

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-62-76

УДК 657



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ МАЛОТОННАЖНОГО ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ С УЗЛОМ РЕКУПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*М.А. Семенов, С.С. Сережкин, А.В. Скрынников,  
А.А. Попов, М.В. Сидоров*

*На сегодняшний день важную роль во многих сферах экономической деятельности играет автомобильный грузовой транспорт. Прежде всего от него зависит, насколько быстро и надежно будет доставлен товар из одного места в другое. При обширном перечне различных товаров, которые необходимо перевезти, имеется не менее большой выбор транспортных средств для выполнения этих задач.*

*В связи с тем, что в настоящее время в большинство городов запрещен въезд большегрузных машин, стали востребованы малотоннажные грузовые автомобили, включая фургоны и грузовики транспортной категории «N1». Основное их предназначение – перевозка небольших партий грузов в черте города или на сравнительно небольшие расстояния.*

*Малотоннажные грузовые автомобили должны обладать не только высокими динамическими характеристиками, но и низким расходом топлива. Многочисленные исследования показали, что наиболее перспективным направлением повышения динамических характеристик и снижения расхода топлива являются устройства рекуперации механической энергии, которые накапливают энергию вращающихся масс автомобиля при торможении и передают ее на те же вращающиеся массы в момент трогания автомобиля с места. Анализ движения легких грузовиков с использованием устройства рекуперации механической энергии может выявить изменения в динамике легких грузовиков и расходе топлива.*

**Цель.** Исследование изменения динамических характеристик и расхода топлива малотоннажного грузового автомобиля с узлом рекуперации механической энергии с помощью модели в среде MATLAB Simulink.

**Метод или методология проведения работы.** В статье использовались методы математического моделирования и анализа.

**Результаты.** Получены параметры, показывающие эффективность эксплуатации малотоннажного грузового автомобиля с узлом рекуперации механической энергии.

**Область применения результатов.** Полученные результаты могут быть применены при проектировании автомобиля для выявления оптимальных параметров силовой установки транспортного средства, которые используются вместе с устройствами рекуперации механической энергии.

**Ключевые слова:** малотоннажный грузовой автомобиль, узел рекуперации, механическая энергия, плоская спиральная пружина, моделирование, MATLAB Simulink, математическая модель

**Для цитирования.** Семенов М.А., Сerezhkin С.С., Скрынников А.В., Попов А.А., Сидоров М.В. Математическая модель движения малотоннажного грузового автомобиля с узлом рекуперации механической энергии // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 1. С. 62-76. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-62-76

## MATHEMATICAL MODEL OF THE MOVEMENT OF A LOW-TONNAGE TRUCK WITH A MECHANICAL ENERGY RECOVERY UNIT

*M.A. Semenov, S.S. Serezhkin, A.V. Skrynnikov,  
A.A. Popov, M.V. Sidorov*

*To date, an important role in many areas of economic activity is played by road freight transport. First of all, it depends on how quickly and reliably the goods will be delivered from one place to another. With*

*an extensive list of various goods that need to be transported, there is no less a large selection of vehicles to perform these tasks.*

*Due to the fact that heavy trucks are currently prohibited from entering most cities, low-tonnage trucks, including vans and trucks of the transport category “N1”, have become in demand. Their main purpose is the transportation of small shipments within the city or over relatively short distances.*

*Low-tonnage trucks should have not only high dynamic characteristics, but also low fuel consumption. Numerous studies have shown that the most promising direction of increasing dynamic characteristics and reducing fuel consumption are mechanical energy recovery devices that accumulate the energy of the rotating masses of the car during braking and transfer it to the same rotating masses at the moment the car starts moving. Analysis of the movement of light trucks using a mechanical energy recovery device can reveal changes in the dynamics of light trucks and fuel consumption.*

**Purpose.** *Investigation of changes in dynamic characteristics and fuel consumption of a low-tonnage truck with a mechanical energy recovery unit using a model in the MATLAB Simulink environment.*

**Methodology.** *Methods of mathematical modeling and analysis were used in the article.*

**Results.** *The parameters showing the efficiency of operation of a low-tonnage truck with a mechanical energy recovery unit are obtained.*

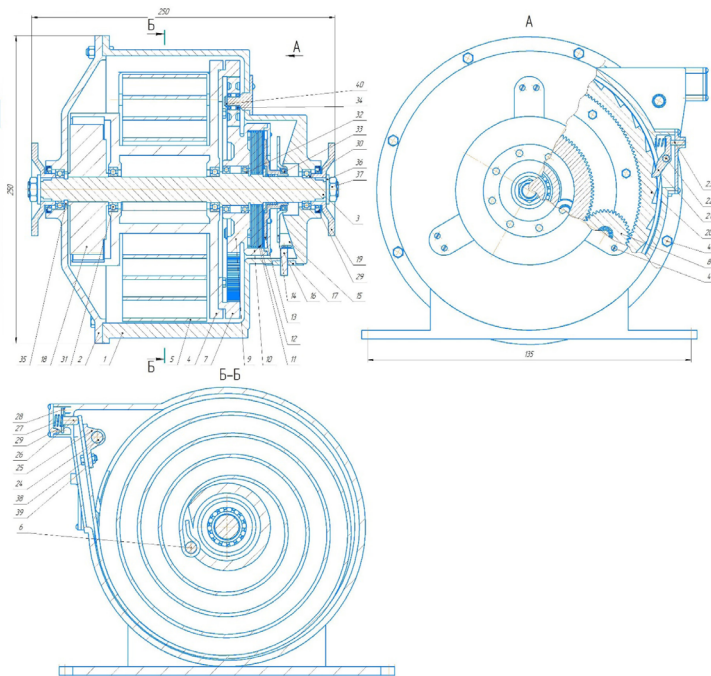
**Practical implications.** *The results obtained can be applied when designing a car to identify the optimal parameters of the vehicle's power plant, which are used together with mechanical energy recovery devices.*

**Keywords:** *low-tonnage truck, recovery unit, mechanical energy, flat spiral spring, simulation, MATLAB Simulink, mathematical model*

*For citation. Semenov M.A., Serezhkin S.S., Skrynnikov A.V., Popov A.A., Sidorov M.V. Mathematical Model of the Movement of a Low-Ton-  
nage Truck with a Mechanical Energy Recovery Unit // International  
Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 62-76. DOI:  
10.12731/2227-930X-2023-13-1-62-76*

Основными частями устройства рекуперации являются корпус, крышка, вал рекуператора, барабан, спиральная пружина, обгонная муфта, планетарный механизм, фрикционный муфта и храповый механизм. В основе разрабатываемой конструкции механического рекуператора лежит плоская спиральная пружина, накапливающая механическую энергию.

Общая компоновочная схема разрабатываемого механического рекуператора представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Общая компоновочная схема механического рекуператора  
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – вал; 4 – барабан; 5 – пружина спиральная; 6 – ось пружины; 7 – шестерня венцовая; 8 – шестерня сателлитная; 9 – шестерня ведущая; 10 – муфта дисковая; 11,12 – диски фрикционные; 13,14 – диск прижимной; 15 – клин; 16 – толкатель клина; 17 – крышка толкателя; 18 – муфта обгона; 19 – фланец; 20 – шестерня храповая; 21 – собачка; 22 – ось собачки; 23 – толкатель; 24 – ось переходника; 25 – переходник; 26 – шток; 27 – пружина; 28 – контакт

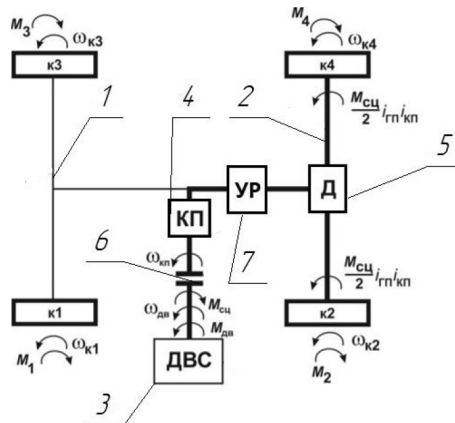
Рекуператор состоит из корпуса 1 и крышки 2, в которых на подшипниках качения установлен вал 3, являющийся частью трансмиссии. На валу 3 на подшипниках качения расположен барабан 4, на котором установлена плоская спиральная пружина 5, зафиксированная осью 6. На задней части барабана 4 установлена шестерня 7, соединяющаяся через сателлитные шестерни 8 с ведущей шестерней 9, которая соединяется с валом 3 посредством пластинчатой дисковой муфты 10, имеющей шлицевое соединение у пластин 11 для соединения с валом 3 и пластин 12 – со шлицами на шестерне 9. Сжатие пластин 11 и 12 обеспечивается диском 13, подпружиненным на отжим, через диск 14, установленный на подшипниках качения, посредством, клина 15, приводимого в действие электродвигателем. В передней части устройства закреплена муфта обгона 18, наружной частью которого является барабан 4. Вал 3 с обоих концов имеет переходные фланцы 19 [1].

Шестерня 7 по наружной поверхности имеет зубчатое колесо 20, которое тормозит собачка 21. Наружный конец плоской пружины 5 соединен с переходником 25, который зафиксирован на оси 26, закрепленной в корпусе 1. Верхняя плоскость конца пружины 5 контактирует с контактом 28 датчика затяжки, фиксирующего крайние положения пружины 5 [1].

Для загрузки рекуператора при нажатии на педаль тормоза подается сигнал на электродвигатель, который заставляет перемещаться клин 15 к оси вала 3, что приводит к осевому смещению диск 14. Диск, в свою очередь, передает осевое усилие на нажимной диск 13, который сжимает фрикционные диски 11 и 12, обеспечивая передачу крутящего момента от вала 3 на приводную шестерню 9. Далее, крутящий момент передается через сателлитные шестерни 8 и шестерню 7 на барабан 4, который заводит плоскую спиральную пружину 5 до момента, пока внешний конец пружины 5 не нажмет на концевик, который дает команду на отключение рекуператора путем прекращения подачи сигнала на электродвигатель и отвода клина 15 в исходное положение, а

также на включение сигнальной лампочки о загруженности рекуператора на приборной доске водителя [1].

Для включения рекуператора, с целью начала вращения карданного вала, путем срабатывания заведенной пружины 5 толкателем 23 передается давление на собачку 21, в результате чего храповая шестерня 20 освобождается, и барабан 4 начинает вращаться в том же направлении, что и карданный вал при движении автомобиля, при этом сразу же срабатывает обгонная муфта 18, в результате чего энергия от срабатывающей пружины 5 передается на карданный вал. После полного срабатывания пружины 5 она своим внешним концом обеспечивает перемещение подпружиненного штока 26 вниз до нажатия на концевик, который дает сигнал на приборной доске водителя о разгрузке рекуператора [1].



**Рис. 2.** Схема трансмиссии малотоннажного грузового автомобиля с узлом рекуперации механической энергии: 1,2 – передняя и задняя оси; 3 – двигатель внутреннего сгорания (ДВС); 4 – коробка передач (КП); 5 – симметричный межколесный дифференциал; 6 – сцепление; 7 – устройство рекуперации; к1... к4 – номер колеса;  $M_i$  – момент сопротивления на  $i$ -ом колесе;  $M_{цв}$  – крутящий момент, приведенный к заднему валу трансмиссии;  $M_{цд}$  – крутящий момент, развиваемый двигателем;  $M_{цв}$  – крутящий момент, передаваемый сцеплением;  $\omega_{дв}$  – угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя;  $\omega_{кп}$  – угловая скорость ведомого диска сцепления;  $\omega_{ки}$  – угловая скорость вращения  $i$ -ого колеса;  $i_{гп}$  – передаточное отношение главной передачи;  $i_{кп}$  – передаточное отношение коробки передач.

Эффективность данного устройства заключается в следующем: улучшаются условия экологичности окружающей среды, прежде всего в местах частых остановок; снижается расход топлива, так как в начале движения затрачивается рекуперированная энергия; улучшаются динамические характеристики транспортного средства.

Для определения параметров движения транспортного средства рассмотрена схема трансмиссии малотоннажного грузового автомобиля с узлом рекуперации механической энергии. Общая схема трансмиссии представлена на рис. 2 [2].

Исследуемую модель можно представить в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_k \cdot \dot{\omega}_{k1} = -M_1 \\ J_k \cdot \dot{\omega}_{k2} = \frac{M_{сц}}{2} \cdot i_{тп} \cdot i_{кп} - M_2 \\ J_k \cdot \dot{\omega}_{k3} = -M_3 \\ J_k \cdot \dot{\omega}_{k4} = \frac{M_{сц}}{2} \cdot i_{тп} \cdot i_{кп} - M_4 \\ \dot{\omega}_{сц} = i_{тп} \cdot i_{кп} \cdot \frac{(\omega_{k2} + \omega_{k4})}{2} \\ J_{дв} \cdot \dot{\omega}_{дв} = M_{дв} - M_{сц} \end{cases} \quad (1)$$

где  $J_k, J_{дв}$  – моменты инерции колеса и двигателя;  $\dot{\omega}_{ki}$  – угловое ускорение вращения  $i$ -го колеса;  $\dot{\omega}_{дв}$  – угловое ускорение вращения вала двигателя;  $i_{кп}$  – передаточное отношение коробки передач [2-3].

Для адекватного моделирования работы механической трансмиссии колесной машины необходимо разработать модель переключения передач. Более корректным является переключение передач в зависимости от скорости движения [4-5].

Крутящий момент, передаваемый устройством рекуперации на карданный вал, можно определить по формуле:

$$M_{в} = \frac{b \cdot h^3 \cdot E \cdot \varphi}{12 \cdot l}, \quad (2)$$

где:  $b$  – ширина пружины, мм;  $h$  – толщина пружины, мм;  $E$  – модуль упругости, Н/мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина пружины, мм.

Путевой расход топлива (л/100 км) автомобиля определяется по формуле:

$$Q_s = \frac{g_e \cdot N_e}{100 \cdot V \cdot \rho_T}, \quad (3)$$

где  $g_e$  – удельный расход топлива;  $N_e$  – мощность двигателя;  $\rho_T$  – плотность топлива ( $\rho_T = 860 \text{ кг/м}^3$  – дизель).

### Результаты

Имитационное моделирование в среде MATLAB Simulink позволяет на основе математической модели проводить всесторонние исследования разрабатываемой системы.

Общая блок схема движения малотоннажного грузового автомобиля с узлом рекуперации, созданная в среде MATLAB Simulink представлена на рис. 3.

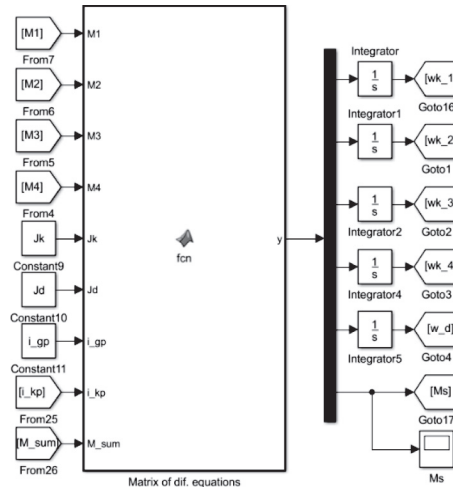


Рис. 3. Общая блок схема движения малотоннажного грузового автомобиля с узлом рекуперации

Блоки определения параметров движения транспортного средства представлены на рис. 4-5.



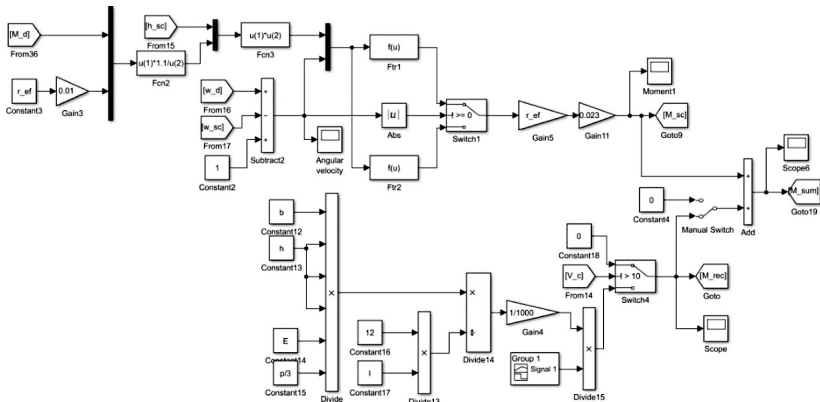


Рис. 4. Блок схема нахождения суммарного крутящего момента, передаваемого на карданный вал

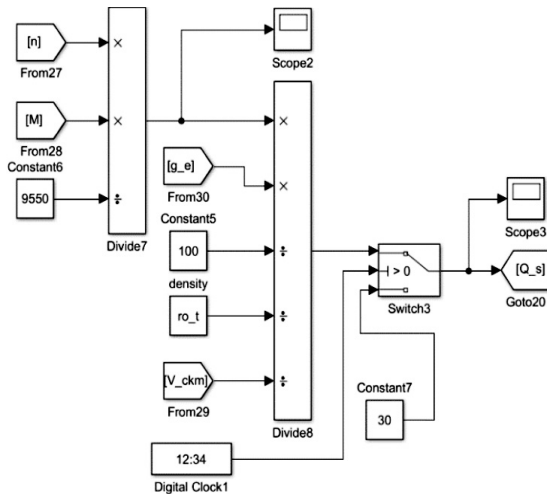
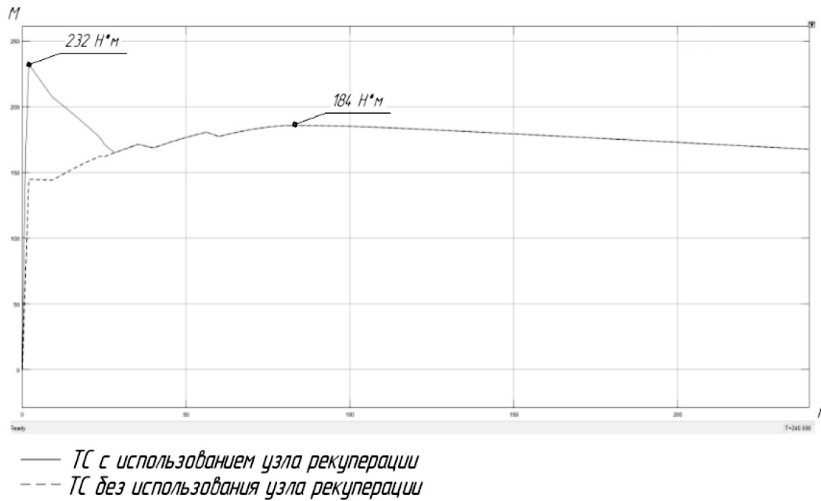


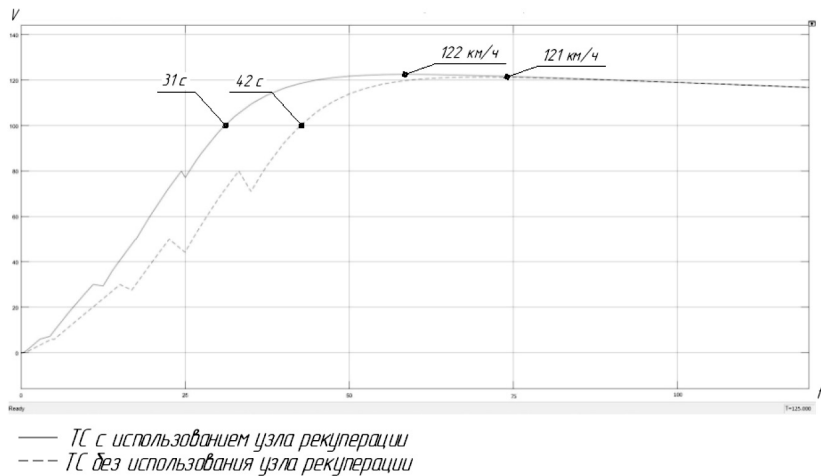
Рис. 5. Блок схема определения путевого расхода топлива

Изменение крутящего момента вследствие использования узла рекуперации можно увидеть на рис. 6.

Изменение времени разгона автомобиля и максимальной скорости вследствие использования узла рекуперации представлены на рис. 7.

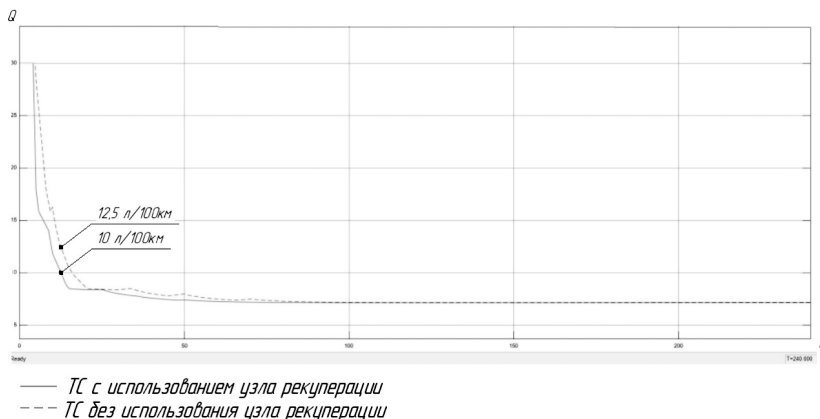


**Рис. 6.** Изменение крутящего момента вследствие использования узла рекуперации



**Рис. 7.** Изменение времени разгона автомобиля и максимальной скорости вследствие использования узла рекуперации

Изменение моментального расхода топлива вследствие использования узла рекуперации представлено на рис. 8.



**Рис. 8.** Изменение моментального расхода топлива вследствие использования узла рекуперации

## Выводы

Из полученных графиков видно, что максимальное значение крутящего момента без использования узла рекуперации составляет 184 Нм. На транспортном средстве с установленным на него устройством рекуперации максимальный крутящий момент составляет 232 Нм и реализуется он в момент трогания автомобиля с места, на установившемся же режиме движения крутящий момент не изменился.

Автомобиль с установленным на него устройством рекуперации разгоняется до 100км/ч на 11 секунд быстрее (31 с.), чем автомобиль без узла рекуперации (42 с.). Максимальная скорость достигается быстрее на 16 секунд быстрее и составляет 122 км/ч.

Моментальный расход топлива в момент трогания с места на автомобиле с устройством рекуперации составляет 10 л/100км, что на 2,5 л/100км меньше по сравнению с автомобилем без узла рекуперации.

## Список литературы

1. Патент 2199026 Рос. Федерация, МПК В60К 6/08. Рекуператор энергии для автомобилей: № 2000117109/28, 2000.06.27: заявл. 2000.06.27: опубл. 2003.02.20 /В.В.Петросов, П.М.Пруссов, В.С.

- Малкин, А.Г.Петросов, И.В.Малкин. 4с. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2199026C2\\_20030220](https://yandex.ru/patents/doc/RU2199026C2_20030220)
2. Заруцкий С.А., Власенко Е.А. Автоматизация анализа данных экспериментальных исследований // Инженерный вестник Дона, 2019, № 8 URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4753>
  3. Жилейкин, М. М. Математические модели систем транспортных средств : методические указания / М. М. Жилейкин, Г. О. Котиев, Е. Б. Сарач. Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. URL: <https://e.lanbook.com/book/103321>
  4. Синицкий С. А., Хафизов К. А., Нурмиев А. А., Хафизов Р. Н., Медведев В. М., Лушнов М. А. Учебное пособие по дисциплине “Конструкция автомобилей и тракторов”. Часть II. Трансмиссия автомобилей и тракторов/ Казанский государственный аграрный университет, 2019. URL: <https://e.lanbook.com/book/202586>
  5. Конструкция тракторов и автомобилей: учебное пособие / О. И. Поливаев, О. М. Костилов, А. В. Ворохобин, О. С. Ведринский. Санкт-Петербург : Лань, 2022. URL: <https://e.lanbook.com/book/211322>
  6. Волков, Е. В. Теория эксплуатационных свойств автомобиля : учебник для вузов / Е. В. Волков. Санкт-Петербург: Лань, 2022. URL: <https://e.lanbook.com/book/197455>
  7. Фадеева М.Э., Чудаков Д.А., Маташнёв А.А., Сидоров В.Н., Пономарев А.И. Моделирование механической трансмиссии колесной машины 4х2 с задней ведущей осью // Инженерный вестник Дона, 2022, № 12. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8090>

### *References*

1. Patent 2199026 Ros. Federation, IPC B60K 6/08. Energy recuperator for cars: No. 2000117109/28, 2000.06.27: Appl. 2000.06.27: publ. 2003.02.20 /V.V.Petrosov, P.M.Prusov, V.S. Malkin, A.G. Petrosov, I.V. Malkin. 4s. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2199026C2\\_20030220](https://yandex.ru/patents/doc/RU2199026C2_20030220)

2. Zarutsky S.A., Vlasenko E.A. Automation of data analysis of experimental studies // Engineering Bulletin of the Don, 2019, No. 8 URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4753>
3. Zhileikin, M. M. Mathematical models of vehicle systems: guidelines / M. M. Zhileikin, G. O. Kotiev, E. B. Sarach. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 2018. URL: <https://e.lanbook.com/book/103321>
4. Sinitsky S. A., Khafizov K. A., Nurmiev A. A., Khafizov R. N., Medvedev V. M., Lushnov M. A. Textbook on the discipline “Design of cars and tractors”. Part II. Transmission of cars and tractors / Kazan State Agrarian University, 2019. URL: <https://e.lanbook.com/book/202586>
5. Construction of tractors and cars: textbook / O. I. Polivaev, O. M. Kostikov, A. V. Vorokhobin, O. S. Vedrinsky. St. Petersburg: Lan, 2022. URL: <https://e.lanbook.com/book/211322>
6. Volkov, E. V. Theory of operational properties of a car: a textbook for universities / E. V. Volkov. St. Petersburg: Lan, 2022. URL: <https://e.lanbook.com/book/197455>
7. Fadeeva M.E., Chudakov D.A., Matashnev A.A., Sidorov V.N., Ponomarev A.I. Modeling the mechanical transmission of a 4x2 wheeled vehicle with a rear drive axle // Engineering Bulletin of the Don, 2022, No. 12. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8090>

## ДАНИЕ ОБ АВТОРАХ

**Семенов Максим Андреевич**, студент кафедры «Колесные машины и прикладная механика»

*Калужский филиал «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»*

*ул. Гагарина, 6, г. Калуга, Калужская область, 248000, Российская Федерация*

*[maksimsemenov606@gmail.com](mailto:maksimsemenov606@gmail.com)*

**Сережкин Сергей Сергеевич**, студент кафедры «Колесные машины и прикладная механика»

*Калужский филиал «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»*

*ул. Гагарина, 6, г. Калуга, Калужская область, 248000, Российская Федерация*  
*serejkin.sergey@yandex.ru*

**Скрынников Алексей Валерьевич**, студент кафедры «Колесные машины и прикладная механика»  
*Калужский филиал «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»*  
*ул. Поле свободы, 81, г. Калуга, Калужская область, 248021, Российская Федерация*  
*skryunnikovav@student.bmstu.ru*

**Попов Андрей Александрович**, студент кафедры «Колесные машины и прикладная механика»  
*Калужский филиал «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»*  
*ул. Валентины Никитиной, 35, г. Калуга, Калужская область, 248025, Российская Федерация*  
*leonf4n@mail.ru*

**Сидоров Максим Владимирович**, доцент кафедры «Колесные машины и прикладная механика», кандидат технических наук  
*Калужский филиал «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»*  
*ул. Космонавта Комарова, 36, г. Калуга, Калужская область, 248000, Российская Федерация*  
*sidorov-kaluga@yandex.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Maksim A. Semenov**, student of the department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics”  
*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch*

*6, Gagarin Str., Kaluga, Kaluga Region, 248000, Russian Federation*

*maksimsemenov606@gmail.com*

**Sergey S. Serazhkin**, student of the department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics”

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch  
6, Gagarin Str., Kaluga, Kaluga Region, 248000, Russian Federation  
serejkin.sergey@yandex.ru*

**Alexei V. Skrynnikov**, student of the department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics”

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch  
81, Field of Freedom Str., Kaluga, Kaluga Region, 248021,  
Russian Federation  
skrynnikovav@student.bmstu.ru*

**Andrei A. Popov**, student of the department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics”

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch  
35, Valentiny Nikitinoj Str., Kaluga, Kaluga Region, 248025,  
Russian Federation  
skrynnikovav@student.bmstu.ru*

**Maksim V. Sidorov**, associate professor of the department “Wheeled vehicles and Applied Mechanics”, Candidate of Technical Sciences

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch  
36, Cosmonaut Komarov Str., Kaluga, Kaluga Region, 248000,  
Russian Federation  
sidorov-kaluga@yandex.ru*

Поступила 25.12.2022

После рецензирования 10.01.2023

Принята 15.01.2023

Received 25.12.2022

Revised 10.01.2023

Accepted 15.01.2023