

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321355>

Оригинальное исследование



Разработка алгоритма работы электропривода электромобиля в городском цикле

Е.М. Климов¹, А.М. Фионов¹, Р.А. Малеев¹, С.М. Зуев²¹ Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;² Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение энергоэффективности электромобиля является одной из наиболее приоритетных задач на современном этапе развития транспорта. Как известно, химические источники тока в составе тяговых электроприводов транспортных средств обладают низкой удельной мощностью, низким КПД и высокой ценой, что препятствует развитию электромобильного транспорта.

Цель исследования. Выбор стратегии производства электромобилей на основе аккумуляторных батарей.

Методы и средства. При проведении исследований были использованы математические модели различных циклов движения транспортных средств: городской цикл по Правилам №83 ЕЭК ООН, *NEDC*, *WLTC*, *JC08*, *EPA HWFET*, что позволило подтвердить адекватность разработанной силовой структурной схемы электропривода.

Результаты. Разработана структурная схема тягового электропривода электромобиля с комбинированным источником электроэнергии, а также определён алгоритм её работы в городском цикле движения. В ходе выполнения работы была оценена эффективность электромобильного транспорта. Анализ показал, что транспортные средства исключительно с химическими источниками энергии на борту перспектив не имеют в виду неудовлетворительных технических параметров и потребительских свойств. Был проведён обзор ёмкостных накопителей энергии с целью определения возможности использования их как источников энергии на перспективных транспортных средствах. Исследование показало существенные преимущества ЕНЭ по многим параметрам. Для создания оптимальной конструкции был произведён анализ движения ТС в городском цикле. Выбрана схема электропривода, где основным источником энергии является литий-ионная ТАБ, а дополнительным — ёмкостный накопитель.

Заключение. Такое решение позволяет создать электропривод с оптимальными массогабаритными параметрами, увеличить срок службы накопителей энергии и запас хода без подзарядки транспортного средства. Кроме того, сочетание двух электрических НЭ и разработанный алгоритм их работы позволяет реализовать высокий КПД передачи энергии.

Ключевые слова: электротранспортное средство; тяговый электропривод; молекулярный накопитель энергии; городской цикл движения.

Как цитировать:

Климов Е.М., Фионов А.М., Малеев Р.А., Зуев С.М. Разработка алгоритма работы электропривода электромобиля в городском цикле // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 2. С. 137–145. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321355>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321355>

Original study article

Development of operation algorithm of electric drive of an electric vehicle in urban cycle

Egor M. Klimov¹, Anatoly M. Fironov¹, Ruslan A. Maleev¹, Sergey M. Zuev²¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;² MIREA-Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Increasing energy efficiency of an electric vehicle is one of the most relevant issues at the current state of transport development. It is known that chemical current sources used in traction electric drive of vehicles have low specific power, low efficiency and high cost that makes the electric transport development difficult.

AIMS: Making the choice of strategy of manufacturing of electric vehicle with batteries.

METHODS: The mathematical models of various vehicle driving cycles, such as: the UNECE Regulation 83 urban cycle, NEDC, WLTC, JC08, EPA HWEET were used in the study that made possible to confirm adequacy of the developed structural model of the electric drive.

RESULTS: The structural layout of the traction electric drive of an electric vehicle with combined energy source has been developed; the algorithm of its operation in the urban driving cycle has been defined. Electric transport efficiency was assessed during the study. The analysis showed that vehicles with solely chemical on-board energy sources do not have any prospects due to unsatisfactory technical properties and consumer attributes. Review of capacitors was performed in order to define the possibility of using them as energy source for next-generation vehicles. The study revealed sufficient advantages of capacitors in many respects. Analysis of vehicle motion in urban cycle was performed in order to develop the optimal design. The electric drive layout with a lithium-ion traction battery as the main energy source and a capacitor as the additional energy source was chosen.

CONCLUSIONS: This solution makes it possible to develop the electric drive with optimal mass and dimensional parameters, to increase service life of energy storage and mileage without recharging of a vehicle. In addition, the combination of two electric energy accumulators and the developed algorithm of their operation makes it possible to achieve high efficiency of energy transferring.

Keywords: *electric vehicle; traction electric drive; molecular energy storage; urban driving cycle.*

To cite this article:

Klimov EM, Fironov AM, Maleev RA, Zuev SM. Development of operation algorithm of electric drive of and electric vehicle in urban cycle. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(2):137–145. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321355>

Received: 14.03.2023

Accepted: 01.06.2023

Published online: 15.07.2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире наблюдается рост популярности электротранспортных средств, и за последние 5 лет их количество увеличилось более чем в три раза [1].

Электромобильный транспорт обладает множеством преимуществ, в первую очередь по сравнению с автомобильным [2, 3]:

- 1) отсутствие выбросов загрязняющих веществ;
- 2) возможность рекуперации энергии;
- 3) простота передачи энергии по проводам с минимальной массой вращающихся деталей;
- 4) снижение затрат на обеспечение жизненного цикла ТС не менее чем на 25%;
- 5) снижение уровня шума на 10...15%;
- 6) улучшение условий труда водителей за счёт упрощения управлением ТС;
- 7) практически исключается применение моторных масел, топлива и охлаждающей жидкости, что способствует охране почвы, грунтовых вод и зелёных насаждений.

Однако существует и ряд недостатков, препятствующих развитию электромобильного транспорта. Основным из них является низкая удельная энергия химических накопителей, которая не превышает 576 Дж/г у литий-ионных аккумуляторов, в то время как для бензина она равна 52,6 кДж/г [4]. Следовательно, электромобиль имеет существенно меньший запас хода по сравнению с автомобилем при равных массогабаритных параметрах. Кроме того, масса аккумуляторной батареи остаётся неизменной в процессе движения, в то время как масса топливного бака автомобиля уменьшается по мере расходования топлива.

Вторым существенным недостатком электрической тяги являются высокие затраты времени на заряд аккумуляторных батарей (АБ). Они могут быть оправданы только для специализированных предприятий (например, при эксплуатации электромобилей только в дневное время, а при заряде батарей — в ночное). Процесс пополнения энергии в химическом накопителе электромобиля при остаточной степени заряженности 25% длится не менее 8 часов [2], а для быстрого заряда большими токами требуется специальное оборудование. Однако это резко снижает ёмкость и ресурс АБ [5] (рис. 1).

Также ёмкость аккумулятора резко снижается при эксплуатации в условиях низких температур [5] (рис. 2).

Таким образом, выбор стратегии производства электромобилей на основе АБ был недостаточно продуман: аккумуляторные электромобили не выдерживают конкуренции с обычными автомобилями по техническим параметрам и удобству эксплуатации.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор стратегии производства электромобилей на основе АБ.

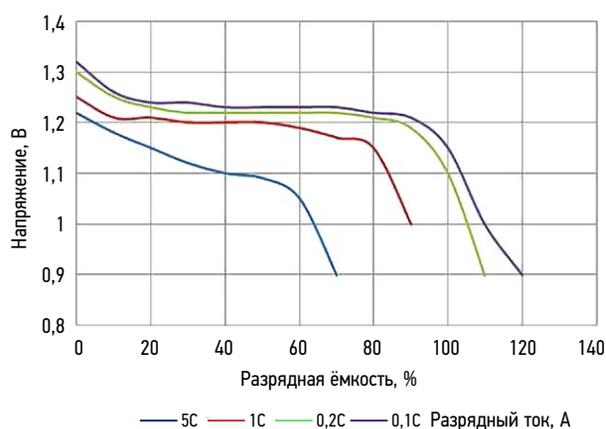


Рис. 1. Характеристики никель-кадмиевого аккумулятора при различных токах.

Fig. 1. Characteristic curves of a nickel-cadmium battery at various currents.

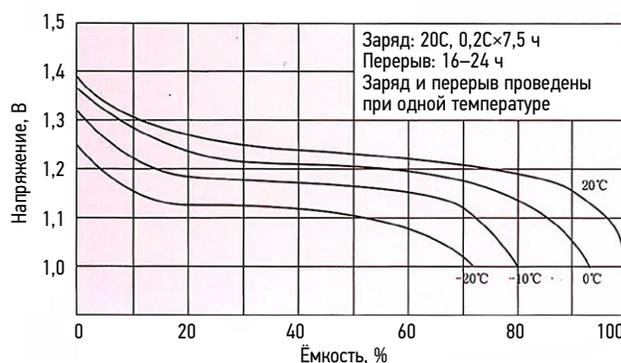


Рис. 2. Характеристики аккумулятора при различных температурах.

Fig. 2. Characteristic curves of a battery at different temperatures.

ОБЗОР И АНАЛИЗ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Обзор и анализ различных накопителей электрической энергии (НЭЭ) показали широкие перспективы использования молекулярных накопителей (МНЭ) в различных областях техники, в том числе тяговых электроприводах (ТЭП) транспортных средств (рис. 3).

Ёмкостные накопители (ЕНЭ) отличаются простотой конструкции, удобством в использовании, безопасностью, экологичностью, а самое главное — высокой удельной энергией и способностью быстро накапливать и отдавать запасённую энергию. ЕНЭ работоспособны при низких отрицательных температурах и способны выдерживать глубокие разряды, перезаряды и короткие замыкания. Срок службы, в частности, молекулярных накопителей (МНЭ) обеспечивает более 500 000 циклов заряда-разряда, что значительно больше, чем у аккумуляторов [6, 7].

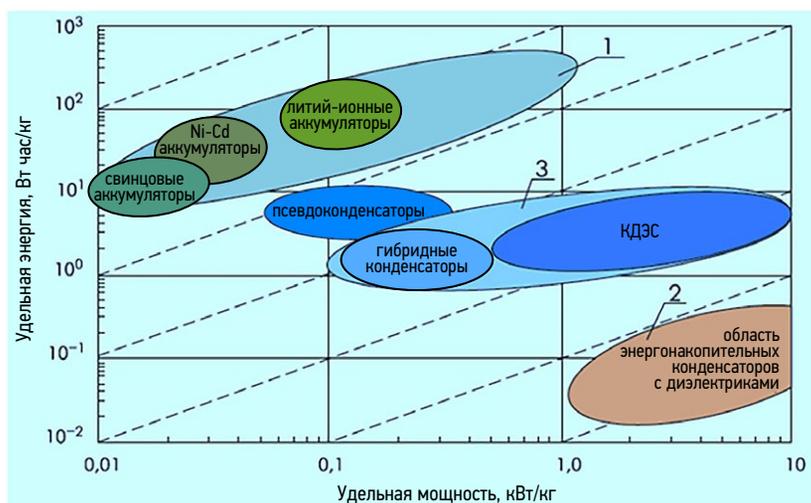


Рис. 3. Сравнение параметров различных НЭ: 1 — химические НЭ; 2 — электростатические и электролитические конденсаторы; 3 — молекулярные НЭ.

Fig. 3. Comparison of parameters of various electric energy accumulators: 1 — chemical; 2 — electrostatic and electrolytic capacitors, 3 — molecular.

Основными параметрами МНЭ являются [6]:

- время заряда-разряда: от миллисекунд до секунд;
- рабочая температура: от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- рабочее напряжение одного элемента: около 1 В (для жидких электролитов) и около 2–3 В (для органических электролитов);
- ёмкость: от 1 мФ до $>10,000\text{ Ф}$;
- срок службы: от 5000 до 50 000 часов (в зависимости от температуры и напряжения);
- импульсная нагрузка: до нескольких тысяч А.
- К числу недостатков МНЭ относятся [6]:
- относительно малое время разряда;
- относительно низкое напряжение одного элемента накопителя;
- повышенный саморазряд.

Анализируя свойства аккумуляторов и МНЭ, можно сделать вывод о целесообразности внедрения молекулярных накопителей в тяговые электроприводы транспортных средств с целью повышения их энергоэффективности. Параллельное включение АБ и МНЭ позволяет снизить токовую нагрузку на АБ, повышая тем самым эффективность работы ТЭП в целом.

Проведённый анализ показал большие перспективы использования электрической тяги на транспорте. Однако ни ёмкостный, ни химический НЭ не могут полноценно заменить углеводородное топливо по удельным параметрам.

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ В ГОРОДСКОМ ЦИКЛЕ

Решением данной проблемы может послужить сочетание нескольких источников энергии в приводе транспортного средства. Для конкретизации его структурной

схемы необходимо проанализировать цикл движения транспортного средства.

Для исследований транспортных средств на топливную экономичность принят цикл, указанный в правилах №83 ЕЭК ООН [9] и ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 [10]. Согласно правилам, цикл состоит из двух частей — городской и магистральной. Целесообразно рассматривать только первую часть городского цикла, представляющую наибольший интерес для анализа энергоэффективности транспортного средства.

Рассматриваемый цикл состоит из фаз разгона, равномерного движения, замедления и стоянки, общая его продолжительность составляет 195 с. Описание городского цикла представлено в графическом виде (рис. 4).

Кроме цикла по правилам №83 ЕЭК ООН, существуют и другие, используемые в науке для расчётов и испытаний автомобилей на энергоэффективность. Примеры таких циклов приведены на рис. 5а–д.

Проведём анализ городского цикла. Наибольшая мощность от источника энергии требуется на фазах разгона, т. к. транспортному средству необходимо преодолевать не только аэродинамическое и дорожное сопротивление, но и силу инерции, на которую приходится до 80% затрачиваемой мощности [4]. На фазах равномерного движения эта мощность относительно мала, а при замедлении имеется возможность рекуперации энергии.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Проведённый обзор и анализ (рис. 3) показали, что ёмкостные накопители энергии обладают высокой удельной мощностью, но относительно низкой удельной энергией, а химические НЭ имеют ровно

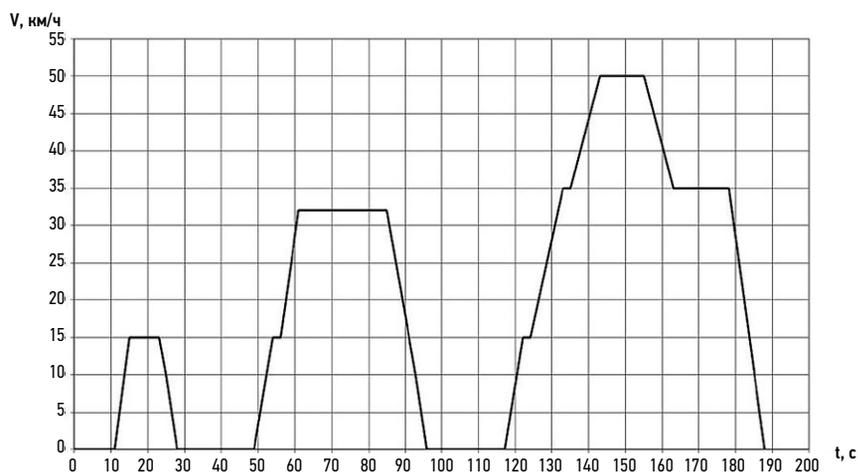


Рис. 4. Заданный городской цикл.

Fig. 4. The given urban cycle.

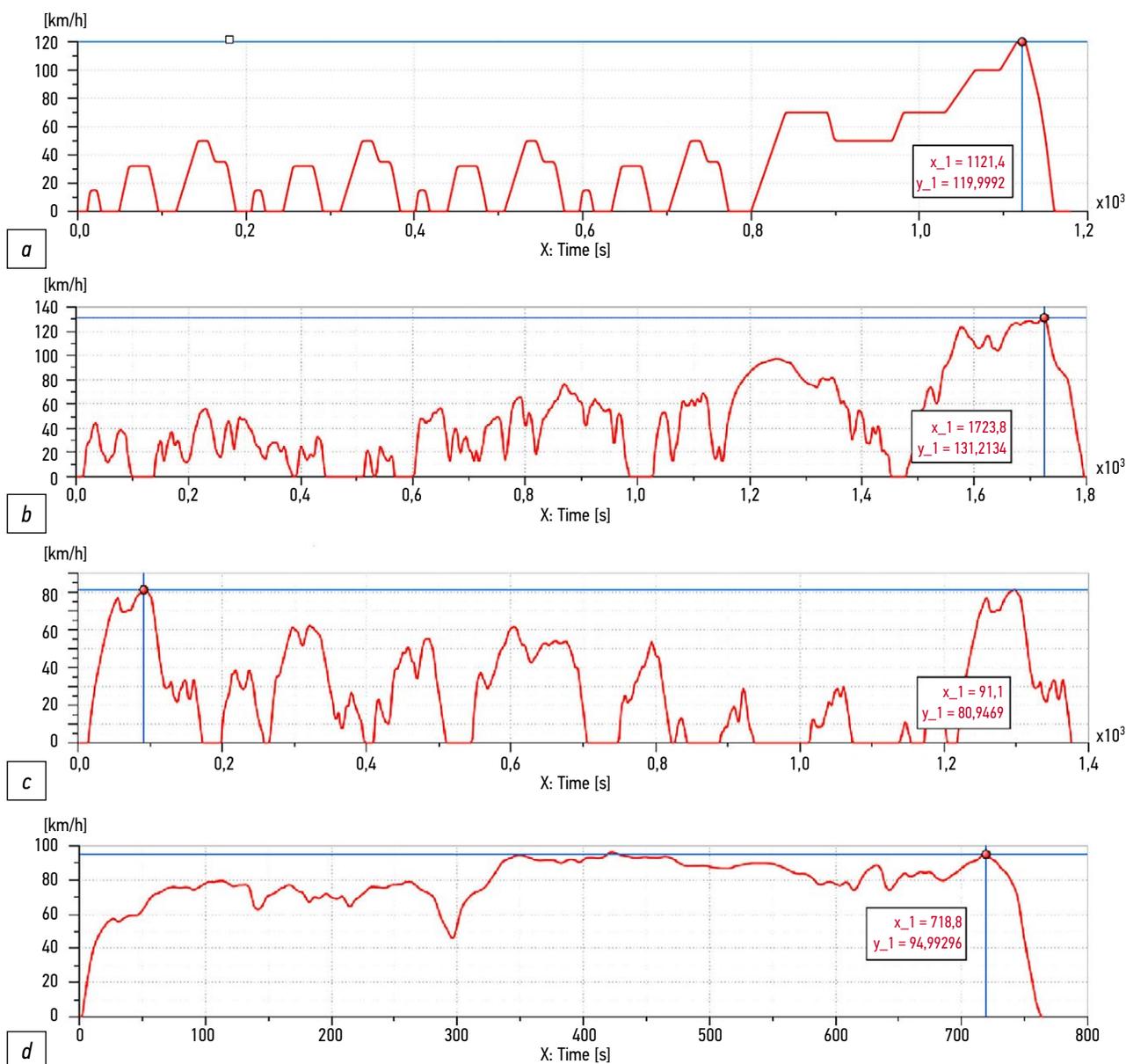


Рис. 5. Циклы движения: а — NEDC; б — WLTC; в — JC08; д — EPA HWFET.

Fig. 5. The driving cycles: a — NEDC; b — WLTC; c — JC08; d — EPA HWFET.

противоположные свойства. Таким образом, в режиме разгона, где требуется наибольшая мощность, оптимально подключать ЕНЭ в качестве источника энергии. В режиме равномерного движения и для оперативной подзарядки ЕНЭ на остановках целесообразно использовать литий-ионную аккумуляторную батарею (АБ). При торможении энергию рекуперации следует накапливать в ЕНЭ с целью:

- 1) оперативного заряда ЕНЭ для разгона ТС;
- 2) высокого КПД рекуперации;
- 3) снижения нагрузки на ТАБ.

Пополнение запасов энергии в ТАБ целесообразно производить с помощью внешнего зарядного устройства.

На рис. 6 представлен алгоритм работы электропривода ТС в городском цикле.

На рис. 7 представлена структурная схема силовой части электромобиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разрабатываемое ТС относится к категории электромобилей (рис. 8) [11].

В ходе выполнения работы была оценена эффективность электромобильного транспорта. Анализ показал, что транспортные средства исключительно с химическими источниками энергии на борту перспектив не имеют в виду неудовлетворительных технических параметров и потребительских свойств.

Был проведён обзор ёмкостных накопителей энергии с целью определения возможности использования их как источников энергии на перспективных транспортных средствах. Исследование показало существенные преимущества ЕНЭ по многим параметрам.

Для создания оптимальной конструкции был произведён анализ движения ТС в городском цикле.

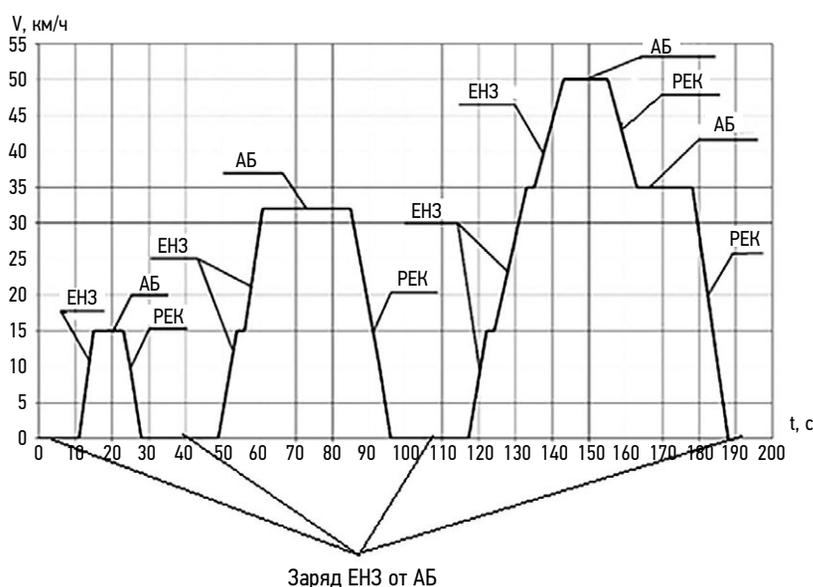


Рис. 6. Алгоритм работы электропривода ТС в городском цикле.

Fig. 6. The operation algorithm of electric drive of an electric vehicle in urban cycle.

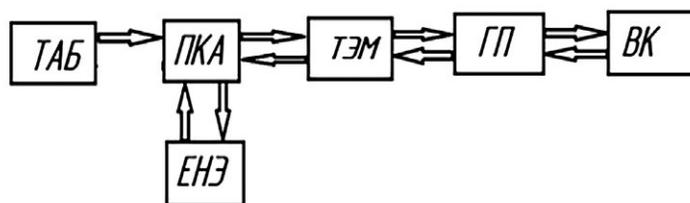


Рис. 7. Структурная схема силовой части электромобиля: ТАБ — тяговая аккумуляторная батарея; ПКА — преобразовательно-коммутационная аппаратура; ЕНЭ — ёмкостный накопитель энергии; ТЭМ — тяговая электрическая машина; ГП — главная передача; ВК — ведущие колёса.

Fig. 7. Structural layout of the electric vehicle drivetrain: ТАБ — a traction battery; ПКА — transforming and switching equipment; ЕНЭ — a capacitor; ТЭМ — a traction electric motor; ГП — an axle drive; ВК — driving wheels.

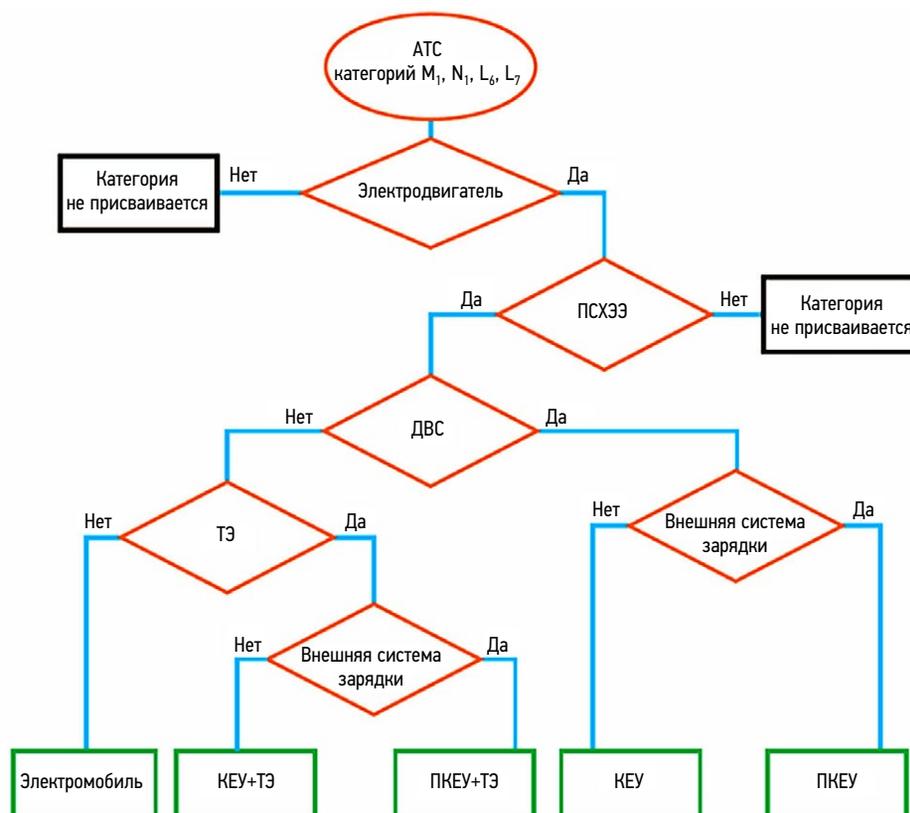


Рис. 8. Классификация электромобилей и автотранспортных средств (АТС) с комбинированными энергоустановками (КЭУ).
Fig. 8. Classification of electric vehicles and hybrid vehicles.

Выбрана схема электропривода, где основным источником энергии является литий-ионная ТАБ, а дополнительным — ёмкостный накопитель. Такое решение позволяет создать электропривод с оптимальными массогабаритными параметрами, увеличить срок службы накопителей энергии и запас хода без подзарядки транспортного средства. Кроме того, сочетание двух электрических НЭ и разработанный алгоритм их работы позволяет реализовать высокий КПД передачи энергии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Е.М. Климов — написание текста статьи; А.М. Фионов — экспертная оценка, поиск публикаций по теме статьи; Р.А. Малеев — утверждение финальной версии; С.М. Зуев — создание изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. E.M. Klimov — writing the text of the manuscript; A.M. Fironov — expert opinion, search for publications on the topic of the article; R.A. Maleev — approval of the final version; S.M. Zuev — creating images. The authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA – International Energy Agency. Latest news, commentaries and reports. Дата обращения: 14.03.2023. Режим доступа: <https://www.iea.org/>
2. Иванов С.А. Исследование использования суперконденсаторов в комбинированных энергоустановках транспортных средств: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2003.
3. Гусаков Н.В., Зверев И.Н., Карунин А.Л. и др. Конструкция автомобиля. Шасси. М.: МАМИ, 2000.
4. Хортов В.П. «Пламенный мотор» с электроконденсатором, или что сэкономит земной кислород // Техника – молодежи. 2000. № 4. С. 34–35.
5. Варыпаев В.Н., Дасоян М.А., Никольский В.А. Химические источники тока: уч. пос. для хим.-техн. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1990.
6. Поляков Н.А. Система электростартерного пуска транспортных средств с применением комбинированного источника электрической энергии: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2005.
7. Лавриков А.А., Малеев Р.А., Зуев С.М., и др. Математическое моделирование адаптера для выравнивания напряжений аккумуляторной батареи. Т. 1. М.: МГТУ «МАМИ». 2019. № 3(41). С. 57–66.
8. Закгейм Л.Н. Электролитические конденсаторы. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1954.
9. ГОСТ Р 41.83-99. (Правила ЕЭК ООН № 83). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении выбросов загрязняющих веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей. Добавление 82. Пересмотр 3. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294847/4294847005.htm>
10. ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011. Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Ч. 1. Электромобили. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/512/51232.pdf>
11. ГОСТ Р 59078-2020. Электромобили и автомобильные транспортные средства с комбинированными энергоустановками. Классификация. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75225.pdf>

REFERENCES

1. IEA – International Energy Agency. Latest news, commentaries and reports. Accessed: 14.03.2023. Available from: <https://www.iea.org/>
2. Ivanov SA. Issledovanie ispolzovaniya superkondensatorov v kombinirovannykh energoustanovkakh transportnykh sredstv [dissertation] Moscow; 2003. (In Russ).
3. Gusakov NV, Zverev IN, Karunin AL, et al. Car design. Chassis. Moscow: MAMI; 2000.
4. Hortov VP. "Fiery motor" with an electric capacitor, or what will save the earth's oxygen. Tekhnika – molodezhi. 2000;4:34–35. (in Russ.)
5. Varypaev VN, Dasoyan MA, Nikolsky VA. Chemical current sources: textbook for chemical-technical specialist. Moscow: Vysshaya shkola; 1990. (In Russ).
6. Polyakov NA. Sistema elektrostarternogo puska transportnykh sredstv s primeneniem kombinirovannogo istochnika elektricheskoy energii [dissertation] Moscow; 2005. (In Russ).
7. Lavrikov AA, Maleev RA, Zuev SM, et al. Mathematical modeling of an adapter for equalizing battery voltages. Vol. 1. Moscow: MGТУ «МАМИ». 2019;3(41):57–66. (In Russ).
8. Zackheim L.N. Electrolytic Capacitors. Moscow, Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo; 1954.
9. GOST R 41.83-99. (Pravila EEK ООН № 83). Edinoobraznye predpisaniya, kasayushchiesya ofitsialnogo utverzhdeniya transportnykh sredstv v otnoshenii vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v zavisimosti ot topliva, neobkhodimogo dlya dvigateley. Dobavlenie 82. Peresmotr 3. (In Russ). Available from: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294847/4294847005.htm>
10. GOST R EN 1986-1-2011. Avtomobili s elektricheskoy tyagoy. Izmerenie energeticheskikh kharakteristik. Ch. 1. Elektromobili. (In Russ). Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data/512/51232.pdf>
11. GOST R 59078-2020. Elektromobili i avtomobilnye transportnye sredstva s kombinirovannymi energoustanovkami. Klassifikatsiya. (In Russ). Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75225.pdf>

ОБ АВТОРАХ

* **Климов Егор Михайлович**,
инженер кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»;
адрес: Российская Федерация, 107023, Москва,
ул. Большая Семеновская, д. 38;
ORCID: 0009-0004-9739-0267;
e-mail: egormixalich71@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Egor V. Klimov**,
Engineer of the "Electrical Equipment and Industrial Electronics Department";
address: 38 Bolshaya Semyonovskaya street, 107023 Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0009-0004-9739-0267;
e-mail: egormixalich71@mail.ru

Малеев Руслан Алексеевич,

доцент, канд. техн. наук,
профессор кафедры «Электрооборудование и промышленная
электроника»;
ORCID: 0000-0003-3430-6406;
eLibrary SPIN: 7801-3294;
e-mail: 19rusmal@gmail.com

Фиронов Анатолий Михайлович,

доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры «Наземные транспортные средства»;
ORCID: 0000-0003-2683-9958;
eLibrary SPIN: 8824-5702;
e-mail: a.m.fironov@mospolytech.ru

Зуев Сергей Михайлович,

доцент, канд. ф-м. наук,
заведующий кафедрой «Электрооборудование
и промышленная электроника»;
ORCID: 0000-0001-7033-1882;
eLibrary SPIN: 6602-6618;
e-mail: sergei_zuev@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку

Ruslan A. Maleev,

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),
Professor of the Electrical Equipment and Industrial Electronics
Department;
ORCID: 0000-0003-3430-6406;
eLibrary SPIN: 7801-3294;
e-mail: 19rusmal@gmail.com

Anatoly M. Fironov,

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),
Associate Professor of the Land Vehicles Department;
ORCID: 0000-0003-2683-9958;
eLibrary SPIN: 8824-5702;
e-mail: a.m.fironov@mospolytech.ru

Sergey M. Zuev,

Associate Professor, Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Head of the Electrical Equipment and Industrial Electronics
Department;
ORCID: 0000-0001-7033-1882;
eLibrary SPIN: 6602-6618;
e-mail: sergei_zuev@mail.ru

* Corresponding author