Liu J., Liu B., Li M. Fractional Order PID Control Based on Ball Screw Energy Regenerative Active Suspension. *Actuators*, 2022, 11(7), 189. DOI: <https://doi.org/10.3390/act11070189>.
10. Hu G., Wu L., Deng Y., Yu L., Luo B. Damping Performance Analysis of Magnetorheological Damper Based on Multiphysics Coupling. *Actuators*, 2021, 10(8), 176. DOI: <https://doi.org/10.3390/act10080176>.
11. Song H., Dong M., Wang X. Research on Inertial Force Attenuation Structure and Semi-Active Control of Regenerative Suspension. *Applied Sciences*, 2024, 14(6), 2314. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062314>.
12. Jia Y., Li S., Shi Y. An Analytical and Numerical Study of Magnetic Spring Suspension with Energy Recovery Capabilities. *Energies*, 2018, 11(11), 3126. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113126>.
13. Duong M.-T., Chun Y.-D., Hong D.-K. Design of a High-Performance 16-Slot 8-Pole Electromagnetic Shock Absorber Using a Novel Permanent Magnet Structure. *Energies*, 2018, 11(12), 3352. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11123352>.
14. Bowen L., Vinolas J., Olazagoitia J. L. Design and Potential Power Recovery of Two Types of Energy Harvesting Shock Absorbers. *Energies*. 2019. 12(24). 4710. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12244710>.
15. Lee J., Chun Y., Kim J., Park B. An Energy-Harvesting System Using MPPT at Shock Absorber for Electric Vehicles. *Energies*, 2021, 14(9), 2552. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092552>.
16. Alhumaid S., Hess D., Guldiken R. A Noncontact Magneto-Piezo Harvester-Based Vehicle Regenerative Suspension System: An Experimental Study. *Energies*, 2022, 15(12). 4476. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124476>.
17. Jamolov U., Peccini F., Maizza G. Multiphysics Design of an Automotive Regenerative Eddy Current Damper. *Energies*, 2022, 15(14), 5044. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15145044>.
18. Reyes-Avenidaño J. A., Moreno-Ramírez C., Gijón-Rivera C., Gonzalez-Hernandez H. G., Olazagoitia J. L. Can a Semi-Active Energy Harvesting Shock Absorber Mimic a Given Vehicle Passive Suspension? *Sensors*, 2021, 21(13), 4378. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134378>.
19. Huang J., Wang E., Zhang H. Analysis and Research on the Comprehensive Performance of Vehicle Magnetorheological Regenerative Suspension. *Vehicles*, 2020, 2(4), 576-588. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles2040033>.
20. Casavola A., Tedesco F., Vaglica P. Optimal Control Strategies for Energy Harvesting by Regenerative Shock Absorbers in Cars. *Vibration*, 2020, 3(2), 99-115. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration3020009>.
21. Zhang R., Wang X., John S. A Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems. *Energies*, 2018, 11(5), 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051167>.
22. Hu X., Sun J., Chen Y., Liu Q., Gu L. Considering Well-to-Wheels Analysis in Control Design: Regenerative Suspension Helps to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Battery Electric Vehicles. *Energies*, 2019, 12(13), 2594. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132594>.
23. Kou F., Du J., Wang Z., Li D., Xu J. Nonlinear Modeling and Coordinate Optimization of a Semi-Active Energy Regenerative Suspension with an Electro-Hydraulic Actuator. *Algorithms*, 2018, 11(2), 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/a11020012>.
24. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Sinicin A. S. *Analiz konstrukcii elektromagnitnih amortizatorov, rekuperiruyuschih energiyu v podveskah avtomobilei* [Analysis of the designs of electromagnetic shock absorbers that recuperate energy in car suspensions]. Problems of operation and prospects for the development of road transport: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 05-06, 2023 / Rep. editor V.O. Nikonov. – Voronezh, 2023. – P. 31-44. DOI: https://doi.org/10.58168/OPPRTD_31-44 (In Russ.).
25. Mironov D. V., et. al. *Rekuperativnii amortizator na osnove lineinogo elektrodvigatelya s postoyannimi magnitami* [Regenerative shock absorber based on a linear permanent magnet motor]. Patent RF, no 2799872, 2023.

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

✉ *Никонов Вадим Олегович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Information about the authors

Valerii I. Posmetev – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

✉ *Vadim O. Nikonov* – Cand. Sci. (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Viktor V. Posmetev – Cand. Sci. (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Vladimir A. Zelikov – Dr. Sci. (Technical Sciences), Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author