



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56
EDN: EXXABZ
УДК 629.331

Научная статья / Research article

Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой

З.Н. Лин , А.А. Попов , В.Н. Сидоров ✉, С.А. Голубина

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:

городской цикл, расход топлива, Matlab Simulink, выбросы углекислого газа

Аннотация. Увеличение автомобильного парка в мире и в том числе в России с одновременным стремительным ростом цен на топливо заставляет обратить внимание на снижение расхода топлива автомобилем. Одним из направлений, позволяющих снизить потребление углеводородного топлива, является использование автомобилей с электромеханическим приводом. Источником энергии на таких автомобилях служат двигатель внутреннего сгорания и электрический двигатель. Приводятся результаты исследования расхода топлива гибридным автомобилем при различных алгоритмах его управления. Использовались методы математического и имитационного моделирования. Рассматриваются данные расхода топлива при использовании различных алгоритмов включения бензинового двигателя внутреннего сгорания в зависимости от скорости движения автомобиля. Посредством имитационного моделирования установлено, что для обеспечения наибольшей экономии топлива необходимо, чтобы бензиновый двигатель запускался при достижении автомобилем скорости не ниже 60 км/ч, тогда расход топлива в условиях городского цикла уменьшается на 50 % в сравнении с режимом запуска бензинового двигателя при скорости 30 км/ч.

Для цитирования

Лин З.Н., Попов А.А., Сидоров В.Н., Голубина С.А. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 50–56. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

Optimization of the control algorithm for a vehicle with a hybrid power plant

Zar Ni Lin , Andrey A. Popov , Vladimir N. Sidorov ✉, Svetlana A. Golubina

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. Along with the rapid growth of fuel prices, the increase of car fleet in the world, including Russia, has focused on reducing fuel consumption by vehicles. One of the ways that can reduce the consumption of hydrocarbon fuels is to use vehicles with an electromechanical powertrain.



Keywords:

urban driving cycle, fuel consumption, Matlab Simulink, carbon dioxide emissions

The energy source for such vehicles is both an internal combustion engine and an electric motor. The results of a study of fuel consumption by a hybrid vehicle with various control algorithms are presented. The methods of mathematical and simulation modeling were used. Fuel consumption data is given when using various algorithms for turning on the gasoline internal combustion engine, depending on the vehicle speed. As a result of simulation modeling, it was found that in order to ensure the greatest fuel economy, it is necessary that the gasoline engine starts when the car reaches a speed of at least 60 km/h, then fuel consumption in the urban driving cycle is reduced by 50% compared to the gasoline engine start mode at a speed of 30 km/h.

For citation

Lin ZN, Popov AA, Sidorov VN, Golubina SA. Optimization of the control algorithm for a vehicle with a hybrid power plant. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):50–56. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

Введение

Автомобиль стал неотъемлемой частью современного общества. В России, согласно аналитическому агентству «Автостат», зарегистрировано более 45 млн легковых автомобилей¹, то есть почти каждый третий россиянин владеет автомобилем. В крупных городах автомобили являются причиной 80–90 % выбросов, которые загрязняют окружающую среду, что в несколько раз превышает долю выбросов промышленных предприятий. В связи с этим ужесточаются экологические нормы, предъявляемые к автомобилям [1]. Еще одной проблемой является ограниченность запасов нефтепродуктов. По оценкам экспертов, углеводородсодержащих продуктов в мире хватит не более чем на 60–70 лет добычи [2]. Таким образом, перед отраслью автомобилестроения стоит задача в уменьшении количества потребляемого топлива, а также переходе на другие виды энергии.

Один из путей решения данной проблемы – переход на гибридные автомобили. Применение гибридных автомобилей позволяет повысить топливную экономичность автомобиля в условиях городского ездового цикла путем оптимизации совместной работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электросилового устройства [3–4]. ДВС в основном используется при установившейся скорости движения, а при трогании и разгоне работает электродвигатель [5]. При торможении за счет рекуперации кинетической энергии происходит зарядка аккумуляторных батарей,

энергия которых используется электродвигателем при трогании и разгоне автомобиля [6].

Цель исследования – оценка расхода топлива гибридным автомобилем в л/100 км пути при различных алгоритмах управления гибридной силовой установкой в условиях городского цикла.

1. Материалы и методы

Применяются методы математического и имитационного моделирования. Модель транспортного средства разработана в среде MATLAB Simulink² и состоит из нескольких подсистем:

- подсистема ездового цикла, включающая контрольную скорость, с которой должно следовать транспортное средство. Эта подсистема является входом модели [7];
- модель транспортного средства и подсистемы модели колеса для расчета противодействующих сил и обновления скорости транспортного средства на каждом шаге моделирования;
- модель двигателя для расчета потерь энергии;
- модель трансмиссии для расчета тяговой силы с учетом потерь энергии при передаче крутящего момента от двигателя к ведущим колесам;
- модель электродвигателя и инвертора для расчета потерь энергии, учитывающая эффективность двигателя и инвертора;
- подсистема батареи, которая предназначена для расчета потребности в энергии от батареи [8];

¹ Статистика количества легковых автомобилей. URL: <https://www.autostat.ru/news/49197/> (дата обращения: 12.10.2022).

² 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).

– подсистема энергопотребления, предназначенная для расчета расхода топлива двигателем и энергопотребления электродвигателя [9–10].

Рис. 1 иллюстрирует модель транспортного средства, включая все вышеупомянутые подсистемы и взаимодействия между ними [11–12]. На рис. 2 представлен блок внешних сил.

Касательная сила тяги, создаваемая на колесах автомобиля за счет энергии, вырабатываемой двигателем внутреннего сгорания и электромотором, передаваемой через трансмиссию, тратится на преодоление всех сил сопротивления движению. К силам сопротивления относят-

ся: сила сопротивления качению, сила сопротивления воздушному потоку, сила сопротивления подъему и сила инерции.

$$F_t = F_f + F_w + F_a + F_j, \quad (1)$$

где F_t – касательная сила тяги, Н; F_f – сила сопротивления качению, Н; F_w – сила сопротивления воздушному потоку, Н; F_a – сила сопротивления подъему, Н; F_j – сила инерции, Н.

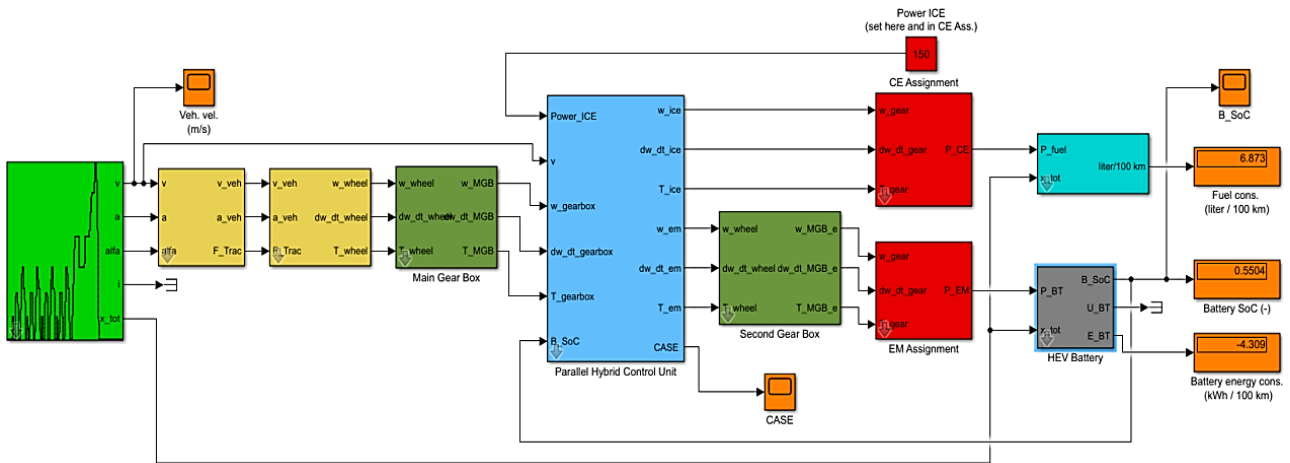


Рис. 1. Модель автомобиля с гибридной силовой установкой
Figure 1. Vehicle model with a hybrid power plant

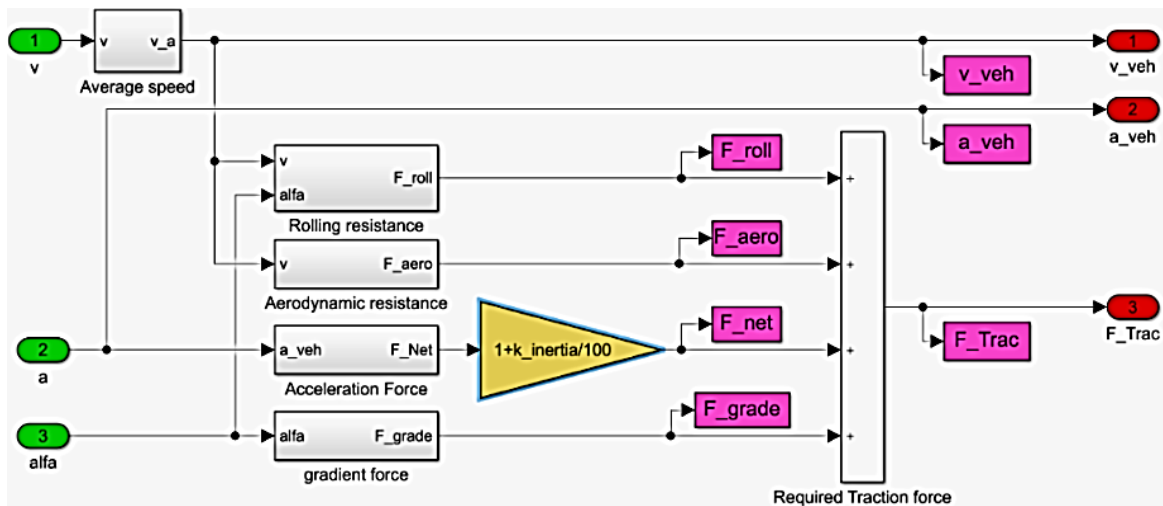


Рис. 2. Блок внешних сил
Figure 2. Block of external forces acting on the vehicle

Блок мощности двигателя (рис. 3), используемый в этом исследовании, представляет со-

бой картографическую модель расхода топлива двигателем внутреннего сгорания при макси-

мальной и минимальной нагрузках по мощности и крутящему моменту, в зависимости от угловой скорости двигателя.

Мощность двигателя определяется через часовой расход топлива и низшую теплоту его сгорания:

$$P_{CE} = m_f H_u \quad (2)$$

где P_{CE} – мощность двигателя, кВт; m_f – массовой часовой расхода топлива, кг/ч; H_u – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Блок определения расхода топлива (рис. 4) используется для определения расхода топлива с размерностью [л/100 км] через часовой расход топлива, плотность топлива и пройденный путь:

$$V_L = \frac{m_f}{\rho_f} \cdot \frac{100}{S}, \quad (3)$$

где m_f – массовой часовой расхода топлива, кг/ч; ρ_f – плотность топлива, кг/л; S – пройденный путь, км.

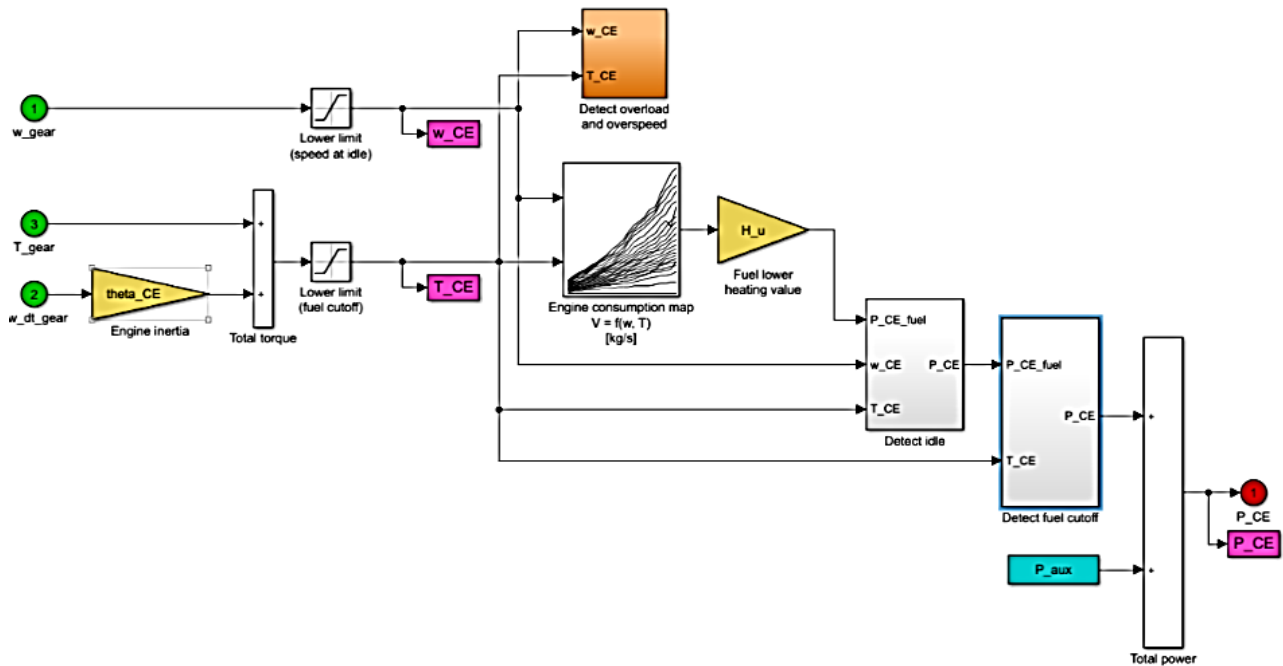


Рис. 3. Блок мощности двигателя
Figure 3. Engine power block

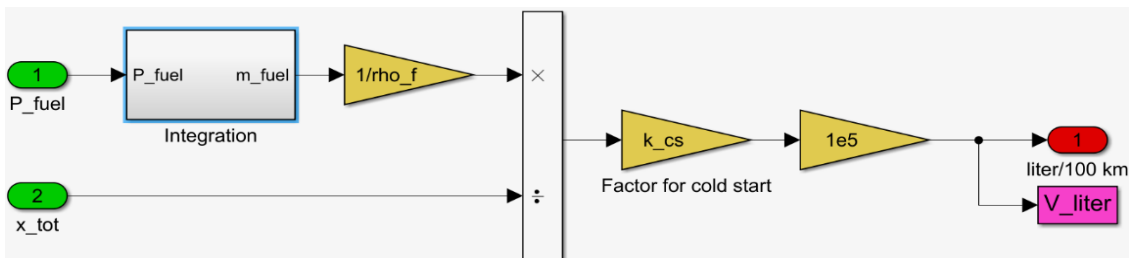


Рис. 4. Блок определения расхода топлива на 100 км пути
Figure 4. Block for determining fuel consumption in 100 km track

2. Результаты и обсуждение

В ходе проведения имитационного эксперимента автомобиль разогнался за счет электромотора, а двигатель внутреннего сгорания вклю-

чался при достижении различных скоростей движения автомобиля: 30, 45 и 60 км/ч. Изменению подвергался только порог скорости включения двигателя внутреннего сгорания, другие

параметры (крутящий момент и заряд батареи) оставались одинаковыми для каждого опыта.

На рис. 5 представлен график расхода топлива в л/100 км в режиме включения двигателя внутреннего сгорания на скорости 30 км/ч. При такой начальной скорости включения ДВС время работы двигателя в пределах городского цикла общей протяженностью 1800 с составило около 1000 с. Максимальный расход топлива – 6 л/100км.

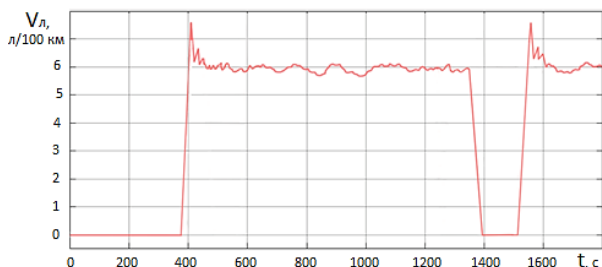


Рис. 5. График расхода топлива для режима включения ДВС на скорости выше 30 км/ч

Figure 5. Fuel consumption graph for the mode of turning on ICE at speeds above 30 km/h

График изменения расхода топлива в режиме включения двигателя внутреннего сгорания при скорости 45 км/ч представлен на рис. 6. Можно отметить, что увеличение порога включения ДВС на 15 км/ч привело к уменьшению работы двигателя в городском цикле примерно на 20 % и составило 800 с при том же максимальном расходе топлива.

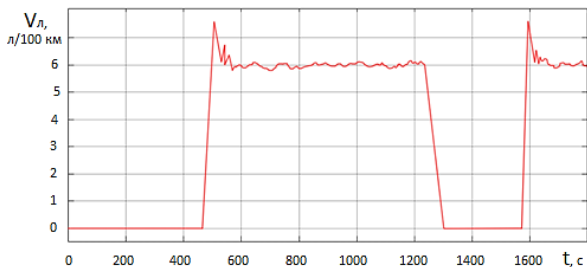


Рис. 6. График расхода топлива в режиме включения ДВС на скорости 45 км/ч

Figure 6. Fuel consumption graph for the mode of turning on ICE at a speed of 45 km/h

Как следует из рис. 7 дальнейшее увеличение порога включения ДВС до 60 км/ч снизило время работы двигателя еще на 30 % и составило всего 300 из 1800 с общего времени движения.

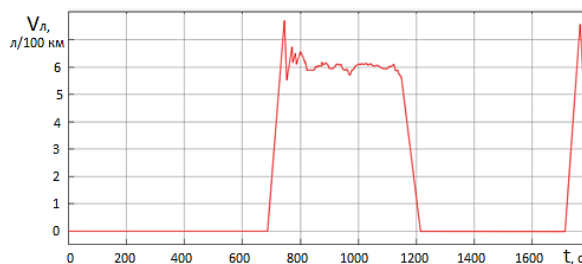


Рис. 7. График расхода топлива в режиме включения ДВС на скорости 60 км/ч

Figure 7. Fuel consumption graph for the mode of turning on ICE at a speed of 60 km/h

Средняя скорость движения в небольших городах составляет около 35 км/ч [10]. По результатам моделирования очевидно, что при запуске бензинового двигателя при скорости 30 км/ч большую часть времени в пределах города он будет работать с наибольшим расходом топлива и, соответственно, производить вредоносные выбросы CO_2 .

Если поднять порог включения ДВС до 45 км/ч, то обеспечивается экономия топлива на 20 %. Однако при движении в городе часто бывают ситуации, когда необходимо ускориться до 50–55 км/ч, в результате чего будет включаться ДВС и увеличивать общее число выбросов в атмосферу.

Для обеспечения наибольшей экономии топлива и минимизации выбросов CO_2 необходимо поднять порог включения ДВС до 60 км/ч. При таком использовании силовой установки количество топлива, которое расходует автомобиль, уменьшается на 50 % в сравнении с первым вариантом. Также за счет минимизации времени работы ДВС при движении в городе обеспечивается минимальное количество выбросов CO_2 в атмосферу, что способствует улучшению экологической ситуации в городе. Двигатель внутреннего сгорания целесообразно использовать при движении за городом, что позволяет увеличить дальность поездки, подзарядить батарею для электромотора и обеспечить сравнительно низкое потребление топлива.

Заключение

Получены значения расхода топлива при использовании в гибридном автомобиле различных алгоритмов управления запуском бензинового двигателя внутреннего сгорания. ДВС запускается при различных скоростях движения

автомобиля: 30, 45 и 60 км/ч. Изменению подвергался только порог скорости включения двигателя внутреннего сгорания, другие параметры (крутящий момент и заряд батареи) оставались одинаковыми для каждого опыта.

Сравнение результатов показало, что при запуске бензинового двигателя при скорости 30 км/ч более 50 % времени городского цикла он будет работать с наибольшим расходом топлива и производить вредоносные выбросы CO₂. Для обеспечения максимальной экономии топлива необходимо, чтобы бензиновый двигатель запускался при скорости не ниже 60 км/ч, тогда расход топлива автомобилем в городском цикла уменьшается на 50 % в сравнении с первым режимом – запуске бензинового двигателя при скорости 30 км/ч. Двигатель внутреннего сгорания целесообразно использовать при движении за городом, что позволяет увеличить дальность поездки, подзарядить батарею для электромотора и обеспечить сравнительно низкое потребление топлива на крейсерской скорости автомобиля.

Список литературы

1. *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. Issue 2. P. 184. <https://doi.org/10.3390/land10020184>

2. *Раков В.А.* Методика оценки технического состояния гибридных силовых установок автомобиля // *Технология колесных и гусеничных машин*. 2015. № 2. С. 25–31.

3. *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

4. *He H., Guo X.* Multi-objective optimization research on the start condition for a parallel hybrid electric vehicle // *Applied Energy*. 2018. Vol. 227. Pp. 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.082>

5. *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>

6. *Hellgren J., Jonasson E.* Maximization 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>

7. *Раков В.А.* Исследование автопарка гибридных автомобилей // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. № 1 (31). С. 18–23.

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. *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.

10. *Куликов И.А., Селифонов В.В.* Математическое моделирование движения автомобиля с гибридной силовой установкой параллельного типа // *Труды НАМИ*. 2009. № 242. С. 67–84.

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

12. *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.

References

1. *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>

2. *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.)

3. *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

4. *He H, Guo X.* Multi-objective optimization research on the start condition for a parallel hybrid electric vehicle. *Applied Energy*. 2018;227:294–303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.082>

5. *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>

6. Hellgren J, Jonasson E. Maximisation 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>

7. Rakov VA. Development of hybrid vehicle fleet. *Transport na Alternativnom Toplive*. 2013;(1):18–23. (In Russ.)

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. 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.)

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

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

12. 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.)

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

Попов Андрей Александрович, 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: 0009-0000-3423-8517; leonfn4@mail.com

Сидоров Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, 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

Голубина Светлана Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент 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: 0009-0007-0905-0329, Scopus Author ID: 57206665616, eLIBRARY SPIN-код: 5344-1957; asbina@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

Andrey A. Popov, student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-3423-8517, Scopus Author ID: 0009-0000-3423-8517; leonfn4@mail.com

Vladimir N. Sidorov, Doctor of Technical Sciences, Professor, 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

Svetlana A. Golubina, Ph.D of Technical Sciences, Associate Professor, Assistant 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: 0009-0007-0905-0329, Scopus Author ID: 57206665616, eLIBRARY SPIN-code: 5344-1957; asbina@yandex.ru