

УДК 629.03

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

С. В. Бахмутов, д. т. н., проф. / С. В. Гайсин / К. Е. Карпунин, к. т. н. / А. С. Теренченко, к. т. н. /
Р. Х. Курмаев, к. т. н., доц. / Е. В. Зиновьев
ФГУП «НАМИ»

С конца семидесятых годов прошлого столетия мировое автомобильное сообщество уделяет большое внимание повышению энергоэффективности и снижению токсичности автомобильного транспорта. На протяжении последних двух десятилетий непрерывно увеличивается количество автомобилей с комбинированным приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электромотора, а также автомобилей с нулевой эмиссией, приводимых в движение одним или несколькими электромоторами, так называемых аккумуляторных электромобилей. Позитивной особенностью электромобильного транспорта является отсутствие вредных выбросов в зоне его использования, что позиционирует электромобили как экологически чистый вид транспорта, подходящий для использования в крупных городах, зонах отдыха, природоохранных зонах в качестве личного, коммерческого или коммунального транспорта. К тому же электромобили при работе издают минимум шума, что немаловажно, учитывая высокий уровень шумового загрязнения современных мегаполисов.

В развитых странах популяризацией «зелёного» транспорта занимаются как общественные организации, так и организации на уровне федеральных властей. Подобные программы, касающиеся создания инфраструктуры зарядных станций, реализуются и в нашей стране. К началу 2014 года на территории Российской Федерации зарегистрировано более 1 000 электромобилей. Активно ведётся строительство новых станций для зарядки. Помимо Москвы и Московской области, несколько зарядных станций имеются в Белгороде и Казани. Планируется реализация пилотных проектов по созданию зарядной инфраструктуры в Санкт-Петербурге, Калужской, Свердловской, Самарской, Белгородской и Саратовской областях, Ставропольском и Пермском краях. Компания ОАО «Московская объединённая электросетевая компания» (МОЭСК), первая в России, с 2011 года реализует в столичном регионе проект по развитию зарядной инфраструктуры для электротранспорта — «МОЭСК-EV». В 2012 году ОАО «МОЭСК» построило 28 пунктов зарядки в качестве эксперимента, уже сейчас в Москве и Московской области введены в эксплуатацию порядка 40 зарядных станций. В 2013 году компания запатентовала собственную модель «умной» зарядной станции, способной работать в интеллектуальной энергосети (Smart Grid). Промежуточные итоги проекта

«МОЭСК-EV» легли в основу принятой к исполнению Всероссийской программы развития зарядной инфраструктуры для электротранспорта на период до 2020 года. Разработаны проекты 13 законодательных документов по внесению необходимых изменений в существующее законодательство, разработаны проекты стандартов и требований к техническим регламентам для функционирования электромобилей. В планах у МОЭСК в течение следующих шести лет

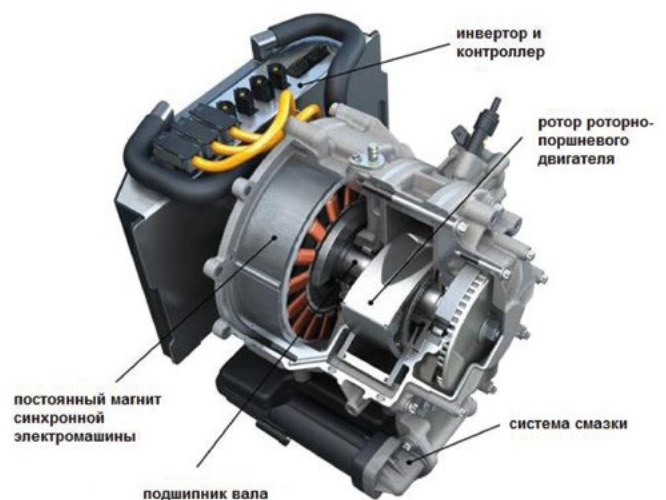


Рисунок 1. Составные элементы установки RE AVL

Таблица 1. Эксплуатационные характеристики химических источников энергии

Теоретические				Практические		
Тип батареи	V_{max}	Перенос заряда (Charge Transfer), А·ч/г	Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	V (номинальное)	Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	Удельная плотность энергии, Вт·ч/л
Свинцово-кислотный	2,1	0,12	252	2,0	35	100
Никель-кадмиевый (NiCd)	1,35	0,181	244	1,2	40	90
Никель-металлгидридный (Ni-MH)	1,35	0,178	240	1,2	80	220
Литий-никель-кобальтовый (Li-NiCo)	4,1	0,109	448	3,8	200	420
Литий-марганцевый	3,5	0,122	426	3,0	150	400
Литий-железо-фосфатный (LiFePO ₄)	3,65	0,111	405	3,4	115	255
Литий-титанатный (LiTiO)	2,8	0,09	252	2,5	75	150
Литий-серный (Li-S)	2,5	0,341	950	2,15	400	365
Натрий-металлхлоридный	2,6	0,22	572	2,5	120	190
Воздушно-цинковый	1,6	0,82	1 312	1,2	400	900
Магний-воздушный	3,1	2,2	6 820	1,4	800	1 390
Литий-воздушный	3,4	3,68	13 100	2,7	2 500	3 750

построить 2 260 зарядных станций и 310 комплексов для экспресс-замены батарей.

При создании энергоэффективного автотранспорта повышенное внимание уделяется снижению энергозатрат на преодоление сопротивлений движению, главными из которых являются сила сопротивления качению, сила инерции автомобиля при разгоне и сила аэродинамического сопротивления. Учитывая условия эксплуатации электромобиля в современном мегаполисе с высокой плотностью движения и частыми циклами «разгон — торможение», наличие большого аккумулятора неэффективно с точки зрения указанных потерь. Рекуперативное торможение, которое применяется в современных транспортных средствах на электротяге, при движении в описанных условиях не обеспечивает баланса между затрачиваемой энергией на разгон автомобиля и пополняемой при торможении. Хотя современные аккумуляторы обладают лучшими удельными характеристиками по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами (табл. 1), электромобили всё ещё уступают традиционным автомобилям по соотношению полной массы и перевозимой полезной нагрузки.

Один из ключевых недостатков, препятствующих повсеместному использованию электромобилей, — это ограниченный диапазон их действия. Существующую проблему трудно решить увеличением ёмкости аккумуляторной батареи, так как это приводит к удорожанию транспортного средства (ТС) и увеличению массы, что, в свою очередь, увеличивает расход энергии на преодоление сил сопротивления движению. К тому же большой аккумулятор имеет продолжительное время заряда (до семи-восьми часов).



Рисунок 2. Установка RE KSPG

Климатические условия нашей страны являются одними из самых суровых. Российская Федерация имеет обширные территории и большие расстояния между административными центрами. Присущие электромобилю недостатки, наложенные на климатические особенности нашей страны, обостряют проблемы, препятствующие популяризации электромобильного транспорта.

На дорогах автополигона ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» (Центра испытаний «НАМИ») проводились испытания электромобиля Nissan Leaf (Япония) [1]. Целью экспериментальных исследований было определение влияния погодных условий на запас хода электромобиля Nissan Leaf (по данным производителя, продолжительность пробега на одном заряде электромобиля Nissan Leaf составляет 160 км). На снижение запаса хода электромобиля влияют следующие факторы: температура окружающей среды и дорожные условия. Результаты исследований показали, что понижение температуры окружающей среды с +25 до -7 °С вызывает уменьшение запаса хода на 9 % и на 44 % соответственно при выключенных и включённых по-



Рисунок 3. Конструктивные особенности установки RE KSPG

Рисунок 4. Исполнения установки RE MAHLE

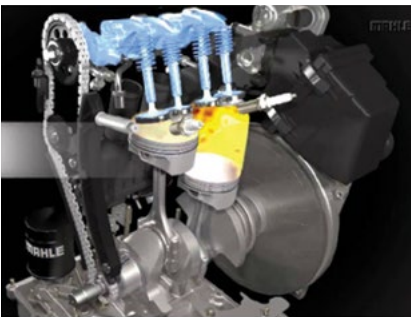
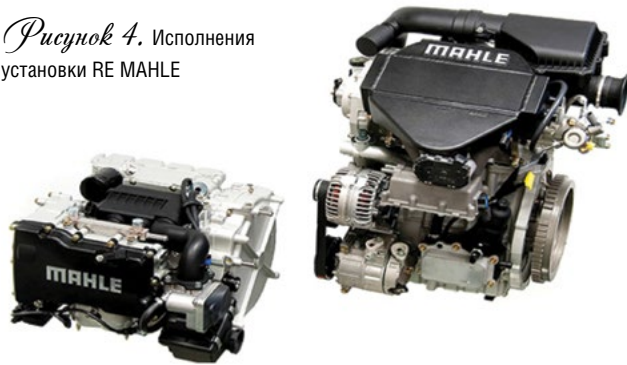


Рисунок 5. Конструктивные особенности установки RE MAHLE

требителях энергии. При движении по рыхлому снегу запас хода на 14 % меньше, чем при движении по сухому асфальту. Немаловажный фактор, влияющий на снижение пробега, — это повышенное потребление энергии в зимний период эксплуатации, обусловленное необходимостью отопления пассажирского пространства, а также увеличение длительности освещения из-за непродолжительного светового дня. По данным испытаний, при включённых потребителях и при отрицательных температурах запас хода электромобиля составляет не более 50 км.

Анализируя результаты, полученные в ходе испытаний, можно выявить следующее:

1. Выпускаемый и продаваемый электромобильный транспорт в России не удовлетворяет условиям эксплуатации.

2. Требуется существенное увеличение автономности электромобильного транспорта.

Ведущие мировые автопроизводители и исследовательские организации автомобильной промышленности, зная об этих проблемах, делают упор на создание различных систем комбинированных энергоустановок, повышение энергоэффективности существующих КЭУ и улучшение алгоритмов управления.

Данное теоретическое исследование посвящено системам Range Extender, которым в последние годы уделяют повышенное внимание как исследователи, так и производители автокомпонентов.

Термин Range Extender (RE) дословно переводится как расширитель диапазона, в рассматриваемом случае это система, позволяющая увеличить пробег электромобиля без остановки на станции подзарядки. Система Range Extender — это модульная генераторная установка малой мощности на базе ДВС малой размерности, применяемая для увеличения пробега транспортных средств на электротяге без подзарядки, или, другими словами, расширения диапазона их действия (пробега). Электрическое транспортное средство с системой Range Extender фактически представляет собой электромобиль с комбинированной энергоустановкой, построенной по последовательной схеме, с тем отличием, что Range Extender является модульной самодостаточной энергоустановкой. В состав системы Range Extender входят один двигатель внутреннего сгорания и одна или две электрические машины. Коленчатый вал ДВС непосредственно или через передачу связан с электрической машиной, а вся установка управляется электронным блоком управления.

В международных источниках научно-технической информации электромобиля, оснащённые описанной выше системой, классифицируются как Range Extender Electric Vehicle (REEV) или Extender Range Electric Vehicle (EREV).

Ниже приведён обзор существующих аналогов рассматриваемой системы. Задача инженеров заключается в создании компактной бесшумной конструкции, что повлекло за собой появление оригинальных компоновочных схем КЭУ.

Компания AVL (Австрия) — авторитетная исследовательская организация, занимающаяся созданием испытательного оборудования и программных продуктов, — при разработке системы Range Extender в качестве источника энергии применила односекционный роторно-поршневой двигатель (РПД) рабочим объёмом 254 см³. На рис. 1 изображён Range Extender фирмы AVL.

Благодаря применению РПД достигнуты минимальные размеры установки (490 × 400 × 980 мм)

и масса 65 кг, а максимальная мощность установки достигает 18 кВт при 5 000 об/мин, удельный расход топлива — 260 г/кВт·ч.

Все функции Range Extender интегрированы в едином модуле, который спроектирован таким образом, чтобы минимизировать число сопряжений или контактов с автомобилем. Двигатель внутреннего сгорания, генератор и электронные системы управления объединены в единый агрегат, что даёт возможность обеспечить компактность, малый вес и снизить стоимость системы.

Модульный принцип построения также позволяет уменьшить количество элементов в системе и обеспечить их высокую унификацию для различных значений рабочих параметров и областей применения.

Другой пример компоновки Range Extender, разработанный компанией KSPG AG (Германия), представлен на рис. 2. На рис. 3 изображены конструктивные особенности модуля RE KSPG. Двухцилиндровый V-образный (90°) ДВС объёмом 799 см³ приводит через цилиндрическую одноступенчатую передачу две электромашины мощностью 15 кВт каждая, работающие в режиме генератора. Электромашины также осуществляют функцию балансировки инерционных моментов, возникающих при работе ДВС.

Конструкция, представленная компанией KSPG, имеет компактный вертикальный размер, а электромашины, взаимно уравнивающие друг друга во время работы, позволили достичь минимального уровня шума и вибраций. Максимальная мощность — 30 кВт при 4 500 об/мин, масса — 62 кг, габаритные размеры установки — 665 × 550 × 355 мм. Особенности конструкции представлены на рис. 3.

Ещё один всемирно известный производитель автомобильных компонентов и компонентов двигателей внутреннего сгорания — компания MAHLE — представил своё видение системы Range Extender.

Модуль MAHLE существует в двух исполнениях: вертикальностоящий и горизонтальнолежащий (рис. 4). Система Range Extender состоит из двухцилиндрового рядного ДВС объёмом 900 см³. Электромашина непосредственно приводится от коленчатого вала ДВС. Ротор электромашины выполняет роль маховика (рис. 5). Максимальная мощность, вырабатываемая установкой MAHLE, составляет 15 кВт при 2 000 об/мин, вес установки Range Extender — 65 кг, габаритные размеры — 327 × 416 × 481 мм, удельный расход топлива — 240 г/кВт·ч.

Помимо традиционных компоновочных схем теплового двигателя, ведутся разработки системы Range Extender на основе свободнопоршневого двигателя с линейным генератором (рис. 6).

В настоящее время многие известные производители автомобильной техники и автомобильных комплектующих, такие как BMW, Volvo, Audi, Bosch, MAHLE, AVL, GETRAG и многие другие, заняты разработкой и совершенствованием систем Range Extender.

Существует несколько компоновочных схем электромобиля с системой Range Extender. На рис. 7 представлена схема автомобиля Audi AVL.

Как показано на рис. 7, блок системы Range Extender расположен в задней части автомобиля, над осью, на месте запасного колеса. Блоки аккумуляторной батареи установлены в центральном туннеле кузова под полом и под задним сиденьем и занимают компоновочное пространство топливного бака серийного автомобиля. Также за задним сиденьем расположен топливный бак ДВС установки Range Extender.

Такая компоновка агрегатов позволяет достичь хорошей развесовки автомобиля и оптимального расположения центра тяжести, а также сохранить обитаемый объём кузова. Существенным достоинством предложенного решения является высокая унификация конструкции электромобиля с серийным автомобилем Audi A1.



Рисунок 6. Система Range Extender на основе свободнопоршневого двигателя с линейным генератором

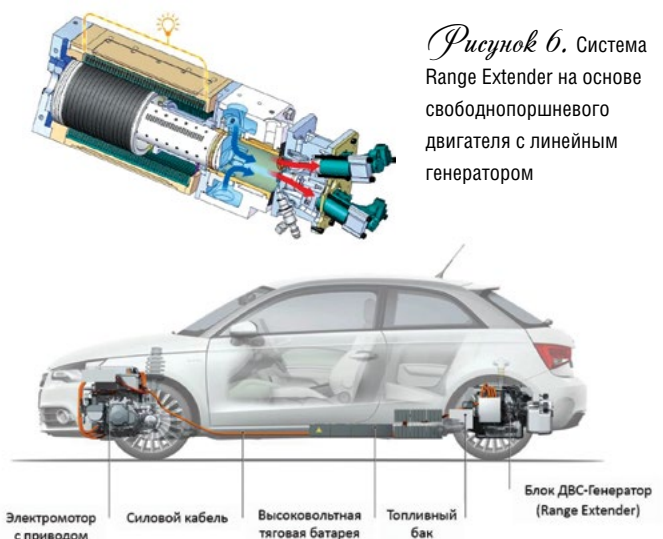


Рисунок 7. Компоновка электромобиля Audi AVL



Рис. 8. Компонировка электромобиля Audi MAHLE



Рис. 9. Компонировка электромобиля Fiat 500 с установкой RE KSPG

Пример другой компоновочной схемы представила компания MAHLE, которая, как и фирма AVL, в качестве агрегатоносителя использовала электромобиль Audi e-tron на платформе A1. В рассматриваемом конструктивном решении (рис. 8) установка RE смонтирована в подкапотном пространстве на стандартных установочных опорах ДВС.

Данное решение позволяет избежать проблем, связанных с дополнительной вибро-, шумо- и теплоизоляцией моторного отсека, а также подводом воздуха к ДВС, в отличие от схемы с задним расположением двигатель-генераторного блока RE.

Немецкая фирма KSPG для постройки электромобиля на базе Fiat 500 с системой Range Extender применила компоновочную схему, подобную схеме Audi AVL. Как и у AVL, модуль RE расположен под полом багажного отделения. Отличительной особенностью является то, что на электромобиле Fiat 500 источником энергии служит двухцилиндровый ДВС, расположенный горизонтально (рис. 9).

На рис. 10 показана конструкция Range Extender фирмы KSPG.

Ярким примером модульной концепции постройки электромобиля с системой Range Extender является серийно выпускаемый электромобиль i3 от автопроизводителя BMW.

Конструктивная схема электромобиля BMW представлена на рис. 11. В центральной части рамы под полом кузова установлена аккумуляторная батарея. Электромотор расположен над задней осью, которая является ведущей. Привод осуществлён через одноступенчатый редуктор. Модульная конструкция позволяет достичь высокой технологичности сборки электромобиля.

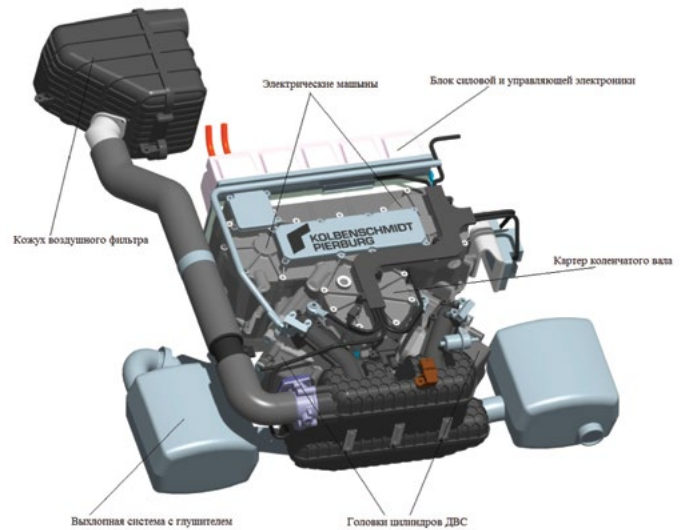


Рис. 10. Конструкция установки RE KSPG

Система Range Extender является дополнительной опцией, которой по желанию владельца может оснащаться электромобиль. В моторном отсеке кузова предусмотрено компоновочное пространство для расположения блока «ДВС — генератор». На рис. 13 показана компоновка силового привода.

Конструкция электромобиля фирмы BMW обладает высокими эксплуатационными характеристиками и позволяет обеспечить наилучшую доступность узлов и агрегатов, входящих в состав силовой установки, что благоприятно сказывается на ремонтопригодности транспортного средства. Конструкция кузова, разработанного для электромобиля, позволяет рационально расположить компоненты привода и тягового модуля, обеспечив максимальный обитаемый объём и пространство для перевозки багажа.

Система Range Extender для электромобиля BMW i3 построена на базе мотоциклетного мото-

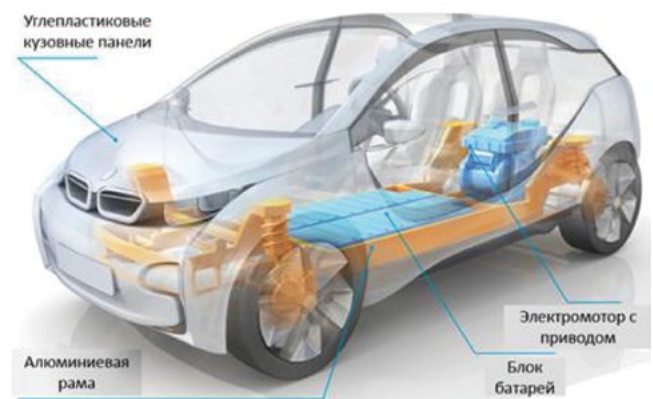


Рис. 11. Компонировка электромобиля BMW i3

Рисунок 12.
Конструкция кузова
электромобиля
BMW i3



ра BMW, поставляемого фирмой Кутсо (Тайвань) (рис. 14), представляющего собой двухцилиндровый рядный ДВС объёмом 647 см³ и мощностью 25 кВт при 4 300 об/мин.

Повышенный интерес ведущих автопроизводителей, фирм, разрабатывающих автомобильные компоненты, и исследовательских организаций позволяет сделать вывод, что автомобили, созданные по технологии Range Extender, являются перспек-



Рисунок 14. Установка RE фирмы Кутсо для BMW i3



Рисунок 13. Компонировка моторного отсека: а) без системы Range Extender; б) с блоком «ДВС — генератор» системы Range Extender

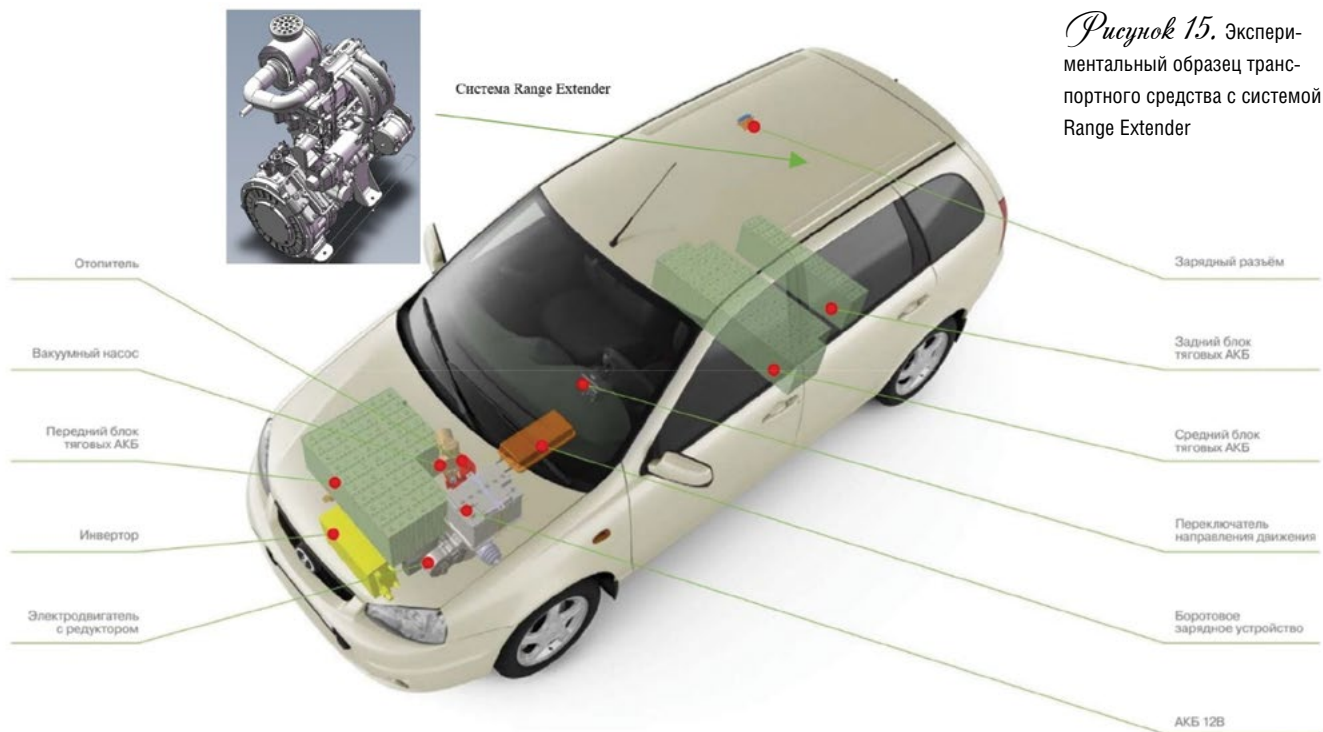


Рисунок 15. Экспериментальный образец транспортного средства с системой Range Extender

тивным направлением исследования в области автотранспортных средств с улучшенными характеристиками экономичности и экологичности. Об этом также свидетельствует большое количество публикаций, посвящённых данной тематике [7, 8, 9, 10].

В настоящее время в нашей стране реализуется федеральная программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». ФГУП «НАМИ» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта — RFMEF157614X0031)

проводит прикладные научные исследования по теме «Разработка комбинированной энергоустановки транспортных средств с алгоритмами взаимодействия основных элементов, обеспечивающими повышение их общей энергоэффективности».

В рамках проведения исследований разрабатывается отечественный электромобиль с системой Range Extender. В качестве базового транспортного средства для отработки системы Range Extender выбран электромобиль Ellada производства ОАО «АвтоВАЗ». Экспериментальный образец транспортного средства с системой Range Extender представлен на рис. 15.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Морозов С. А., Семенихина И. К., Коробов Д. Г. Быть или не быть? Особенности эксплуатации электромобиля в зимний период // Журнал автомобильных инженеров. — 2013. — № 4 (81). — С. 15–16.
2. Курмаев Р. Х., Стручков В. С., Цимбалюк М. А. К вопросу обеспечения заданных температурных режимов элементов КЭУ при использовании их на АТС // Труды НАМИ. — 2015. — № 260. — С. 69–80.
3. Гибридные автомобили — столбовая дорога к экономичному и экологически чистому транспорту / А. Л. Карунин, С. В. Бахмутов, В. В. Селифонов и др. // Журнал автомобильных инженеров. — 2007. — № 3. — С. 38.
4. Бахмутов С. В., Карпунин К. Е. «Чистые» автомобили: направления реализации и достигаемые результаты // Журнал автомобильных инженеров. — 2012. — № 6 (77). — С. 51–54.
5. Способы поддержания требуемой температуры аккумуляторных высоковольтных батарей электромобилей и автомобилей с комбинированными энергоустановками / Р. Х. Курмаев, А. С. Теренченко, К. Е. Карпунин и др. // Вестник машиностроения. — 2015. — № 6. — С. 52–55.
6. Накопители электрической энергии для автотранспортных средств с комбинированными энергоустановками / С. Н. Барзуков, А. В. Гуськов, Е. В. Зиновьев и др. // Труды НАМИ. — 2013. — № 252. — С. 62–80.
7. Miller J. M. Propulsion Systems for Hybrid Vehicles. — 2nd edition. — UK, 2010. — P. 593.
8. Encyclopedia of Automotive Engineering // Wiley Online Library [Электронный ресурс]. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781118354179> (дата обращения: 04.08.2015). — P. 2696.
9. Andert J., Köhler E., Niehues J., Schörmann G. KSPG Range Extender — a New Pathfinder to Electromobility Zeitschriftenartikel. — Springer Automotive Media, 2012. — P. 12–18.
10. Noga M. Application of the Internal Combustion Engine as a Range Extender for Electric Vehicles // Combustion Engines. — 2013. — № 154 (3). — P. 781–786.