



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186

EDN: BTWBKJ

УДК 629.331

Научная статья / Research article

Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства

З.Н. Лин , А.В. Скрынников , К.В. Чижевский , В.Н. Сидоров

Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана,
Калуга, Российская Федерация
✉ sidorov-kaluga@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 ноября 2022 г.

Доработана: 21 января 2023 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

узел рекуперации, расход топлива,
Matlab Simulink, гибридные автомобили

Аннотация. В настоящее время наиболее энергоэффективными являются электрические и гибридные автомобили, которые, несмотря на высокую стоимость и недостаточное конструктивное совершенство, вытесняют традиционные автомобили с двигателями внутреннего сгорания. В гибридные автомобили относительно легко внедрить системы сбора энергии с использованием реверсивных электрических машин и электрических аккумуляторов. Исследована генерация электрической энергии на автомобиле. Использовались методы математического и имитационного моделирования. Получены результаты, показывающие эффективность эксплуатации транспортного средства с узлом рекуперации электрической энергии. Приводятся данные сгенерированного электрического тока в виде получаемого напряжения при движении транспортного средства по различным видам дорожных покрытий. Посредством имитационного моделирования установлено, что один рекуператор может вырабатывать в среднем около 3 В, а со всех устанавливаемых четырех рекуператоров можно получить 12 В, что достаточно для зарядки накопителей гибридной силовой установки.

Для цитирования

Лин З.Н., Скрынников А.В., Чижевский К.В., Сидоров В.Н. Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 177–186. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

Mathematical model of vehicle electrical energy recovery

Zar Ni Lin , Alexei V. Skrynnikov , Konstantin V. Chizhevsky , Vladimir N. Sidorov

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation
✉ sidorov-kaluga@yandex.ru

Article history

Received: November 12, 2022

Revised: January 21, 2023

Accepted: February 25, 2023

Abstract. Nowadays, the most energy efficient are electric and hybrid vehicles. Despite the very high cost and insufficient design perfection, they are replacing traditional cars with internal combustion engines. In hybrid vehicles, it is relatively easy to implement energy storage systems using reversible electric



Keywords:

recovery unit, fuel consumption, Matlab Simulink, hybrid vehicles

machines and electric batteries. The results of a study on electrical energy generation in a vehicle are presented. The methods of mathematical and simulation modelling were used. The efficiency of operation of a vehicle with an electrical energy recovery unit is shown. The data of the generated electric current in the form of the received voltage when the vehicle is moving on various types of road surfaces are given. As a result of simulation modelling, it was found that one recuperator can generate an average of about 3 V, 12 V can be obtained from all four installed recuperators, which is enough to charge the storage units of the hybrid power plant.

For citation

Lin ZN, Skrynnikov AV, Chizhevsky KV, Sidorov VN. Mathematical model of vehicle electrical energy recovery. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):177–186. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

Введение

Мировая тенденция роста цен на топливо и жесткая рыночная конкуренция вынуждают разработчиков и производителей проводить интенсивные исследования и ускорять внедрение энергоэффективных силовых установок и систем при создании новых транспортных средств различного назначения [1–2]. В настоящее время наиболее энергоэффективными являются электрические и гибридные автомобили, которые, несмотря на весьма высокую стоимость и еще недостаточное конструктивное совершенство, вытесняют традиционные автомобили [2–3].

Дальнейшее увеличение производства электромобилей и гибридных транспортных средств по-прежнему ограничивается дефицитом эффективных, компактных, безопасных и энергоемких аккумуляторов (ионно-литиевые, нанофосфаты лития, никель-металлогидритные и др.) [4–5]. В гибридных автомобилях относительно легко внедрить системы сбора энергии с использованием реверсивных электрических машин и электрических аккумуляторов [6]. При этом основным направлением рекуперации энергии, уже реализованным, являются различные практически проверенные системы выработки, накопления и реализации электрической энергии, получаемой при торможении машины [7–8].

В [9] рассмотрено устройство системы поддрессирования транспортного средства с рекуперацией механической энергии колебаний транспортного средства в электрическую энергию. Представлена математическая модель системы поддрессирования транспортного средства на основе амортизатора с рекуперативным эффектом. С помощью математической модели определена мощность, которую способна рекуперировать система поддрессирования транспортным сред-

ством при движении по дорогам неоднородного качества (асфальтовой и грунтовой) с различной скоростью. Зафиксировано, что при движении транспортного средства со скоростью 40–50 км/ч по асфальтобетонной дороге средняя рекуперированная мощность системы составляет 0,011 кВт, а при движении по грунтовым дорогам – 0,206 кВт.

В свою очередь в [10] описывается подход к энергоэффективному использованию активной электромеханической подвески. В работе основной целью является минимизация потерь энергии в активной подвеске посредством использования рекуперативного демпфирования колебаний жителей.

Проведенный анализ алгоритмов управления параметрами подвески показал, что они имеют сложную структуру и для их реализации необходимы сложные системы управления.

В [11] приведены различные виды устройств рекуперации подвески автомобиля, определены наиболее перспективные из них. Создан образец электрического амортизатора-рекуператора с высокими эксплуатационными свойствами, который относится к типу линейных электромагнитных генераторов.

Построены циклограммы по времени действительных значений индуцируемого переменного тока, получены значения производимой устройством работы. Производимая устройством энергия варьируется в пределах от 0,3 до 1,9 кВт·ч.

Результаты многочисленных исследований указывают на перспективы повышения экономичности транспортных средств за счет создания в их подвесках эффективных систем рекуперации. Неизбежные колебания поддрессированной массы движущегося автомобиля, естественно, потребляют часть мощности силовой установки, на ко-

торую по разным оценкам, в зависимости от дорожных условий, приходится не менее 10–20 % потерь. Эта энергия может быть использована без ущерба для снижения эффективности работы подвески.

Цель исследования – изучение генерации электрической энергии и изменения плавности хода транспортного средства с узлом рекуперации электрической энергии с помощью модели в среде MATLAB Simulink.

1. Материалы и методы

Основными элементами электромагнитного рекуператора являются корпус, шток и крышка корпуса. В основе разрабатываемой конструкции линейного рекуператора лежит электромагнитная система. Данная система состоит из постоянного магнита, 125 листов электротехнической стали и 9 катушек. Крепиться рекуператор будет болтовыми соединениями в двух местах – в верхней части корпуса к раме автобуса и штоком к балке подвески.

Компоновочная схема разрабатываемого электромагнитного рекуператора представлена на рис. 1.

Магнит (9), приклеенный ко штоку (7), совершает вместе с ним возвратно-поступательные движения при колебании колеса автобуса, при этом магнитное поле магнита пересекает магнитные поля катушек (3), намотанных на листы электротехнической стали (1), вследствие чего в системе наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции. К корпусу крепится крышка (5) с помощью четырех болтовых соединений, состоящих из гайки (12), шайбы (13) и болта (14). В крышку устанавливается втулка из антифрикционного материала, позволяющая штоку совершать поступательные движения. Манжета (6) не позволяет попасть пыли и другим инородным телам внутрь устройства. Верхний (4) и нижний (10) изоляторы экранируют электромагнитный узел от металлического корпуса, тем самым уменьшая потери. С помощью втулок (8) рекуператор крепится к раме автомобиля и балке подвески.

Рекуперативное устройство устанавливается так же, как амортизатор, и имеет ту же величину хода штока. В верхней части крепление производится к раме транспортного средства с помощью болтовых соединений, в нижней – к балке подвески также с помощью болтовых соединений.

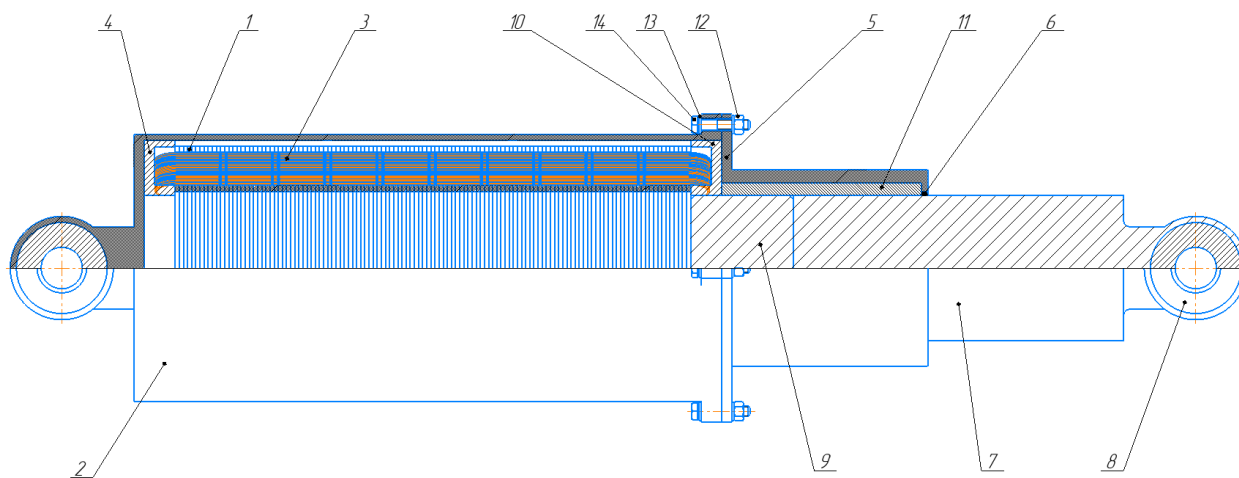


Рис. 1. Компоновочная схема линейного электромагнитного рекуператора:

1 – электротехническая сталь; 2 – корпус; 3 – катушка; 4 – верхний изолятор; 5 – крышка корпуса; 6 – манжета; 7 – шток; 8 – втулка крепления; 9 – магнит; 10 – нижний изолятор; 11 – втулка из антифрикционного материала; 12 – гайка; 13 – шайба; 14 – болт

Figure 1. Layout scheme of a linear electromagnetic recuperator:

1 – electrical steel; 2 – housing; 3 – coil; 4 – upper insulator; 5 – housing cover; 6 – cuff; 7 – rod; 8 – fastening sleeve; 9 – magnet; 10 – lower insulator; 11 – sleeve made of anti-friction material; 12 – nut; 13 – washer; 14 – bolt

Пример компоновочной схемы подвески транспортного средства с узлом рекуперации электрической энергии представлен на рис. 2.

Эффективность данного устройства заключается в следующем: уменьшаются затраты на генерацию электрической энергии для зарядки

аккумуляторных батарей, увеличивается плавность хода транспортного средства.

Для исследования рекуперации электрического тока необходимо определить скорость движения штока рекуператора, который в общем устройстве подвески является демпфирующим элемен-

том. Скорость движения штока можно определить по их математической модели, составленной по схеме, представленной на рис. 3.

Чтобы моделировать движение колеса в вертикальной плоскости, необходимо располагать информацией о силовых факторах, действующих на него в каждый момент времени. В общем случае на i -е колесо j -го борта действуют [12–13]:

- сила в i -м упругом элементе j -го борта $P_{yij}(h_{ij})$, Н;
- сила в i -м демпфирующем элементе j -го борта $P_{dij}(\dot{h}_{ij})$, Н;
- вес колеса $m_{ij}g$, кг и сила инерции $m_{ij} \frac{d^2 z_{ij}}{dt^2}$ Н;
- упругая $P_{y.kij}$, Н и демпфирующая $P_{d.kij}$, Н составляющие со стороны шины.

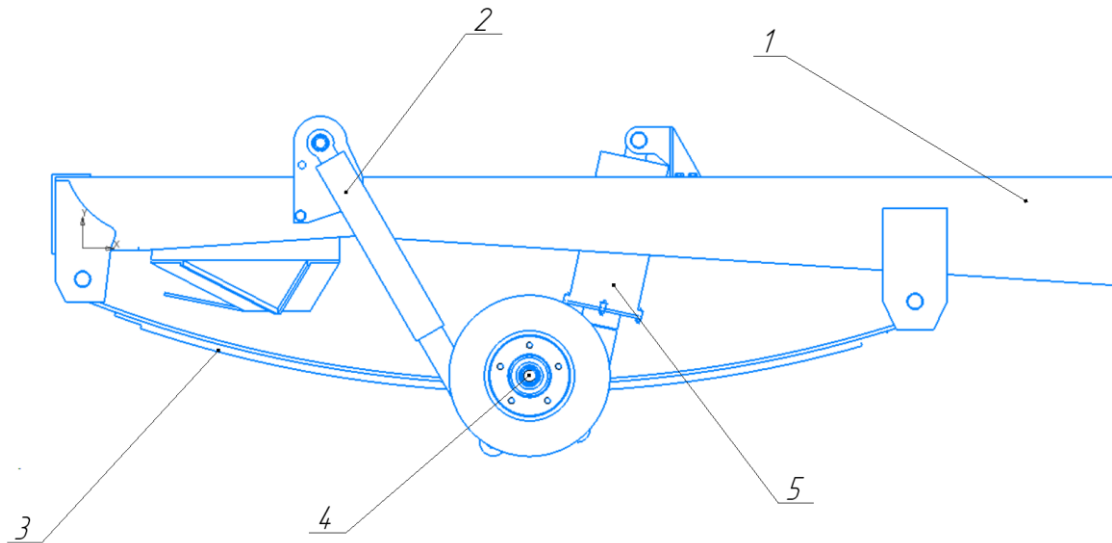


Рис. 2. Компонентная схема подвески транспортного средства со встроенным рекуператором:
1 – рама; 2 – амортизатор; 3 – комплект рессор; 4 – балка с установленным на ней поворотным кулаком; 5 – рекуперативное устройство
Figure 2. Layout scheme of a vehicle suspension with a built-in recuperator:
1 – frame; 2 – shock absorber; 3 – set of springs; 4 – beam with a mounted steering knuckle on it; 5 – recuperative device

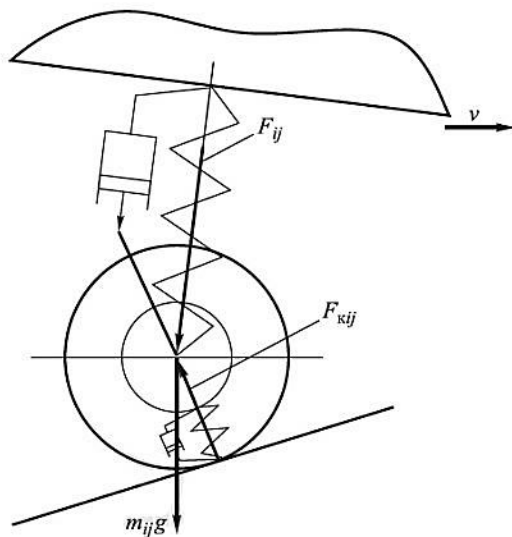


Рис. 3. Схема взаимодействия колеса с опорным основанием:
 v – скорость движения КМ; F_{ij} – сила в i -й подвеске j -го борта;
 F_{kij} – сила в i -м колесе j -го борта; $m_{ij}g$ – вес колеса
Figure 3. Scheme of wheel interaction with supporting base:
 v – speed of the vehicle; F_{ij} – force in the i -th suspension of the j -th side;
 F_{kij} – force in the i -th wheel of the j -th side; $m_{ij}g$ – wheel weight

Уравнение движения колеса имеет вид

$$m_{ij} \ddot{z}_{ij} = -P_{yij}(h_{ij}) - P_{dij}(\dot{h}_{ij}) + P_{y.kij}(h_{ij}) + P_{d.kij}(\dot{h}_{ij}) - m_{ij}g. \quad (1)$$

Упругие и демпфирующие характеристики подвески и шины будем задавать в виде зависимостей [14–15]:

- упругие характеристики как зависимость упругой силы от прогиба;
- демпфирующие характеристики как зависимость демпфирующей силы от скорости прогиба.

Электромагнитный рекуператор можно представить в виде схемы на рис. 4.

Для получения значений токов необходимо обычную трехфазную вращающуюся математическую модель генератора преобразовать в модель линейного генератора.

После преобразований Парка и Кларка получаем математическую модель силы тока линейного электромагнитного генератора:

$$I_{sd} = I_{s\beta} \sin \varphi + I_{s\alpha} \cos \varphi; \quad (2)$$

$$I_{sq} = I_{s\beta} \cos \varphi - I_{s\alpha} \sin \varphi, \quad (3)$$

где φ – угол между направлением движения генератора и продольной осью, рад; $I_{s\beta}$ – ток в неподвижной фазе поперечной оси, А; $I_{s\alpha}$ – ток в неподвижной фазе продольной оси, А.

Уравнение динамического равновесия статора, описывающее состояние электрической машины и представляющее равенство статорного напряжения совокупности ЭДС и падения напряжения на активном и реактивном сопротивлениях статорных обмоток [16–17]:

$$U_{Sq} = -E + I_s R_s + j\omega(\vec{I}_{sd} L_{sd} + \vec{I}_{sq} L_{sq}), \quad (4)$$

где U_{Sq} – вектор напряжения статора, В; I_s – вектор тока статора, А; ω – скорость вращения осей координат; j – мнимая единица; \vec{I}_{sd} и \vec{I}_{sq} – осевые составляющие тока статора, А; L_{sd} и L_{sq} – индуктивность статора по осям d и q , Гн; R_s – активное сопротивление статора, Ом.

Усилие, которое возникает в результате работы рекуператора и является демпфирующей силой, можно определить по формуле

$$F = \frac{IUt}{s}, \quad (5)$$

где U – величина постоянного напряжения, возникающего в рекуператоре, В; I – величина постоянного тока, А; t – время с начала работы устройства, с; s – расстояние, пройденное штоком рекуператора, м.

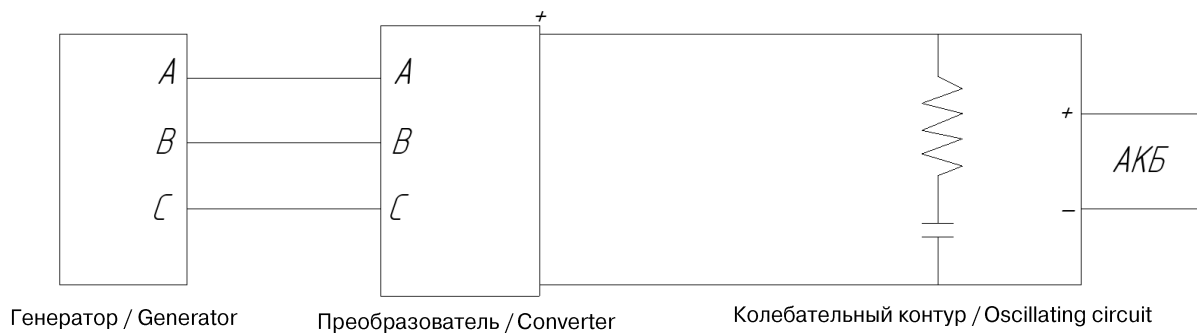


Рис. 4. Расчетная схема рекуперативной установки
Figure 4. Calculation scheme of the recuperative plant

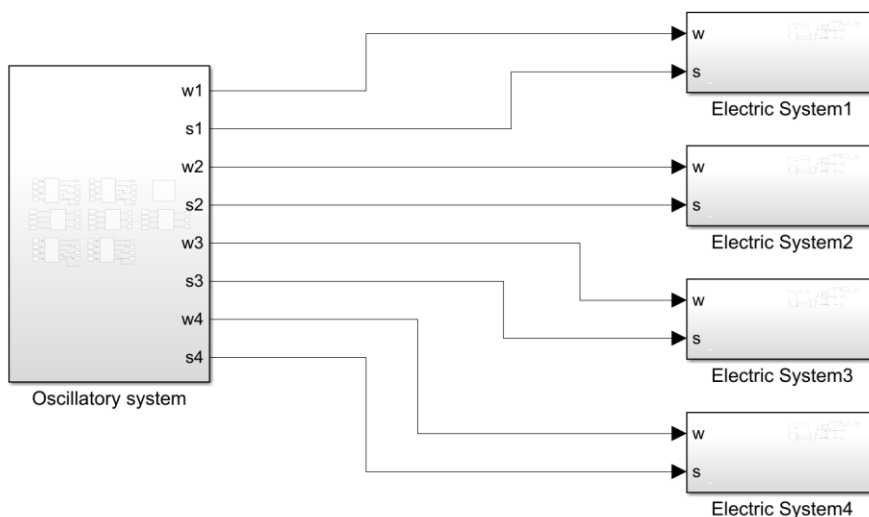


Рис. 5. Общая блок схема рекуперации электрической энергии
Figure 5. General block diagram of electrical energy recovery system

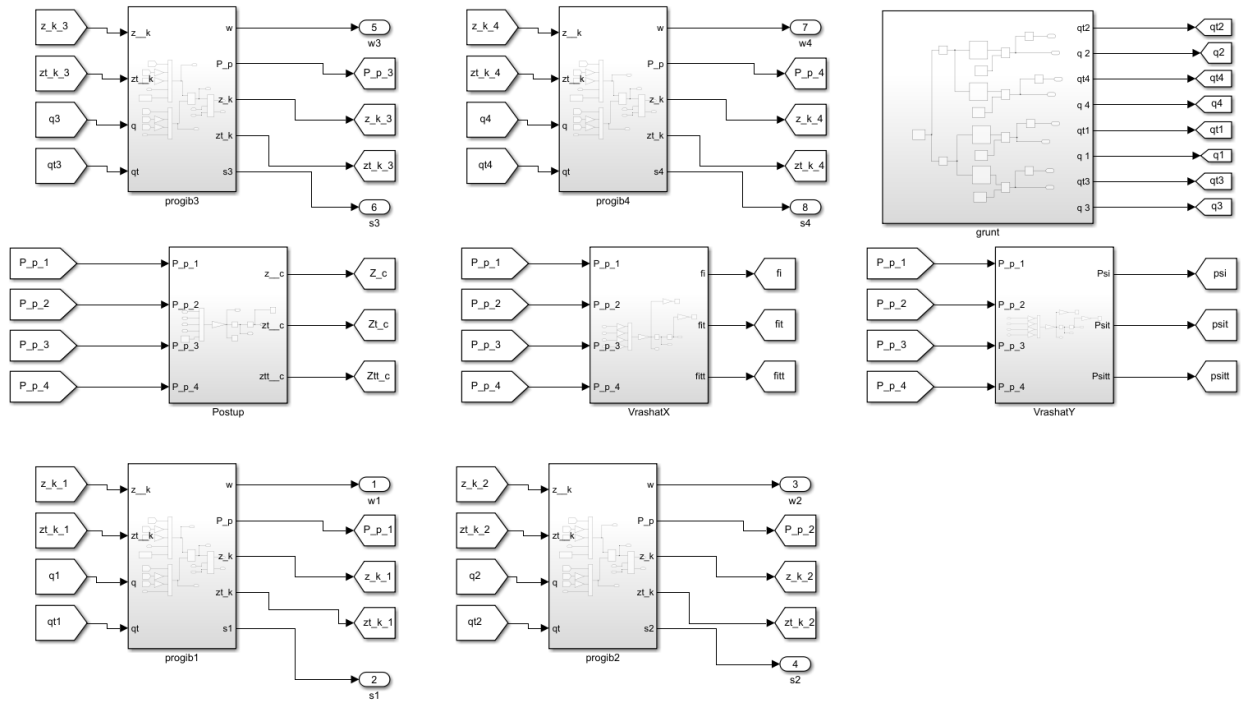


Рис. 6. Блок-схема колебаний транспортного средства
Figure 6. Block diagram of vehicle oscillation

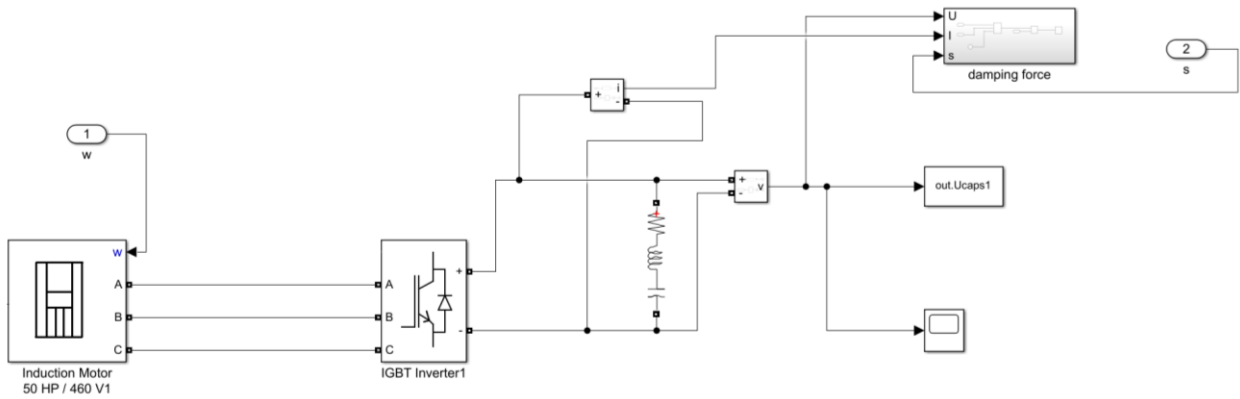


Рис. 7. Блок-схема рекуперативного устройства
Figure 7. Block diagram of a recuperative device

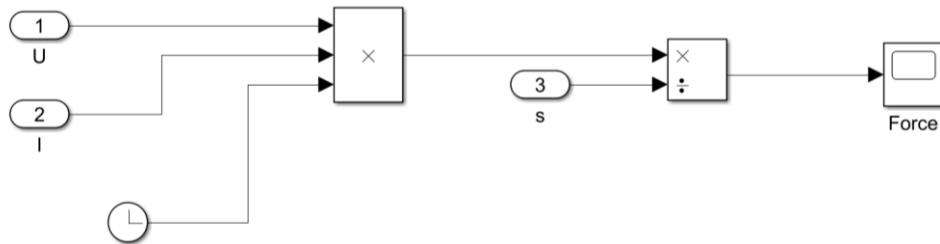


Рис. 8. Блок-схема демпфирующей силы рекуператора
Figure 8. Block diagram of the damping force of the recuperator

Имитационное моделирование в среде MATLAB Simulink позволяет на основе математической модели проводить всесторонние исследования разрабатываемой системы¹.

Общая блок схема рекуперации электрической энергии вследствие колебаний колес транспортного средства, созданная в среде MATLAB Simulink, представлена на рис. 5.

Блок определения скоростей движения штоков рекуператоров изображен на рис. 6, а блоки определения параметров рекуперации – на рис. 7–8.

2. Результаты и обсуждение

Результаты генерации электрической энергии при езде по разбитой грунтовой и по асфальтобетонной дорогам представлены на рис. 9 и 10 соответственно. Из сравнения полученных графиков видно, что при поездке по дороге с большим количеством неровностей амплитуда колебаний напряжения больше, чем при поездке по асфальтобетонной дороге, на 0,01 В. Среднее значение напряжения на одном рекуператоре составляет примерно 3,2 В, при использовании четырех рекуператоров суммарное напряжение составит около 12 В, что достаточно для зарядки аккумуляторов электродвигателя.

Рис. 11 демонстрирует результаты моделирования демпфирующей силы на рекуператоре. Величина демпфирующей силы на рекуператоре меньше, чем на амортизаторе, и, соответственно, плавность хода при замене амортизатора на рекуператор повысится, что видно на рис. 12 и 13. Из графиков можно сделать заключение, что период колебаний центра масс транспортного средства увеличился с 0,75 до 0,85 с, или на 12 %.

Результаты колебания центра масс транспортного средства без рекуператоров и при замене амортизаторов на рекуператоры представлены на рис. 12 и 13 соответственно. Колебания центра масс транспортного средства с рекуператорами, как это следует из рисунков, не имеют высокочастотные составляющие, что говорит о стабилизации процесса колебания центра масс транспортного средства.

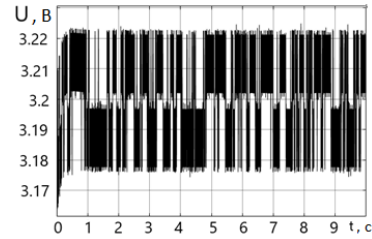


Рис. 9. Изменение напряжения на рекуперативном устройстве при поездке по разбитой грунтовой дороге
Figure 9. The results of voltage change on the recuperative device when driving on a broken dirt road

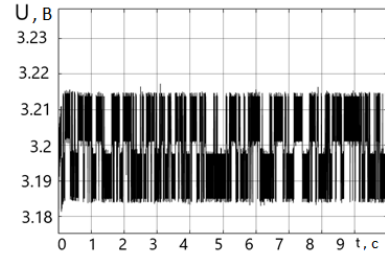


Рис. 10. Изменение напряжения на рекуперативном устройстве при поездке по асфальтобетонной дороге
Figure 10. The results of voltage change on the recuperative device when driving on an asphalt concrete road

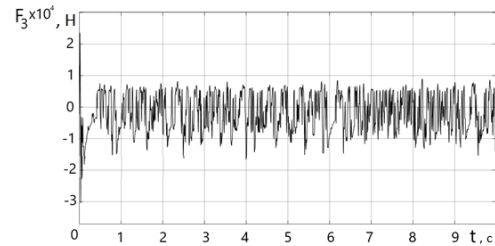


Рис. 11. Изменение демпфирующей силы на рекуператоре
Figure 11. Results of damping force on recuperator

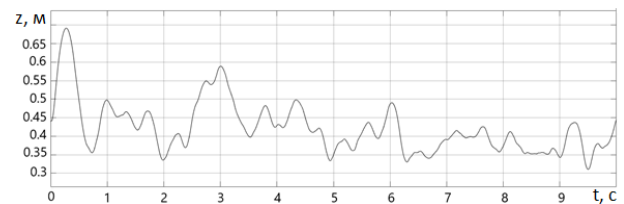


Рис. 12. Колебания центра транспортного средства масс без рекуператоров
Figure 12. The results of oscillation of the center of mass of the vehicle without recuperators

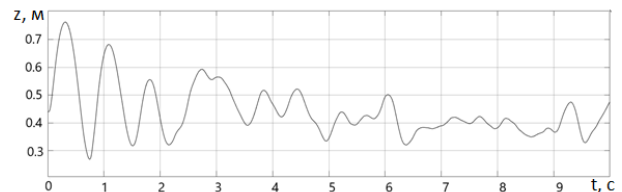


Рис. 13. Колебания центра масс транспортного средства с рекуператорами
Figure 13. The results of oscillation of the center of mass of the vehicle with recuperators

¹ MATLAB/Simulink. URL: <http://matlab.exponenta.ru> (дата обращения: 12.10.2022); MATLAB for Artificial Intelligence. URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения: 12.10.2022).

Заключение

Получены значения напряжения, генерируемого одним рекуператором электрического тока при движении транспортного средства по дорогам с различным дорожным покрытием. Кроме этого, получены значения демпфирующей силы на одном рекуператоре и колебания центра масс транспортного средства. Изменению подверглось только значение координаты опорной поверхности, другие параметры (электромагнитная индукция, масса транспортного средства, скорость движения) оставались одинаковыми для каждого опыта.

Сравнение результатов показало, что при поездке по дороге с большим количеством неровностей амплитуда колебаний напряжения больше, чем при поездке по асфальтобетонной дороге, на 0,01 В. Среднее значение напряжения на одном рекуператоре составляет примерно 3,2 В, при использовании четырех рекуператоров суммарное напряжение около 12 В, что достаточно для зарядки аккумуляторов для электродвигателя. Величина демпфирующей силы на рекуператоре больше, чем на амортизаторе, следовательно, плавность хода при замене амортизатора на рекуператор повысится, период колебаний центра масс транспортного средства увеличился с 0,75 до 0,85 с, что составило 12 %.

Список литературы

1. *Чижевский К.В., Сидоров В.Н., Лин З.Н.* Анализ международных ездовых циклов автомобиля // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 2 (58). С. 109–114.
2. *Becerra G., Alvarez-Icaza L., Flores De La Mota I., Mendoza-Soto J.L.* Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles // Applied Simulation and Optimization. 2017. Vol. 2. Pp. 185–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55810-3_7
3. *Cárcel-Carrasco J., Pascual-Guillamón M., Salas-Vicente F.* Analysis on the effect of the mobility of combustion vehicles in the environment of cities and the improvement in air pollution in Europe: a vision for the awareness of citizens and policy makers // Land. 2021. Vol. 10. P. 184. <https://doi.org/10.3390/land10020184>
4. *Insu C., Jongwon B., Junha P., Jinwook L.* Experimental evaluation and prediction algorithm suggestion for determining SOC of lithium polymer battery in a parallel hybrid electric vehicle // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 9. Article 1641. <https://doi.org/10.3390/app8091641>
5. *Чижевский К.В., Сидоров В.Н.* Конструктивные особенности современных гибридных силовых установок // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2019): сборник статей XI международной научно-технической конференции. Курск, 2019. С. 379–383.
6. *Раков В.А.* Исследование автопарка гибридных автомобилей // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. № 1 (31). С. 18–23.
7. *Hellgren J., Jonasson E.* Maximisation of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car // International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. 2007. Vol. 1. No. 1. Pp. 95–121. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2007.014449>
8. *Раков В.А.* Повышение энергетической эффективности гибридных двигателей с параллельной схемой расположения элементов // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: материалы международной научно-практической конференции. Воронеж, 2014. С. 118–123.
9. *Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Бурдюгов А.С.* Рекуперация энергии в подвеске транспортного средства // Знание. 2016. № 11–1 (40). С. 12–18.
10. *Стыров А.Е.* Подход к использованию рекуперации энергии в электромеханической активной подвеске транспортного средства // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 2 (80). С. 106–115.
11. *Посметьев В.И., Драпалюк М.В., Зеликов В.А.* Оценка эффективности применения системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 76 (2). С. 21–36.
12. *Заруцкий С.А., Власенко Е.А.* Автоматизация анализа данных экспериментальных исследований // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). С. 69.
13. *Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А., Сергеев П.С.* Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969. 707 с.
14. *Калачев Ю.Н.* Векторное регулирование, заметки практика: методическое пособие. М.: ЭФО, 2013. 63 с.
15. *Раков В.А.* Методика оценки технического состояния гибридных силовых установок автомобиля // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. № 2. С. 25–31.
16. *Куликов И.А., Селифонов В.В.* Математическое моделирование движения автомобиля с гибридной силовой установкой параллельного типа // Труды НАМИ. 2009. № 242. С. 67–84.

17. Черанёв С.В. Использование программного обеспечения для математического моделирования при проектировании автомобилей с гибридными силовыми установками // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 1. С. 116–120.

References

1. Chizhevskij KV, Sidorov VN, Lin ZN. Analysis of international driving cycles of motor vehicle. *Current Scientific Research in the Modern World*. 2020;(2):109–114. (In Russ.)

2. Becerra G, Alvarez-Icaza L, Flores De La Mota I, Mendoza-Soto JL. Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles. *Applied Simulation and Optimization*. 2017;2:185–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55810-3_7

3. Cárcel-Carrasco J, Pascual-Guillamón M, Salas-Vicente F. Analysis on the effect of the mobility of combustion vehicles in the environment of cities and the improvement in air pollution in Europe: a vision for the awareness of citizens and policy makers. *Land*. 2021;10(2):184. <https://doi.org/10.3390/land10020184>

4. Insu C, Jongwon B, Junha P, Jinwook L. Experimental evaluation and prediction algorithm suggestion for determining SOC of lithium polymer battery in a parallel hybrid electric vehicle. *Applied Sciences*. 2018;8(9):1641. <https://doi.org/10.3390/app8091641>

5. Chizhevskij KV, Sidorov VN. Design features of modern hybrid power plants. *Modern Automotive Materials and Technologies (SAMIT-2019): Collection of Articles of the XI International Scientific and Technical Conference*. Kursk; 2019. p. 379–383. (In Russ.)

6. Rakov VA. Hybrid car fleet research. *Transport na Alternativnom Toplivo*. 2013;(1):18–23. (In Russ.)

7. Hellgren J, Jonasson E. Maximization of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 2007;1(1):95–121. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2007.014449>

8. Rakov VA. Improving the energy efficiency of hybrid engines with a parallel arrangement of elements. *Alternative Energy Sources in Road Transport: Problems and Prospects of Rational Use: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Voronezh; 2014. p. 118–123. (In Russ.)

9. Kireev AV, Kozhemyaka NM, Burdyugov AS. Energy recovery in the suspension of the vehicle. *Znanie*. 2016;(11–1):12–18. (In Russ.)

10. Styrov AE. Approach to the use of energy recovery in electromechanical active vehicle suspension. *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*. 2015;(2):106–115. (In Russ.) <http://doi.org/10.17212/2307-6879-2015-2-106-115>

11. Posmetiev VI, Drapalyuk MV, Zelikov VA. Estimation of efficiency of application of system recovery of energy in car suspender. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2012;(76):21–36. (In Russ.)

12. Zarutsky SA, Vlasenko EA. Data analysis automation in experimental research. *Engineering Journal of Don*. 2018;(1):69. (In Russ.)

13. Vinogradov NV, Goryainov FA, Sergeev PS. *Design of electrical machines*. Moscow: Energiya Publ.; 1969. (In Russ.)

14. Kalachev YuN. *Vector regulation, practice notes*. Moscow: EFO Publ.; 2013. (In Russ.)

15. Rakov VA. Assessment methods of maintaining the technical condition of hybrid power plants vehicles. *Technology of Wheeled and Tracked Machines*. 2015;(2):25–31. (In Russ.)

16. Kulikov IA, Selifonov VV. Modeling and simulation of parallel type hybrid electric vehicle. *Trudy NAMI*. 2009;(242):67–84. (In Russ.)

17. Cheranov SV. Hybrid electric vehicle development with mathematical simulation software application. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2011;(1):116–120. (In Russ.)

Сведения об авторах

Лин Зар Ни, аспирант, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0000-0003-1839-3845, Scopus Author ID: 57936166500; zarnizn15@gmail.com

Скрынников Алексей Валерьевич, студент, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0006-2311-1936, eLIBRARY SPIN-код: 5982-4700; skryunnikovav@student.bmstu.ru

Чижевский Константин Владимирович, аспирант, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0002-8452-863X, Scopus Author ID: 57936166600, eLIBRARY SPIN-код: 4153-1097; konstantin201997@yandex.ru

Сидоров Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0004-0214-1373, Scopus Author ID: 57222472914, eLIBRARY SPIN-код: 6162-2659; sidorov-kaluga@yandex.ru

About the authors

Zar Ni Lin, postgraduate student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1839-3845, Scopus Author ID: 57936166500; zarnizn15@gmail.com

Alexei V. Skrynnikov, student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-2311-1936, eLIBRARY SPIN-code: 5982-4700; skrynnikovav@student.bmstu.ru

Konstantin V. Chizhevsky, postgraduate student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-8452-863X, Scopus Author ID: 57936166600, eLIBRARY SPIN-code: 4153-1097; konstantin201997@yandex.ru

Vladimir N. Sidorov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-0214-1373, Scopus Author ID: 57222472914, eLIBRARY SPIN-code: 6162-2659; sidorov-kaluga@yandex.ru