

УДК 621.458

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ АЛЬТЕРНАТИВА ДОРОГОМУ ЭЛЕКТРОМОБИЛЮ ПО ВЫБРОСУ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ И ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ?

В.К. Азаров, магистр / В.Ф. Кутенёв, д.т.н. / В.И. Сонкин, инж.
ФГУП «НАМИ»

Введение в США и Европе новых стандартов на выбросы парникового газа CO₂ легковыми автомобилями (и топливную экономичность в США) и дальнейшее ужесточение стандартов на вредные выбросы с отработавшими газами (ОГ) (Евро-6, Tier 3) требует от изготовителей автомобильной техники радикальных технических решений, которые позволят к 2020–2025 годам резко снизить вредные выбросы и расход топлива при сохранении достигнутых динамических качеств и существующего типажа автомобилей. Одним из таких решений является создание комбинированных энергоустановок (КЭУ) для автомобилей.

В гибридной (комбинированной) энергоустановке автомобиля обычно используются как минимум два источника мощности (один из которых обратимый) и две системы аккумулирования энергии. Это позволяет устранить ряд важных недостатков ДВС и улучшить экономические и экологические показатели энергоустановки и автомобиля в целом за счёт:

- рекуперации энергии торможения автомобиля;
- выключения ДВС в режимах холостого хода и замедления;
- оптимизации работы ДВС в составе КЭУ путём уменьшения его размерности и исключения неэффективных режимов;
- оптимизации работы вспомогательных механизмов ДВС.

Создание конструкций КЭУ и их развитие в настоящее время осуществляется разными способами. Сегодня для легковых автомобилей наиболее активно продвигают электрические КЭУ. Вместе с тем возможны КЭУ иного типа — гидравлические, пневматические и другие. В статье анализируются возможности КЭУ с гидравлическим и пневматическим силовым приводом.

КЭУ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

В отличие от КЭУ с электрическим приводом для привода автомобиля используется дополнительно вместо электрической энергии энергия давления за счёт введе-

ния в силовой привод насос-мотора и гидравлического аккумулятора.

КЭУ с электрическим приводом проще использовать в лёгких автомобилях, которым требуется низкий уровень дополнительной мощности в течение длительного периода времени (легковых автомобилях и лёгких грузовиках коммерческого назначения). Для автомобилей средней и большой грузоподъёмности, особенно таких, которым требуется высокий уровень мощности в течение коротких промежутков времени и которые постоянно стартуют и останавливаются (мусоровозы, развозные грузовики, городские автобусы), лучше подходят гидравлические комбинированные системы [1]. Это связано с более высокой скоростью и эффективностью рекуперации энергии гидравлической системой по сравнению с батарейной электрической системой, а также с большей (на порядок) удельной мощностью.

Как видно из рис. 1, а, гидравлический аккумулятор позволяет накапливать почти весь поток кинетической энергии за короткое время торможения (1,7 с.) тяжёлого автомобиля. За то же время Li-ion-накопитель равной энергоёмкости успевает захватить меньше половины энергии торможения. При плавном торможении лёгкого автомобиля у Li-ion-накопителя этой проблемы не возникает (рис. 1, б).

Очень высокая скорость заряда (и разряда) гидравлического аккумулятора позволяет полностью зарядить его менее чем за 10 секунд, что недостижимо для электрического накопителя. В свою очередь, важным преимуществом электрического накопителя является повышенная (на порядок и более) удельная энергия, которая позволяет разрабатывать полностью электрические автомобили. Удельная энергия современных гидравлических аккумуляторов объёмом 50 л не превышает 0,15 кВт·ч.

Упрощённая схема гидравлической КЭУ автомобиля приведена на рис. 2. Основными компонентами КЭУ с гидравлической системой являются: аккумулятор высокого давления, аккумулятор низкого давления, насос-мотор, система кондиционирования гидравлической жидкости и контроллер.

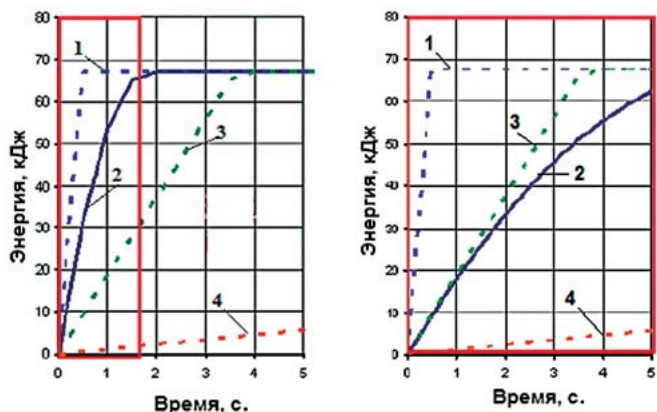


Рисунок 1. Изменение потоков энергии в гидравлическом аккумуляторе (1), Li-ион-накопителе (3), свинцово-кислотной батарее (4) и при реальном торможении (2) мусоровоза массой 25 т при скорости 10 км/ч за 1,7 с. (а) и легкового автомобиля массой 1,5 т при скорости 50 км/ч за 5 с. (б) [2]

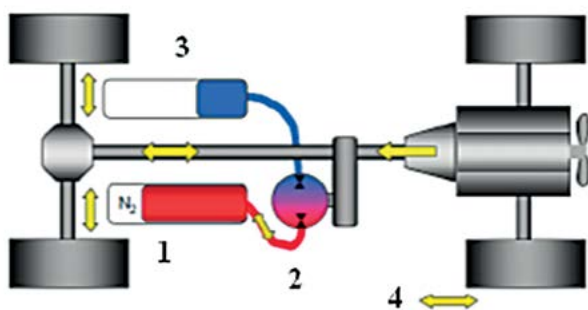


Рисунок 2. Параллельный гидравлический комбинированный привод: 1 — аккумулятор высокого давления; 2 — насос-мотор; 3 — аккумулятор низкого давления; 4 — поток энергии

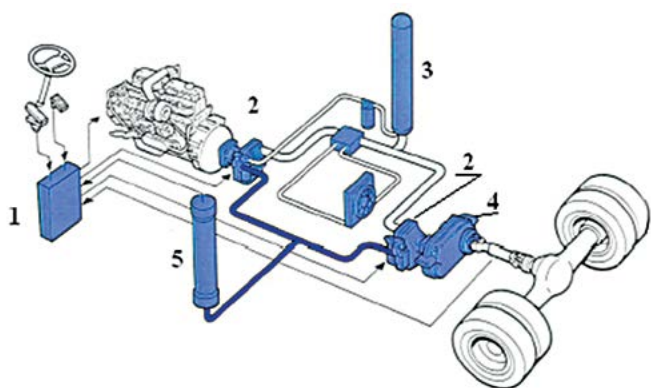


Рисунок 3. Последовательная гидравлическая комбинированная система привода CHD группы Parker Hannifin: 1 — электронный блок управления; 2 — гидравлическая машина; 3 — аккумулятор низкого давления; 4 — редуктор; 5 — аккумулятор высокого давления

Гидравлический насос-мотор (ГНМ), как правило аксиально-поршневого типа с регулируемым рабочим объёмом, предназначен для конвертации энергии. В насосном режиме он преобразует энергию торможения автомобиля в потенциальную энергию давления, накапливаемую в аккумуляторе. В моторном режиме он трансформирует потенциальную энергию сжатой среды, накопленную в аккумуляторе, в кинетическую энергию автомобиля при разгоне. Современные ГНМ обеспечивают максимальное давление 30–35 МПа, имеют эффективность, сопоставимую с эффективностью электрических мотор-генераторов (95 %), и почти на порядок более высокую удельную мощность — 4,0 против 0,5 кВт/кг [3].

В качестве гидравлического аккумулятора обычно используют два гидропневматических аккумулятора — высокого и низкого давления. В аккумуляторе высокого давления энергия накапливается в сжатом до 35 МПа газе (азоте) с помощью масла. Подвижная перегородка в аккумуляторе (резиновый баллон или поршень) отделяет жидкость от газа, предотвращая попадание газа в гидравлическую систему. Для повышения эффективности за счёт снижения тепловых потерь газовую часть аккумулятора заполняют упругим вспененным материалом. Аккумулятор низкого давления используется для сбора масла из ГНМ. Для исключения кавитации в нём поддерживают повышенное до 1,2–1,4 МПа давление. Современные гидравлические аккумуляторы эффективнее и легче электрических накопителей и имеют удельную мощность порядка 15 кВт/кг.

Система кондиционирования гидравлической системы обеспечивает очистку масла от продуктов износа и поддержание его оптимальной температуры, а контроллер отслеживает ускорения и торможения автомобиля и согласует работу компонентов комбинированного привода.

Принцип работы гидравлической КЭУ такой же, как с электроприводом. При замедлении автомобиля гидравлический насос захватывает энергию торможения и накапливает её в аккумуляторе, закачивая в него масло и повышая давление сжатого газа. При последующем ускорении автомобиля гидравлический мотор преобразует высокое давление масла в кинетическую энергию ведущего вала. Возможно также отключение ДВС на холостом ходу и повышение его эффективности за счёт уменьшения размерности и исключения работы на неэффективных режимах.

Подобно КЭУ с электрическим приводом возможны разные схемы гидравлической КЭУ — параллельная, последовательная и комбинированная. В параллельной схеме ГНМ связан с ведущим валом через трансмиссию и помогает ДВС при разгонах. Преимуществом её является эффективная рекуперация энергии торможения, сохранение трансмиссии базового автомобиля, относительно низкая стоимость благодаря незначительному модифицированию силового привода. Недостаток —

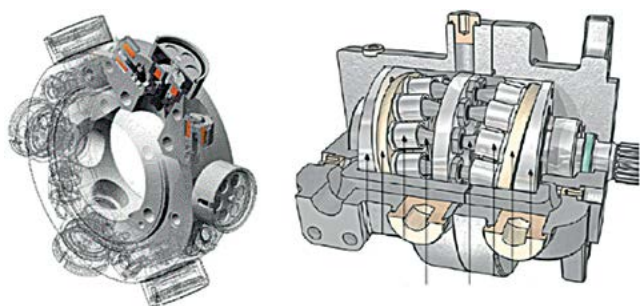


Рисунок 4. 6-поршневой насос-мотор Artemis DD с регулируемым рабочим объемом (а) и 24-поршневой насос-мотор Inpas BV с регулируемым рабочим объемом (б)

невозможность устранения работы ДВС с пониженной эффективностью из-за прямой связи ДВС и трансмиссии автомобиля, а также повышенный шум и вибрация. Параллельная гидравлическая КЭУ выпускается серийно фирмой Bosch Rexroth AG и применяется в мусоровозах MAN весом 18–26 т. Она развивает мощность 233 кВт, крутящий момент 1 113 Н·м и снижает расход топлива до 25 % в городском цикле, а также увеличивает срок службы тормозной системы почти вдвое [2]. Аккумулятор с максимальным давлением 32,5 МПа позволяет накапливать 0,15 кВт·ч энергии торможения.

Применение последовательной схемы в гидравлической КЭУ автомобиля позволяет максимально реализовать преимущества гидравлического силового привода за счёт рекуперации энергии торможения, уменьшения размерности ДВС и устранения прямой связи между двигателем и транспортным средством (ТС). Впервые последовательная схема (рис. 3) была реализована фирмой Parker Hannifin в составе городского автобуса в 1991 году.

Испытания развозного автофургона URC с гидравлической КЭУ аналогичной конструкции показали возможность снижения расхода топлива и выбросов CO₂ в городском цикле на 50–70 % по сравнению с базовым автомобилем [3].

В целом гидравлические КЭУ по сравнению с эквивалентными электрическими имеют ряд важных преимуществ: значительно более высокую удельную мощность и скорость передачи энергии, меньшие (приблизительно на 20 %) вес и стоимость, больший ресурс, они безопаснее в эксплуатации, изготовлены из экологически более чистых материалов, менее чувствительны к экстремальным климатическим условиям (температуре и влажности) [4].

Однако этих преимуществ может оказаться недостаточно для применения в легковых автомобилях гидравлических КЭУ вместо электрических. Важно устранить их основные недостатки по сравнению с базовым автомобилем: более сложный контроль, повышенный уровень шума (на 3–4 дБА), вибрации и особенно низкую удельную энергию.

В гидравлических силовых системах повысить удельную энергию можно за счёт увеличения рабочего давления и улучшения эффективности гидравлических компонентов, желательно без увеличения размеров. В этих направлениях достигнут определённый успех.

Так, EPA совместно с Clean Automotive Technology создали опытный аккумулятор высокого давления из композитного материала объёмом ~60 л, обеспечивающий при максимальном давлении 450 бар удельную энергию 0,52 кВт·ч, и ведут работы по перспективному аккумулятору с максимальным давлением 500 бар [5]. Компания Artemis Intelligent Power Ltd. разработала новый 6-поршневой радиальный ГНМ (рис. 4, а) с КПД > 95 % в широком диапазоне нагрузок для прототипа гидравлической КЭУ автомобиля BMW 530i, обеспечивший возможность уменьшения выбросов CO₂ на 30 % и расхода топлива по ЕГЦ на 50 % по сравнению с базовым автомобилем [3]. Высокоэффективный ГНМ другого типа, использующий концепцию Floating Cup, разработан компанией Inpas BV (рис. 4, б). Он имеет максимальный КПД 98 % и обеспечивает низкие механические потери в критическом диапазоне низких скоростей и высоких нагрузок [6].

По информации PSA Peugeot Citroën, по-видимому, первым серийным легковым автомобилем с гидравлической КЭУ может стать в 2016 году Citroën C3 или Peugeot 208, оборудованный системой Hybrid Air, которая включает небольшой бензиновый двигатель, автоматическую трансмиссию и гидросистему с аккумуляторами высокого (250 бар) и низкого давления. Гибридный привод Peugeot 208 выполнен по параллельной схеме и обеспечивает снижение выбросов CO₂ в среднем на 30 % в европейском ездовом цикле и до 45 % в городской фазе этого цикла. Расход топлива составляет 2,9 л/100 км в комбинированном ездовом цикле, а выбросы CO₂ — около 69 г/км. Важным преимуществом системы Hybrid Air является пониженная стоимость единицы выбросов CO₂ по сравнению с электрическими КЭУ автомобилей того же класса [7].

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КЭУ

Основными недостатками электрических КЭУ являются повышенная стоимость и вес из-за использования дополнительной энергоустановки и большого накопителя энергии с ограниченным ресурсом. Эффективным способом снижения стоимости и веса может стать применение КЭУ с пневматической системой [8].

Впервые идея аккумуляирования сжатого воздуха и использования его энергии для привода транспортных средств была реализована L. Mekarski в 1886 году в пневматическом двигателе, в котором сжатый и предварительно нагретый воздух перемещал поршень в цилиндре и затем выпускался в атмосферу. Пневматический двигатель применялся в городских трамва-

ях и локомотивах, работающих в шахтах, так как был экологически более чистым, чем паровые и нефтяные двигатели. Однако к 1940-м годам он был полностью вытеснен ДВС даже из учебников.

Энергетический кризис 1970-х годов возродил интерес к автомобилю с приводом от сжатого воздуха. Сначала работы велись преимущественно в направлении создания последовательной пневматической КЭУ, которая отличалась от электрического привода в основном тем, что вместо генератора использовался воздушный компрессор (или часть цилиндров многоцилиндрового ДВС), вместо электромотора — воздушный мотор, а вместо буферного накопителя — баллон со сжатым воздухом. По данным [9], в этой схеме экономия топлива (до 18 %) достигается в основном за счёт смещения работы ДВС в узкий диапазон эффективных режимов. Силовая установка такого типа была недавно реализована в опытном автомобиле фирмы MDI с 300-литровым воздушным баллоном.

Более эффективная концепция пневматической КЭУ была предложена М. Schechter [8]. Она базируется на том факте, что ДВС может работать как компрессор и как воздушный мотор при гибком изменении фаз газораспределения. Для этого в головке цилиндров устанавливается дополнительный загрузочный клапан, который связывает цилиндр с воздушным баллоном (рис. 5). Загрузочный клапан функционирует только при работе ДВС в качестве компрессора или воздушного мотора. Он направляет сжатый воздух из цилиндра в воздушный баллон, и наоборот. Предложенная схема позволяет накапливать энергию торможения автомобиля и повторно её использовать. При замедлении ТС с помощью электронной системы контроля выключаются подача топлива и зажигание, и двигатель работает как двух- или четырёхтактный компрессор, конвертируя кинетическую энергию в потенциальную энергию сжатого воздуха, накапливаемого в баллоне. После остановки двигателя может работать без подачи топлива как двух- или четырёхтактный воздушный мотор, используя сжатый воздух из баллона для разгона автомобиля. Система позволяет также работать в режиме стоп-старт, а в двигателе с турбонаддувом исключить турболог благодаря вспомогательному наддуву двигателя сжатым воздухом на такте сжатия.

Важным условием эффективной реализации этой концепции является применение гибкой бескулачковой системы газораспределения (БСГ) с электрогидравлическим, пневматическим или электромагнитным приводом клапанов и электронным управлением вместо привода клапанов распределительным валом. Помимо регенерации энергии торможения, применение БСГ позволяет в режиме обычного двигателя кратковременно увеличить крутящий момент, переключая двигатель с четырёх- на двухтактный цикл, уменьшить расход то-

плива и выбросы CO_2 , обеспечив работу двигателя без дросселирования, и устранить работу двигателя на холстом ходу.

Важным элементом системы является воздушный баллон, в котором аккумулируется энергия сжатого воздуха. Его объём зависит от веса автомобиля и выбирается равным 30–45 л на 1 000 кг. В двигателе со степенью сжатия 9,7 давление в баллоне изменяется от 6 до 24 бар. При движении давление не должно падать ниже порогового значения (~6 бар) для более эффективного аккумулирования и использования энергии воздуха. Тепловая изоляция и подогрев помогают поддерживать стабильную температуру баллона и минимизировать потери энергии сжатого воздуха.

По данным моделирования, применение пневматической КЭУ на базе бензинового двигателя рабочим объёмом 2,5 л позволяет улучшить топливную экономичность легкового автомобиля массой 1 531 кг на 64 % по циклу FTP-75 и на 12 % по магистральному циклу по сравнению с базовым автомобилем. Эффективность пневматической КЭУ существенно зависит от характеристики ездового цикла. В работе [10] с помощью математической модели были протестированы более десяти разных ездовых циклов, отличающихся скоростью, количеством остановок, интенсивностью ускорений и замедлений. В зависимости от ездового цикла снижение расхода топлива изменялось от 8 до 59 %. В целом результаты современных исследований позволяют сделать вывод, что

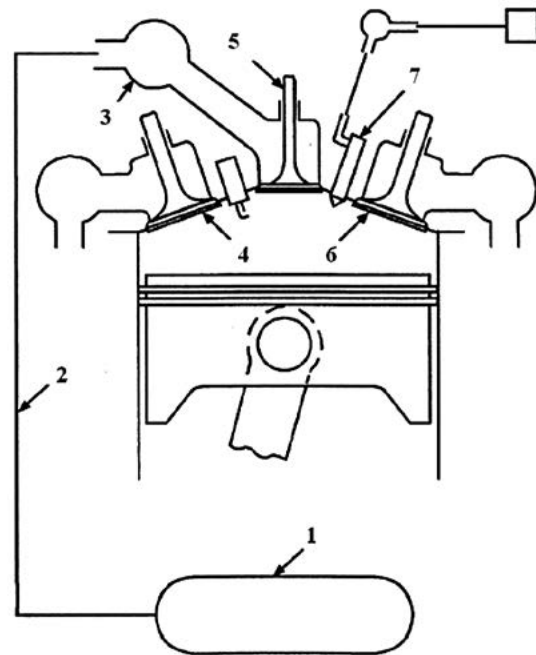


Рисунок 5. Схема пневматической комбинированной энергоустановки: 1 — баллон; 2 — воздуховод; 3 — загрузочный трубопровод; 4, 5, 6 — впускной, загрузочный и выпускной клапаны; 7 — топливная форсунка

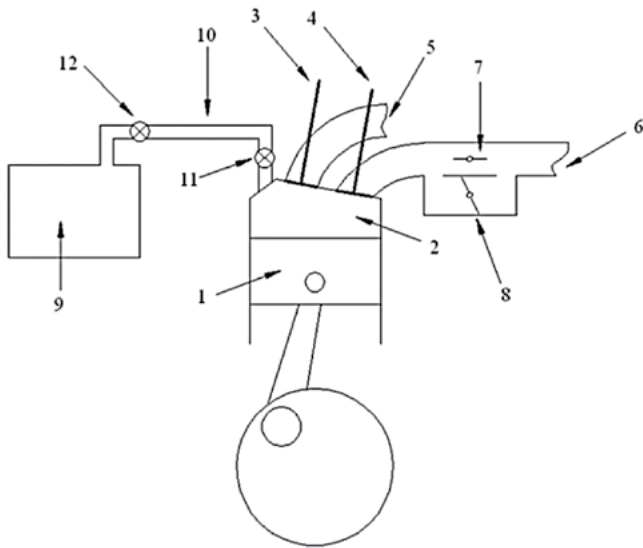


Рисунок 6. Схема пневматической КЭУ с клапаном рекуперации энергии: 1 — поршень; 2 — цилиндр; 3, 4 — выпускной и впускной клапаны; 5, 6 — выпускной и впускной каналы; 7, 8 — дроссель; 9 — баллон; 10 — буферная камера; 11, 12 — отсечные клапаны [11]

эффективность пневматической КЭУ близка или немного ниже (на 10–15 %) эффективности электрической КЭУ, но без усложнений и увеличения веса автомобиля, связанных с применением второй силовой установки.

В настоящее время ряд исследовательских центров и университетов ведут поиск менее сложной системы, которая обеспечила бы аналогичные преимущества пневматической КЭУ. На рис. 6 приведена одна из возможных схем пневматической КЭУ с клапаном рекуперации энергии, в которой сохранён стандартный привод клапанов распределительным валом. Сжатый воздух накапливается в баллоне, который соединён с цилиндром через буферную камеру. Поток воздуха в баллон и из него контролируется отсечными клапанами. Буферная камера с отсечными клапанами, названная клапаном рекуперации энергии, соединена с двигателем через отверстие в камере сгорания. Эксперименты и расчётные исследования подтвердили работоспособность схемы и показали, что она обеспечивает повышенную эффективность регенерации энергии в ездовом цикле 10–15 (Япония) и лучшую топливную экономичность (приблизительно на 10 %) по сравнению с обычным автомобилем. Недостатком схемы является сложность доступа к головке цилиндров для подключения буферной камеры. Ещё одна проблема пневматической КЭУ — низкая энергоёмкость системы вследствие низкой удельной энергии и мощности воздуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня не существует одной конкретной технологии, которая может обеспечить выполнение требований

2020–2025 годов по топливной экономичности АТС и выбросам CO_2 . Вероятно, в ближайшее время основной силовой установкой легкового автомобиля останется ДВС благодаря развитой инфраструктуре и дешёвым технологиям. Наиболее важной альтернативой является электрический комбинированный силовой привод. Он обеспечивает до 50–60 % снижения расхода топлива и вредных выбросов, в том числе CO_2 , при движении в городе, однако при движении по магистрали это улучшение значительно меньше или вообще отсутствует. Его основными недостатками являются высокая дополнительная стоимость (до 100 %) электрических компонентов, особенно буферного накопителя энергии, и вес.

Наиболее доступной по цене альтернативой электрическому комбинированному приводу являются пневматическая и гидравлическая системы. В условиях городского движения они обеспечивают приблизительно 70–85 % эффекта электрической системы. При этом они являются достаточно простыми решениями и могут легко быть адаптированы в силовой привод обычного автомобиля. В условиях технологической неопределённости автопроизводители должны быть готовы к освоению и этих технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Progress Report on Clean and Efficient Automotive Technologies under Development at EPA: EPA420-R-04-002. — 2004.
2. Lindzus E. HRB — Hydrostatic Regenerative Braking System: The Hydraulic Hybrid Drive from Bosch Rexroth [Электронный ресурс]. URL: www.iswa.org/fileadmin/galleries/Ge.
3. Rydberg K.-E. Energy Efficient Hydraulic Hybrid Drives: The 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power. — Sweden, 2009.
4. Rensselaar J.V. Power to Spare: Hydraulic Hybrids // Tribology and Lubrication Technology. — Vol. 68. — № 2. — 2012.
5. Acevedo F.J. EPA's Clean Automotive Technology Hydraulic Hybrid Program: Wisconsin Public Transit Conference. — 2011.
6. Achten P.A.J. The Hybrid Transmission // SAE Paper. — № 2007-01-4152. — 2007.
7. Кутенёв В.Ф., Сонкин В.И. Автомобильные бензиновые двигатели: смена приоритетов // Труды НАМИ: сб. науч. статей. — Вып. 252. — 2013.
8. Schechter M.M. New Cycles for Automobile Engines // SAE Paper. — № 1999-01-0623. — 1999.
9. Huang K.D., Tzeng S.C., Chang W.C. Energy-Saving Hybrid Vehicle Using a Pneumatic-Power System // Applied Energy. — Vol. 81. — № 1. — 2005.
10. Trajkovic S., Tunestel P., Johansson B. A Simulation Study Quantifying the Effects of Drive Cycle Characteristics on the Performance of a Pneumatic Hybrid Bus // ASME Technical Paper: ICEF2010-35093. — 2010.
11. Pisan C. Modelling and Experimentation on Air Hybrid Engine Concepts for Automotive Applications: Ph. D. Thesis. — United Kingdom, 2007.