

Разработка развозного гибридного автомобиля с использованием отечественных компонентов

06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0715911

Бахмутов С. В.¹, Филонов А. И.², Куликов И. А.²

УДК 629.331

¹Россия, ГНЦ ФГУП "НАМИ"

²Университет машиностроения

s.bakmutov@nami.ru

filonov@mami.ru

mansmart@list.ru

Введение

В настоящее время всё большее распространение получают автомобили с комбинированными энергетическими установками (КЭУ). Интерес к таким автомобилям обусловлен тем, что они обладают меньшей токсичностью и лучшей топливной экономичностью. Наиболее перспективно применение автомобилей с КЭУ в крупных городах с большим автомобильным парком. КЭУ могут устанавливаться на городских автобусах, легковых и грузовых автомобилях, причем грузовые автомобили изготавливают в основном с использованием параллельной схемы КЭУ, достоинством которой является более высокий КПД передачи энергии от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) к ведущим колесам в сравнении с последовательной и возможность применения одной электромашины (ЭМ) вместо двух [1,2].

Последовательная схема КЭУ имеет смысл, когда масса транспортного средства меняется значительно. Тогда и мощность, требуемая для движения, будет меняться в широких пределах. В этом случае при использовании параллельной схемы, не смотря на работу по характеристике минимальных удельных расходов, диапазон работы ДВС по частоте вращения получится очень широким. Минимальный расход топлива возможно получить только при строго определенной частоте вращения и нагрузке на двигатель. Нужно обеспечить эффективность работы силовой установки при значительном диапазоне изменения фактической массы транспортного средства. Оптимальной будет та схема, которая за время работы автомобиля с разными весовыми состояниями обеспечит минимальный расход топлива и минимальную токсичность выхлопных газов. Применение параллельной схемы

приведет к работе ДВС в широком диапазоне частот. Выбор последовательной схемы позволит создать конструктивно достаточно простую установку, просто адаптирующуюся к изменению количества потребной для движения энергии за цикл, однако, с меньшим по сравнению с другими схемами КПД. При выполнении КЭУ автомобиля по параллельной схеме диапазона регулирования нагрузки ДВС, который обеспечивается генератором и тяговым электродвигателем, может оказаться недостаточно. Потребуется изменение режима работы ДВС, что сразу проявится заметным ухудшением экономичности и токсичности выхлопных газов. На автобусах потребная для движения мощность изменяется в значительных пределах, и, добившись экономичной работы в одном диапазоне нагрузок невозможно не ухудшить экономические показатели в других диапазонах, что может свести на нет все преимущества КЭУ. В связи с этим последовательная схема может быть наиболее целесообразна для большегрузных грузовых автомобилей и автобусов с КЭУ. Если автобус изготавливается на шасси грузового автомобиля, или наоборот, то возможно применение как параллельной, так и последовательной схемы КЭУ.

1 Анализ основных проблем при выборе схемы КЭУ и возможный путь решения

Выбор схемы, как правило, основан на конструктивных возможностях и каких-то предварительных расчётах. В итоге может быть не всегда оправдан. Существует возможность конструктивного объединения в одной КЭУ последовательной и параллельной схем для использования преимуществ каждой из них. Может оказаться, что в одних условиях движения транспортного средства выгоднее использовать последовательную схему КЭУ, а в других – параллельную. В этом случае необходимо предусмотреть в одной конструкции возможность реализации обеих схем. При этом необходимо использовать две электрические машины, как в последовательной схеме, но для обеспечения механической связи ДВС с ведущими колёсами должен быть предусмотрен связующий узел с возможностью размыкания этой связи. Таким узлом может являться многодисковая муфта, расположенная между этими электрическими машинами. Последовательно-параллельная схема КЭУ представлена на рис.1.

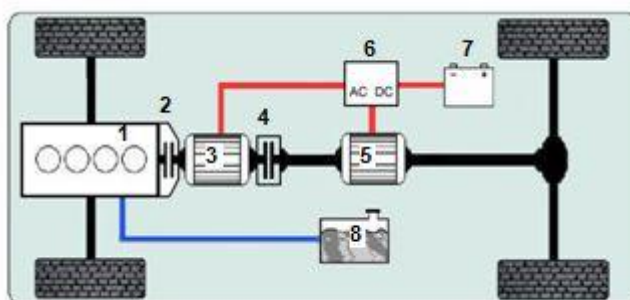


Рис. 1. Последовательно-параллельная схема КЭУ

1. ДВС. 2. Соединительная муфта. 3. Обратимая электромашина. 4. Соединительная муфта. 5. Обратимая электромашина. 6. Преобразователь электрической энергии. 7. Накопитель электрической энергии. 8. Топливный бак.

При этом в зависимости от состояния фрикционных муфт (замкнуто – разомкнуто), ДВС может быть как связан механически с ведущими колесами, так и не связан, следовательно, схема КЭУ может быть как последовательной, так и параллельной как с приводом на общую трансмиссию, так и с приводом на разные оси (патент на изобретение РФ № 2424919 от 27.07.2011 г.) [3].

Таким образом, для исследования и последующей разработки развозных городских автомобилей является актуальным и целесообразным использование именно последовательно-параллельной схемы КЭУ.

2 Выбор параметров компонентов КЭУ

Приведем пример выбора параметров компонентов КЭУ для коммерческого среднего-размерного автобуса.

Для определения параметров обратимых электромашин была разработана математическая модель движения автомобиля с КЭУ. Для моделирования городского движения был в качестве основного использован городской ездовой цикл ECE15 (городской цикл ЕЭК ООН). В этом цикле были выполнены расчеты мощности, момента и частоты вращения вала электромашин, требуемые для движения автомобиля. Кроме того, расчеты были проведены также в полном цикле ЕЭК ООН, который состоит из четырех городских циклов ECE15 и одного загородного цикла (скорость в нем была ограничена значением 110 км/ч). Результаты расчётов для полного цикла ЕЭК ООН представлены на рис.2. Максимальные значения мощности, момента и частоты приведены в таблице 1 ($P_{дв, макс}$ – максимальная мощность в тяговом режиме; $P_{ген макс}$, - максимальная мощность в режиме замедления генератором; $T_{тяг макс}$ - максимальный момент в тяговом режиме; $T_{ген, макс}$ – максимальный момент в режиме замедления генератором; $n_{макс}$ – максимальная частота вращения вала).

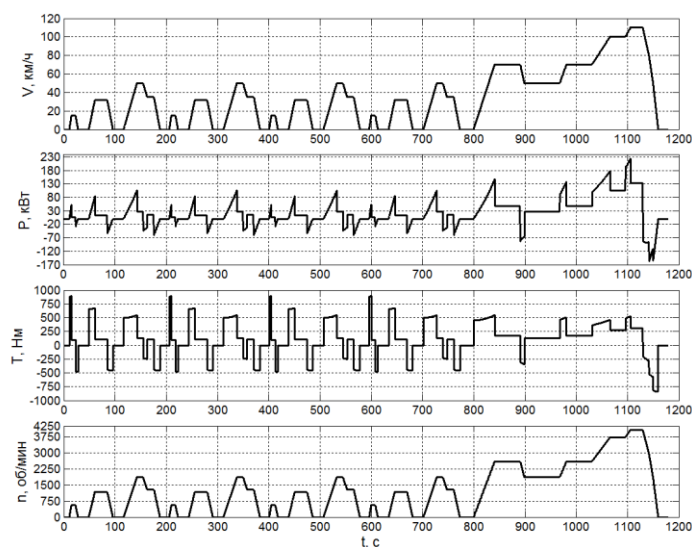


Рис. 2. Мощность, момент и частота вращения вала электромашин, требуемые для движения автомобиля в полном ездовом цикле ЕЭК ООН

Таблица 1. Максимальные расчетные значения мощности и момента в тяговом и генераторном режимах и частота вращения вала электромашины в ездовых циклах

Цикл	$P_{\text{тяг макс, кВт}}$	$P_{\text{ген макс, кВт}}$	$T_{\text{тяг макс, Нм}}$	$T_{\text{ген макс, Нм}}$	$n_{\text{макс, об/мин}}$
ЕСЕ15	105	60	888	474	1851
ЕЭК ООН	223	158	888	841	4071

Исходя из проведенных расчетов, были сформулированы требования к электромашине ЭМ2: максимальный длительный момент в тяговом режиме не менее 400 Нм; максимальная длительная мощность не менее 75 кВт (в тяговом и генераторном режимах); максимальный пиковый момент не менее 1000 Нм в тяговом режиме и не менее 850 Нм в генераторном режиме, максимальная частота поддержания пикового момента 1250 об/мин; максимальная частота вращения вала, при которой создается момент, 4000 об/мин. Максимальный длительный момент электромашины в генераторном режиме определяется не только расчетом в циклах, но характеристиками используемого в КЭУ двигателя внутреннего сгорания, поскольку ЭМ2 будет унифицирована с ЭМ1 (в силу особенностей последовательно-параллельной схемы). Так как КЭУ согласно последовательно-параллельной схеме содержит две электромашины, то ДВС может быть не полноразмерным, а уменьшенным. К примеру, в нашем случае целесообразно использовать отечественный дизельный двигатель 3МЗ-514. Максимальный момент дизеля 3МЗ 51432.10 составляет 270 Нм, а мощность – 85 кВт при 3600 об/мин. Если максимальный длительный момент электромашины в генераторном режиме составит 300 Нм, то мощность 85 кВт будет достигнута при 2700 об/мин.

Требуемым характеристикам удовлетворяют отечественные асинхронные двигатель-генераторы (Д-Г) специального исполнения, представляющие собой торцевые электрические машины. Торцевая конструкция электромашины обладает рядом преимуществ по сравнению с асинхронной машиной цилиндрического исполнения. Среди важнейших преимуществ, применительно к задачам, поставленным в связи с созданием стенда, можно выделить в первую очередь хорошую сопрягаемость с приводным механизмом. Кроме того, торцевой Д-Г имеет меньшую массу на единицу мощности и меньшие габариты в осевом направлении, что особенно важно при последовательном соединении силовых агрегатов. Условия для теплоотдачи, охлаждения и вентиляции, в силу разнесения источников тепловыделения, у торцевого Д-Г также лучше, чем у электромашины классической конструкции.

Отмеченные преимущества позволили рассматривать данную конструкцию электрической машины как наиболее полно отвечающую целям и задачам создания КЭУ в стендовом исполнении. Основные параметры электромашины представлены в таблице 2.

Таблица 2. Технические параметры электромашины

Напряжение питания, фазное, регулируемое, В	0 ÷ 220
Максимальный, кратковременный, в течение 10 с, момент до 600 об/мин, Н·м	1000
Минимальный уровень фазного напряжения для обеспечения максимального момента до 600 об/мин, В	160
Максимальный длительный момент до 1800 об/мин, Н·м.	700
Рабочий диапазон частоты вращения, об/мин	0 ÷ 3000
Максимальный КПД в тяговом режиме, не менее, %	93
Охлаждение	воздушное, принудительное, от отдельного источника
Масса двигателя, не более, кг	150
Исполнение	Защищенное
Габаритные размеры, без учета вылета валов, длина × ширина × высота, не более, мм	240×500×500

Общий вид обратимой электромашины представлены на рис. 3.

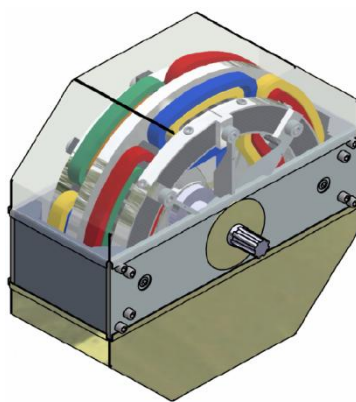


Рис. 3. Общий вид электромашины

Для КЭУ также была изготовлена комплексная система энергообеспечения, основной функцией которой является аккумулирование энергии, выработанной тепловым двигателем комбинированной энергетической установки, а также запас рекуперированной энергии торможения автотранспортного средства, с последующей отдачей в тяговый электрический привод и привод вспомогательных агрегатов.

Основным компонентом разработанной комплексной системы энергообеспечения являются аккумуляторные блоки, состоящие из аккумуляторных элементов, выполненные по технологии LiFePO₄ модели LFP40АНА. Основными преимуществами аккумуляторных

элементов типа LiFePO_4 по сравнению с другими современными типами аккумуляторов являются: высокая удельная энергоемкость; возможность заряда и разряда высокими токами; пожаро- и взрывобезопасность; широкие температурные диапазоны работы; долгий срок службы. Выпуск таких элементов также освоен российскими производителями. Для достижения необходимого уровня энергообеспеченности грузовых городских автомобилей с КЭУ, общее количество аккумуляторных элементов в системе составляет 96 шт., при этом каждые 12 аккумуляторных элементов объединяются в аккумуляторный блок, имеющий собственную систему контроля и управления. Таким образом, комплексная система энергообеспечения состоит из 8 аккумуляторных блоков, последовательно соединенных силовыми и сигнальными жгутами. Модульный подход, положенный в основу конструкции комплексной системы энергообеспечения, дает возможность, путем изменения количества аккумуляторных блоков, применения ее для широкой гаммы автотранспортных средств с КЭУ. Элементы в аккумуляторном блоке соединены последовательно, к каждому элементу присоединен датчик температуры, передающий данные о текущем тепловом состоянии элемента на плату управления. К токосъемным клеммам аккумуляторных элементов присоединены сигнальные провода, предназначенные для измерения напряжения на каждом элементе. Для контроля параметров состояния аккумуляторных элементов и управления процессами заряда, разряда и балансировки, в каждом аккумуляторном блоке установлена плата управления

Внешний вид аккумуляторных элементов LFP40АНА представлен на рис. 4.

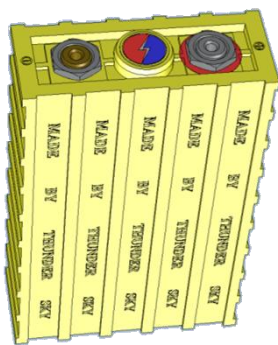


Рис. 4. Аккумуляторный элемент LFP40АНА.

Комплексная система энергообеспечения показана на рис. 5.



Рис. 5. Комплексная система энергообеспечения КЭУ.

Для обеспечения совместной работы электрической машины и комплексной системы энергообеспечения используются преобразователи напряжения и устройства управления, предназначенные для повышения напряжения аккумуляторной батареи транспортного средства в тяговых режимах и понижения напряжения Д-Г транспортного средства или сети переменного тока при заряде накопителей.

3 Создание КЭУ в стендовом исполнении

Для определения рациональных режимов работы КЭУ последовательно-параллельной схемы для среднетоннажных развозных автомобилей сотрудниками научно-технического центра "Автомобили с комбинированными энергетическими установками" создан специальный стенд, компонентный состав которого аналогичен КЭУ транспортного средства.

Схема созданной КЭУ в стендовом исполнении на агрегатах российского производства представлена на рис. 6.

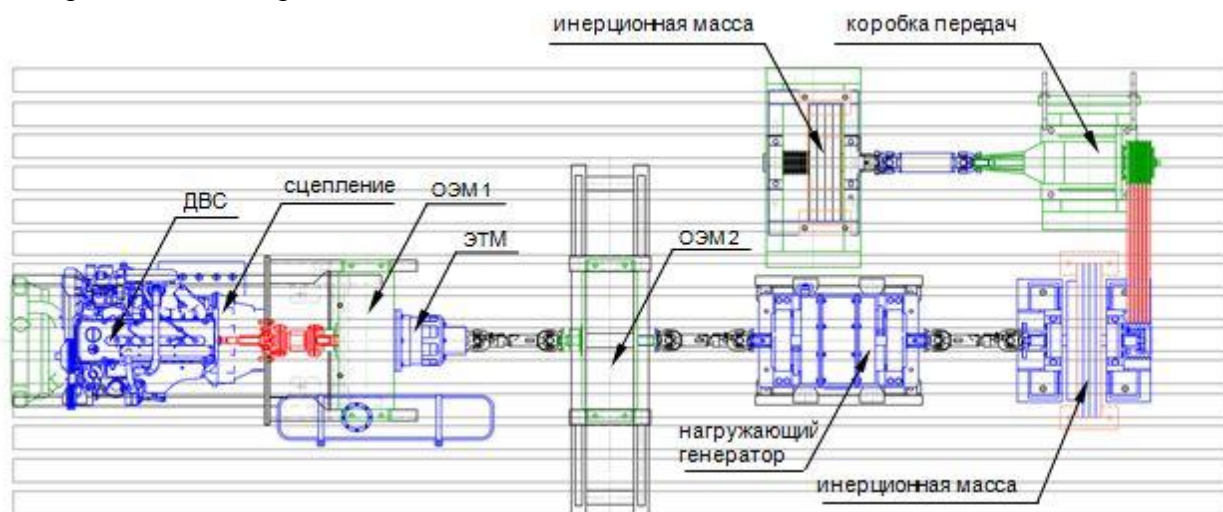


Рис. 6. Схема КЭУ в стендовом исполнении

КЭУ в стендовом исполнении содержит две ветви, которые можно условно разделить на тяговую (собственно КЭУ) и нагружающую. Тяговая ветвь имитирует транспортное средство и содержит ДВС, сцепление, две обратимые электромшины производства (ОЭМ1 и ОЭМ2) и электромагнитную муфту. Для регистрации параметров ДВС между ним и ОЭМ1 установлен датчик крутящего момента и частоты вращения.

Нагружающая ветвь имитирует сопротивление движению автомобиля: сопротивление воздуха, сопротивление качению, сопротивление подъёму и инерционные нагрузки. Нагружающая ветвь содержит нагружающий генератор, имитирующий силу сопротивления качению, воздуха и скатывающую силу. Имитация инерционных нагрузок, зависящих от параметров испытуемого транспортного средства, с помощью имеющихся в продаже программируемых нагружающих устройств имеет некоторые недостатки. Инерционные нагрузки, создаваемые среднетоннажным транспортным средством относительно велики,

поэтому нагружающее устройство, выбранное для создания этих нагрузок громоздкое и дорогостоящее. Его установка, тарировка и соединение с остальными элементами стенда на установочной плите, имеющей ограниченные размеры, вызывает конструктивные трудности. В этом случае наиболее рациональным вариантом имитации инерционных нагрузок на стенде является установка инерционных масс (маховиков). В связи с этим за нагружающим устройством устанавливаются последовательно две инерционные массы с условным названием большая и малая. В целях экономии площади стенда маховики соединяются между собой ремённой передачей. Для имитации сопротивления движению разных транспортных средств между маховиками установлен редуктор (коробка передач) с фиксированными передаточными числами. Элементы тяговой и нагружающей ветвей соединены между собой карданными передачами.

4 Теоретические исследования разработанной КЭУ

Проведённые теоретические исследования и предварительные стендовые испытания показали следующие результаты. При использовании в качестве тяговой одной электромашины [2] обеспечивается длительное движение по ровной дороге (без подъемов) со скоростью до 86 км/ч. Максимальный преодолеваемый в длительном режиме работы подъем составляет 4.8%. В пиковом режиме работы ЭМ возможно преодоление подъема до 16%. При использовании двух ЭМ (рис. 7) и электромагнитной муфты с нагрузочной способностью 400 Нм первая ЭМ не может выходить за пределы максимального длительного момента (400 Нм). Вторая ЭМ может работать во всем силовом диапазоне. В этом случае обеспечивается длительное движение автомобиля на подъеме 10% со скоростью до 60 км/ч. Максимальный преодолеваемый подъем составляет около 23% (скорость движения до 30 км/ч). При работе обеих ЭМ в пиковом режиме возможно преодоление подъема до 36%.

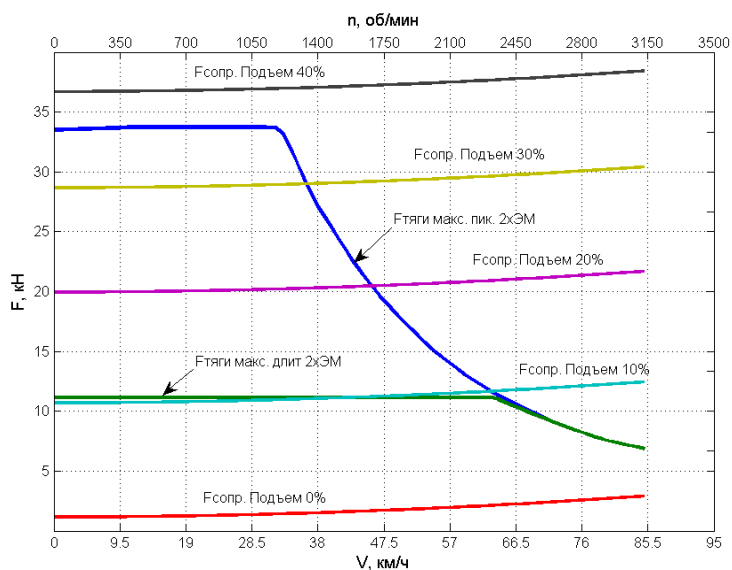


Рис. 7. Тяговая характеристика коммерческого среднеразмерного автобуса при движении на электротяге от двух ЭМ.

По результатам анализа оптимальных управлений с использованием метода динамического программирования было разработано две стратегии управления КЭУ. Первая ориентирована на получение наименьшего расхода топлива ("экономичная"), вторая – на получение наилучших экологических характеристик автомобиля ("экологичная") [4,5]. Стратегии одинаковы по структуре, а различаются только численными значениями параметров и законами управления компонентами КЭУ. В обеих стратегиях возможно использование трёх режимов работы КЭУ: режима электромобиля, режима работы по параллельной схеме и режима работы по последовательной схеме КЭУ.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что развозные среднетоннажные автомобили и среднеразмерные автобусы, оснащенные КЭУ, выполненной по последовательно-параллельной схеме, при движении в городских условиях обеспечивают не менее 25% экономии топлива в сравнении с традиционными автотранспортными средствами, а также возможность движения транспортного средства в режиме электромобиля в городских условиях с постоянной скоростью 20 км/ч на протяжении не менее 30 км.

Список литературы

1. Карунин А.Л., Бахмутов С.В., В.В.Селифонов, Круташов А.В., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В., Филонов А.И., Карпухин К.Е. Гибридные автомобили – столбовая дорога к экономичному и экологически чистому транспорту // Журнал Автомобильных Инженеров (Журнал ААИ). 2007. № 3. С. 38-45.
2. Карунин А.Л., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Круташов А.В., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В., Филонов А.И., Карпухин К.Е. Гибридные автомобили – столбовая дорога к экономичному и экологически чистому транспорту (продолжение) // Журнал Автомобильных Инженеров (Журнал ААИ). 2007. № 4. С. 52-56.
3. Николаенко А.В., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Павлушков Б.Э., Филонов А.И., Благушко Я.В., Баулина Е.Е., Куликов И.А., Карпухин К.Е., Данилин М.Ф. Комбинированная энергетическая установка транспортного средства (варианты): пат. 2424919 РФ. 2011.
4. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования: пер. с англ. М.: Наука, 1965. 458 с.
5. Куликов И.А., Селифонов В.В., Филонов А.И. Управление комбинированной энергоустановкой автомобиля: экология или энергоэффективность? //Автомобильная промышленность. 2011. № 1. С. 18-23.

Development of commercial hybrid electric vehicle with native key components

06, June 2014

DOI: [10.7463/0614.0715911](https://doi.org/10.7463/0614.0715911)

S.V. Bakhmutov¹, A.I. Filonov², I.A. Kulikov²

¹Federal State Unitary Enterprise «Central Scientific Research Automobile and Engine Institute», 125438, Moscow, Russian Federation

²Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), 107023, Moscow, Russian Federation

s.bakhmutov@nami.ru

filonov@mami.ru

mansmart@list.ru

The perspectives of development of medium weight cargo vehicles with hybrid powertrain including Russian native key components are considered in this article. Series-parallel scheme of HEV is more relevant owing to limitations of series and parallel schemes. An example of this technology is described. This technical solution has good facilities for variation of HEV and AWD type. The authors have patented it. In addition, another main issue is to choose the types of key components with good correlation for parameters of ICE, electric motors, batteries, and inverter. Using mathematical model of the vehicle a selection and correlation of technical characteristics were carried out to meet ecological and economical requirements. After computing calculation two control strategies were accepted. The first strategy contributes to good fuel consumption, while the other one is aimed at ecology. Researchers use test benches to confirm the results of calculation, and this one was built by the authors applying native components. The result of experiment on the test bench is the growth of fuel consumption of the medium weight cargo vehicle by 25% and compliance with ecological class Euro-4.

Publications with keywords: [car](#), [the combined power installation](#), [control strategy](#), [fuel consumption](#), [electric motor](#)

Publications with words: [car](#), [the combined power installation](#), [control strategy](#), [fuel consumption](#), [electric motor](#)

References

1. Karunin A.L., Bakhmutov S.V., V.V.Selifonov, Krutashov A.V., Baulina E.E., Avrutskiy E.V., Filonov A.I., Karpukhin K.E. [Hybrid cars is the high road to the economical and environmentally friendly transport]. *Zhurnal Avtomobil'nykh Inzhenerov (Zhurnal AAI)*, 2007, no. 3, pp. 38-45. (in Russian).
2. Karunin A.L., Bakhmutov S.V., Selifonov V.V., Krutashov A.V., Baulina E.E., Avrutskiy E.V., Filonov A.I., Karpukhin K.E. [Hybrid cars is the high road to the economical and environmentally friendly transport (continued)]. *Zhurnal Avtomobil'nykh Inzhenerov (Zhurnal AAI)*, 2007, no. 4, pp. 52-56. (in Russian).
3. Nikolaenko A.V., Bakhmutov S.V., Selifonov V.V., Pavlushkov B.E., Filonov A.I., Blagushko Ya.V., Baulina E.E., Kulikov I.A., Karpukhin K.E., Danilin M.F. *Kombinirovannaya energeticheskaya ustanovka transportnogo sredstva (varianty)* [Hybrid vehicle powertrain (options)]. Patent RF, no. 2424919. 2011. (in Russian).
4. Bellman R., Dreyfus S. *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press, 1962. (Russ. ed.: Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 458 p.).
5. Kulikov I.A., Selifonov V.V., Filonov A.I. [Control of a hybrid vehicle's powertrain: a tradeoff between ecology and fuel economy?]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2011, no. 1, pp. 18-23. (in Russian).