

УДК 621.436; 629.113; 629.114

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ГИБРИДНЫХ МОТОРНО-ТРАНСМИССИОННЫХ УСТАНОВОК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Б.Л. Арав / Университетский центр, г. Ариель, Израиль
В.Н. Бондарь, А.В. Келлер / НИИ АТТ, ЮУрГУ, Челябинск
С.Н. Беседин / ООО «НТЦ «Микротурбинные технологии», г. Санкт-Петербург

В настоящее время лавинообразно увеличивается число транспортных средств (ТС) с гибридными моторно-трансмиссионными установками (ГМТУ) и близких по конструкции МТУ электромобилей со сроками начала производства в 2011-2013 гг. [1, 2, 3, 4, 5, 12]. Однако концепции ГМТУ находятся в состоянии постоянного развития и нуждаются в анализе. Авторами предлагаются его основные положения, основанные на обобщении применяемых методов и средств повышения эффективности ГМТУ и ТС в целом.

Обеспечение эффективности ТС зависит с одной стороны от того, в какой степени концепция ГМТУ будет соответствовать её назначению, условиям и режимам работы и предъявляемым требованиям [6, 7, 8]. С другой стороны — от степени разработанности методов, наличия технических средств и ресурсов, позволяющих реализовать её основные положения. Авторы считают, что несмотря на важность постоянного снижения потребления невозобновляемых ресурсов (углеводородов) и повышения экологической безопасности ТС, оценка концептуальных решений должна производиться с позиций экономической целесообразности. Только достижение стоимости владения, близкой к таковой для традиционных ТС, является критерием их рациональности и основой применения. Под стоимостью владения понимается стоимость 1 км пробега (показатель технико-экономического эффекта) [6]. Она включает цену приобретения за вычетом цены последующей продажи (через 3-5 лет) и существенно зависит от топлив-

ной экономичности, надежности, эксплуатационных расходов и обязательных платежей, отнесенных к пробегу ТС за срок службы.

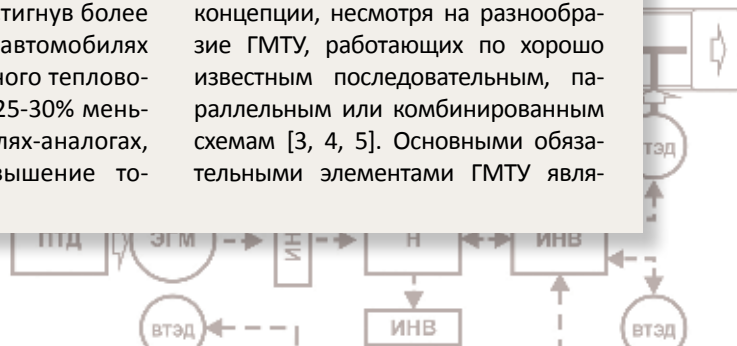
В 1990-1997 гг. была окончательно сформирована общественная потребность снижения парникового эффекта, повышения экологической безопасности ТС и др. (Европа, США) [3, 4, 5]. Авторы считают, что, к сожалению, концепция ГМТУ ТС, возникшая на так называемой «зеленой волне», имела существенный недостаток. Концептуальные решения недостаточно оценивались с позиций обеспечения достижения стоимости владения, близкой к таковой для традиционных ТС.

С 1997 г. (начало серийного выпуска первого легкового автомобиля «Toyota Prius») по 2007 гг. появилось более 50 концептов с ГМТУ и несколько серийно выпускаемых моделей. Объем их производства постоянно возрастал, достигнув более 700 000 в год. В этих автомобилях при мощности первичного теплового двигателя (ПТД) на 25-30% меньше, чем в автомобилях-аналогах, было достигнуто повышение то-

пливной экономичности в среднем на 30-40% при значительном снижении токсичности отработавших газов [1, 2, 3, 4, 5, 12].

Однако, серьезные недостатки таких ГМТУ, связанные со значительным усложнением конструкции, существенным увеличением массы ТС и соответствующим увеличением его продажной цены и, главное, стоимости его владения, несмотря на принятые в разных странах налоговые льготы, обусловили их ограниченное применение. Автомобили с ГМТУ в развитых странах заняли к 2007 г. всего около 2% рынка автомобилей практически без увеличения этой доли к 2011 г. [1, 2, 12]. Также оказалось проблематичным применение подобных ГМТУ на ТС другого назначения (грузовиках, автобусах и др.) [9].

Авторы сформулировали ряд общих принципов и положений этой концепции, несмотря на разнообразие ГМТУ, работающих по хорошо известным последовательным, параллельным или комбинированным схемам [3, 4, 5]. Основными обязательными элементами ГМТУ явля-



ются: первичный тяговый двигатель (ПТД), электрогенератор-мотор (ЭГМ), иногда объединенные в единый блок (ПТД-ЭГМ); инверторы (ИНВ); трансмиссия, вторичный тяговый электродвигатель (ВТЭД) и накопители (Н) различных типов: аккумуляторные батареи (АКБ), суперконденсаторы (СК) или их комбинации.

В результате частичного использования принципа разделения производства и потребления энергии, её накопления и рекуперации концепция ГМТУ базировалась на следующих положениях [3, 4, 5, 7, 8, 9]:

- первичный ТД и вторичные двигатели (ВТЭД), генератор (ЭГМ), инверторы, накопители и др. рассматриваются не как самостоятельные объекты оптимизации, а как подсистемы, рациональные параметры которых и алгоритмы управления ими определяются на стадии проектирования относительно требуемых выходных показателей ГМТУ (сложной энергопреобразующей системы) и эффективности ТС (надсистемы), в частности легковых автомобилей;

- основным источником энергии является ПТД, обеспечивающий среднюю потребляемую мощность ТС и требуемый постоянный уровень заряженности накопителя. Накопитель является вспомогательным источником энергии и обеспечивает работу вторичных электродвигателей на режимах, нерациональных для ПТД;

- ежедневная зарядка накопителя от внешнего источника не предусматривается.

Следствиями базовых положений концепции ГМТУ являются:

- объединение силовых (механических и электрических) и ча-

стично информационных потоков для достижения синергетического эффекта;

- снижение роли цены и характеристик отдельных подсистем в формировании синергетического эффекта за счет частичной оптимизации их параметров в своей области режимов работы;

- частичный переход от производства энергии пропорционально потреблению к разделённому производству энергии, её частичному накоплению и последующему потреблению в зависимости от потребности транспортного средства;

- рекуперация энергии при торможении и её повторное накопление для последующего использования;

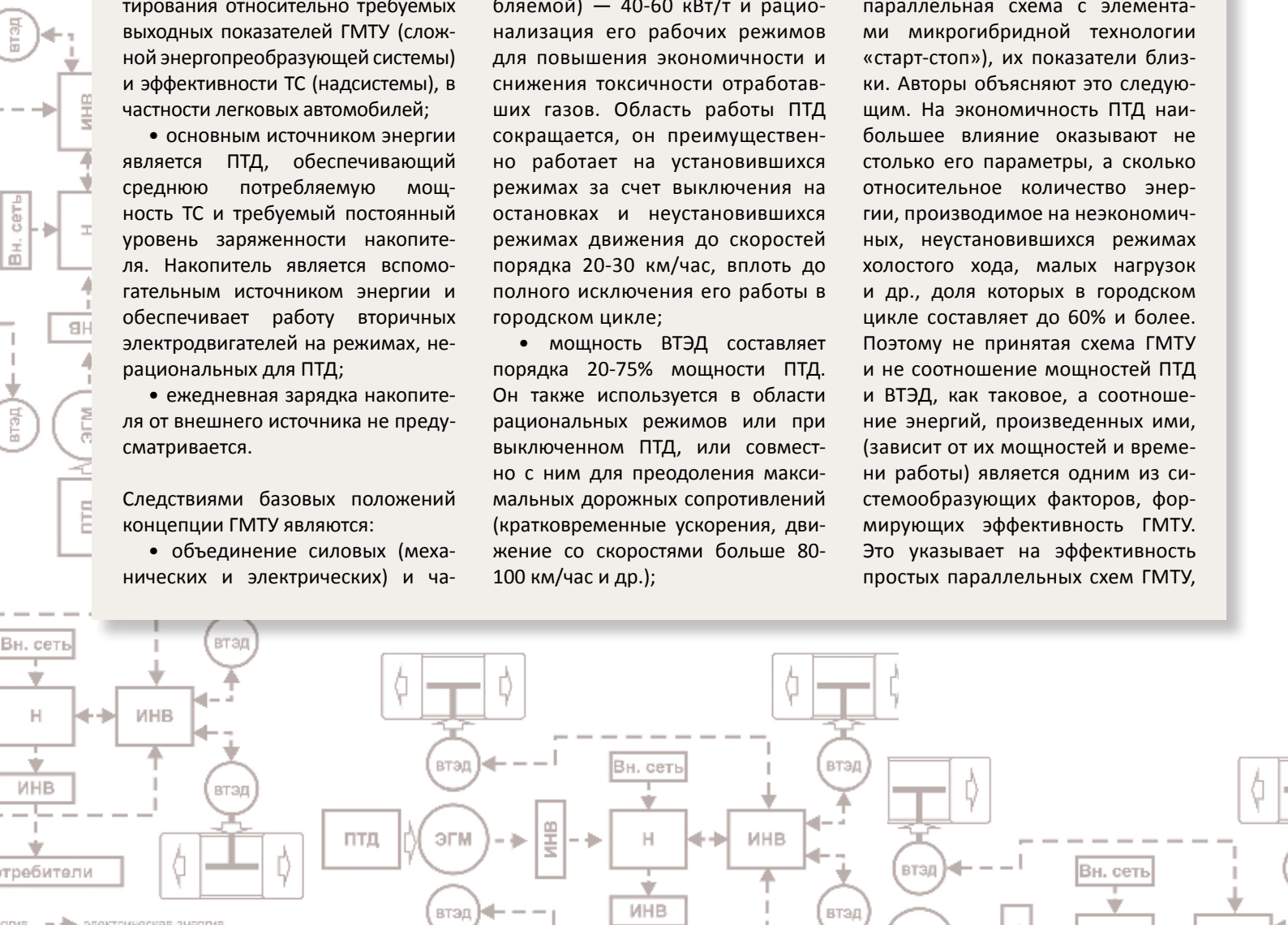
- максимально возможное снижение мощности ПТД (практически до уровня средней потребляемой) — 40-60 кВт/т и рационализация его рабочих режимов для повышения экономичности и снижения токсичности отработавших газов. Область работы ПТД сокращается, он преимущественно работает на установившихся режимах за счет выключения на остановках и неустановившихся режимах движения до скоростей порядка 20-30 км/час, вплоть до полного исключения его работы в городском цикле;

- мощность ВТЭД составляет порядка 20-75% мощности ПТД. Он также используется в области рациональных режимов или при выключенном ПТД, или совместно с ним для преодоления максимальных дорожных сопротивлений (кратковременные ускорения, движение со скоростями больше 80-100 км/час и др.);

- автоматическое управление работой первичного и вторичного двигателей и генератора с обеспечением их совместной или раздельной работы в зависимости от режима движения, условий эксплуатации и состояния заряженности накопителя;

- реализация стратегии и алгоритмов управления для рационального сочетания между экономичностью и токсичностью ПТД и уровнем заряженности накопителя для обеспечения требуемых выходных показателей ГМТУ и эффективности ТС.

Анализ показывает, что несмотря на принципиальные различия схем и параметров ГМТУ наиболее известных автомобилей — «Toyota Prius» (наиболее сложная комбинированная схема) и автомобилей типа «Honda Insight» (простая параллельная схема с элементами микрогибридной технологии «старт-стоп»), их показатели близки. Авторы объясняют это следующим. На экономичность ПТД наибольшее влияние оказывают не столько его параметры, а сколько относительное количество энергии, производимое на неэкономичных, неустановившихся режимах холостого хода, малых нагрузок и др., доля которых в городском цикле составляет до 60% и более. Поэтому не принятая схема ГМТУ и не соотношение мощностей ПТД и ВТЭД, как таковое, а соотношение энергий, произведенных ими, (зависит от их мощностей и времени работы) является одним из системообразующих факторов, формирующих эффективность ГМТУ. Это указывает на эффективность простых параллельных схем ГМТУ,



однако только при условии применения более совершенного ПТД, имеющего высокие показатели на режимах 20-30% нагрузок и выше. Применение сложных комбинированных схем, обеспечивающих работу ПТД на преимущественно установившихся режимах, позволяет несколько снизить требования к двигателю.

Начиная с 2004-2006 гг., а особенно с началом кризиса 2008 г., наблюдается определенное изменение общественных потребностей [1, 2, 12]. Вследствие постоянного роста цен на невозобновляемые ресурсы отмечается приоритетность рационального использования углеводородного топлива, обеспечение многотопливности. Экологическая безопасность становится ограничительным фактором и вполне обеспечивается выполнением требований стандартов. Появляется ряд новых технических средств [1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12]:

- ПТД с качественно улучшенными показателями (малоразмерные высокофорсированные дизели, двигатели принудительного воспламенения с расслоением смеси, турбонаддувом и степенью сжатия до 13-14);

- унифицированные системы «старт-стоп» и системы рекуперативного торможения (мощные стартеры или стартер-генераторы, приводы, блоки АКБ и суперконденсаторов, системы микропроцессорного управления и др.);

- эффективные накопители с требуемыми надежностью, энергетическими, массо-габаритными и экологическими показателями и прогнозируемым снижением цены по мере развития производства (литий-ионные АКБ и суперконденсаторы);

- современные ПТД-ЭГМ, в том числе на основе простых микроПТД-генераторов, использующих высокоскоростные встроенные электромашины переменного

тока с возбуждением постоянными магнитами;

- эффективные малогабаритные инверторы и регулируемые электроприводы, системы микропроцессорного управления и др.

Одновременно в Европе, США, Израиле, Японии, Корее, Китае и др., начиная с 2008-2010 гг. начинается создаваться инфраструктура для зарядки АКБ или их быстрой замены.

На взгляд авторов, после периода проб и ошибок, характерного для развития любых новых технических средств (ГМТУ), выбираются наиболее эффективные и простые решения, в наибольшей степени соответствующие назначению, условиям работы, предъявляемым требованиям и возможностям их осуществления. В результате этого появились две принципиально разные концепции ГМТУ. Общим для них является достижение стоимости владения ниже, чем для традиционных ТС при существенном улучшении экономичности и обеспечении требований экологической безопасности.

В основе первой концепции микроГМТУ (Stop & Start концепции), использующие простую параллельную схему, лежит следующее положение: основным источником энергии является ПТД, обеспечивающий производство энергии

пропорционально потреблению ТС и требуемый постоянный уровень заряженности накопителя. Между двигателем и трансмиссией устанавливается ЭГМ, совмещающий функции стартера, генератора и ВТЭД. Накопитель является вспомогательным источником энергии и обеспечивает пуск ПТД или кратковременную работу ВТЭД на режимах, нерациональных для ПТД.

Основными следствиями этого положения концепции являются:

- рационализация рабочих режимов ПТД для повышения экономичности и снижения токсичности отработавших газов. Область его работы сокращается за счет выключения на остановках и неустановившихся режимах движения до скоростей порядка 10 км/час;

- рекуперация энергии при торможении и её повторное накопление для последующего использования;

- мощность ЭГМ в режиме ВТЭД составляет порядка 10% мощности ПТД. Он преимущественно используется при выключенном ПТД;

- автоматическое управление пуском и остановом ПТД в зависимости от режима движения и условий эксплуатации с реализацией соответствующей стратегии и алгоритмов для обеспечения требуемых экономичности и токсичности двигателя и ТС в целом.

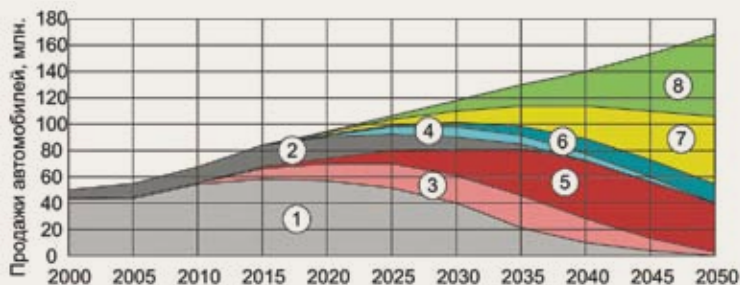


Рисунок 1. Сценарий изменения структуры производства автомобилей с различными типами моторно-трансмиссионных установок: 1 — МТУ с двигателями принудительного воспламенения; 2 — МТУ с дизелями; 3 — ГМТУ (ПТД-двигатель принудительного воспламенения); 4 — ГМТУ (ПТД-дизель); 5 — ГМТУ (схема PHEV, ПТД-двигатель принудительного воспламенения); 6 — ГМТУ (схема PHEV, ПТД-дизель); 7 — МТУ электромобилей; 8 — МТУ с топливными элементами

Главным преимуществом концепции микроГМТУ является полная адаптация компонентов как к конструкции ТС, так и к возможностям производства и сервисного обслуживания. В результате микроГМТУ превращается в одну из опций, устанавливаемых по желанию потребителя, а её цена не превышает 10-12% цены приобретения ТС. Прогноз структуры производства ТС с различными типами МТУ (рис. 1) показывает постоянный рост количества автомобилей с ГМТУ [1, 2, 12]. Так к 2020 г. прогнозируется рост ежегодных продаж автомобилей только с системой Stop & Start до более 35 млн. ед. [12].

Вторая концепция ГМТУ предусматривает использование простых последовательных схем ГМТУ, называемых «заряжаемый гибрид» (plug-in hybrid electric vehicle — PHEV) или гибрид с повышенным запасом хода (range extender electric vehicle — REEV), рис. 2 [1, 2, 3, 4, 5]. ГМТУ PHEV занимают особое место среди МТУ, являясь логическим завершением этапа совершенствования МТУ с электромеханическими трансмиссиями. С другой стороны, эти ГМТУ хорошо адаптированы как к конвертации в электромобиль, так и к замене ПТД-ЭГМ на топливные элементы [3, 4, 5]. Поэтому есть смысл рассматривать их как переходный этап в эволюции МТ, предусматривающей постепенный отказ от тепловых двигателей. Приведенный прогноз (рис. 1) показывает постоянный рост количества автомобилей с ГМТУ PHEV, начиная с 2012 г. [1, 2].

Авторами предлагается для обсуждения концепция ГМТУ PHEV, также обеспечивающая требуемую эффективность ТС и минимизацию стоимости его владения.

Концепция базируется на следующих положениях:

- первичный (ПТД или ПТД-ЭГМ) и вторичные двигатели (ВТЭД или МК), генератор (ЭГМ), инверторы, накопители, а также все другие по-

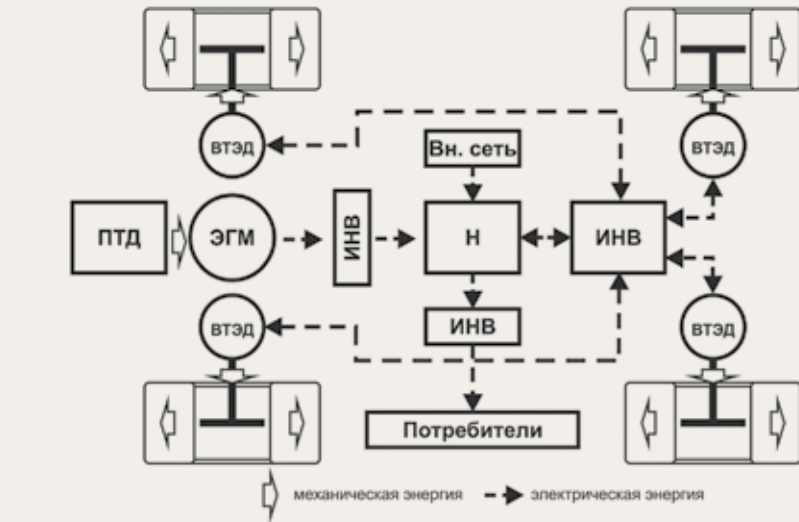


Рисунок 2. Вариант ГМТУ PHEV с индивидуальными ВТЭД и валами привода ведущих колес

требители энергии (системы освещения, световой и звуковой сигнализации, активной и пассивной безопасности, навигации, климат-контроля, различные приводы, вентиляторы, газораспределительные механизмы, топливные насосы и др.) рассматриваются не как самостоятельные объекты оптимизации, а как подсистемы, рациональные параметры которых и алгоритмы управления ими определяются на стадии проектирования относительно требуемых выходных показателей ГМТУ (системы) и эффективности ТС (надсистемы);

- основным источником энергии является накопитель, обеспечивающий требуемую мощность на всех режимах работы ТС;

- ежедневная зарядка накопителя от внешнего источника является обязательной и должна обеспечивать запас хода не менее 30-50 км;

- тепловой двигатель является вспомогательным источником энергии и обеспечивает подзарядку накопителя до требуемого уровня заряженности.

Следствиями базовых положений концепции ГМТУ являются:

- полное объединение силовых (механических и электрических) и

информационных потоков для достижения синергетического эффекта;

- существенное снижение роли цены и характеристик отдельных подсистем в формировании синергетического эффекта за счет полной оптимизации их параметров в своей области режимов работы;

- полный переход от производства энергии пропорционально потреблению к разделному производству энергии, её накоплению и последующему потреблению в зависимости от потребности транспортного средства;

- рекуперация энергии при торможении и её повторное накопление для последующего использования;

- снижение мощности ПТД (до уровня 15-20 кВт/т в зависимости от емкости накопителя) и обеспечение его работы только в области стационарного рационального режима;

- обеспечение накопителями требуемой мощности для преодоления максимальных сопротивлений движению и возможность её реализации ВТЭД (МК);

- автоматическое управление работой ПТД-ЭГМ и ВТЭД (МК) для реализации стратегии и алгоритмов управления, поддерживающих ра-

циональный уровень заряженности накопителя и обеспечивающих требуемые выходные показатели ГМТУ и эффективность ТС.

Особенностью ГМТУ PHEV является отсутствие кинематических связей между ПТД и ведущими колесами, что делает её предпочтительной не только для легковых автомобилей, но и для других ТС (автобусов, грузовых и специальных автомобилей). Её применение позволяет использовать имеющийся опыт разработки и эксплуатации ГМТУ с электро-механическими трансмиссиями или с МК. Существенное упрощение конструкции и компоновки машины, уменьшение массы ПТД, отсутствие механических трансмиссий и приводов существенно снижает массу ГМТУ и объекта МТ в целом, исключает динамические нагрузки [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Основной, тем не менее решаемой проблемой широкого внедрения ГМТУ этой схемы является высокая стоимость совре-

менных литий-ионных АКБ, имеющих высокую энергоёмкость. К сожалению, их ресурс резко уменьшается (до 30-50 тыс. км) при использовании в динамических режимах с большими токами разряда и соответствующим нагревом при ускорениях ТС. Это приводит к недопустимому увеличению стоимости владения. Имеется ряд средств решения проблемы, с учетом постоянного снижения стоимости АКБ по мере увеличения объемов производства [3, 4, 5, 9, 12]:

- ограничение емкости АКБ до рационального уровня при работе ТС в городском цикле только от накопителя за счет его зарядки от внешнего источника;
- объединение АКБ с СК, способными кратковременно обеспечивать большие токи разряда, а также эффективную рекуперацию энергии при торможении. При этом АКБ работает в благоприятном статическом режиме, а её ресурс увеличивается в 3-5 раз;

- применением только накопителей-СК при условии увеличения мощности ПТД до уровня средней потребляемой — 40-60 кВт/т.

Однако эти варианты требуют анализа для минимизации стоимости владения ТС.

Другим кардинальным средством совершенствования ГМТУ является применение ПТД других типов, в частности, микрогазотурбинных двигателей-электрогенераторов [11, 12].

ВЫВОД

Представлены для обсуждения основы современных концепций микроГМТУ и ГМТУ PHEV, на взгляд авторов, в наибольшей степени соответствующие назначению ТС, условиям их работы, предъявляемым современным требованиям и наличию средств и ресурсов осуществления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technology Roadmaps. Electric and plug-in hybrid electric vehicles (EV/PHEV) — Париж: OECD/IEA, 2009. — 47 p.
2. Energy Technology Perspectives 2010 — Scenarios & Strategies to 2050, Париж: OECD/IEA, 2010. — 650 p.
3. Husain I. Electric and hybrid vehicles: design fundamentals / I. Husain. — New York: CRC PRESS, 2010. — 523 p.
4. Ehsani M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design / M.Ehsani, Y. Gao, A. Emadi.- New York: CRC PRESS, 2010. — 534 p.
5. Златин, П.А. Электромобили и гибридные автомобили / П.А. Златин, В.А. Кеменов, И.П. Ксенович. — М.: Агроконсалт, 2004. — 416 с.
6. Арав Б.А. Методы и средства совершенствования и стабилизации характеристик моторно-трансмиссионных установок: Монография / Б.А. Арав.-Челябинск: ЧВВАКИУ, 2006. — 288 с.
7. Арав Б.А. Концепция экологически безопасной комбинированной энергетической установки городского автомобиля / Б.А. Арав, В.В. Руднев // Вестн. Рос. Акад. транспорта. — Вып. 5. — Курган: КГУ, 2005. — С. 112-114.
8. Келлер А.В. Принципы и методы распределения мощности между ведущими колесами автомобильных базовых шасси / А.В. Келлер, И.А. Мурог — Челябинск: ЧВВАКИУ, 2009. — 218 с.
9. Флоренцев С. Н. Тяговый электропривод в гибридных транспортных средствах. Идеология проектирования комплектного тягово-энергетического оборудования для гибридных транспортных средств / С. Н. Флоренцев, Д.Б. Изосимов // Электронные компоненты — 2009. — № 11. — С. 13–18.
10. Арав Б.А. Перспективы применения микрогазотурбинных двигателей-генераторов в гибридных моторно-трансмиссионных установках мобильной техники / Б.А. Арав, Н.Е. Александров // Вестн. Акад. Военных наук. — № 1(30). — М.: Воениздат, 2010. — С. 10-17.
11. Беседин С.Н. Научно-техническое обоснование и практическая реализация создания микротурбинного генератора мощностью 100 квт на основе современных расчетно-экспериментальных методов: Дис. ...канд. техн. наук /С.Н. Беседин.-С. Петербург: СПГПУ, 2011. — 142 с.
12. Сайт компании «Pike Research» (США) URL: <http://www.pikeresearch.com/> (дата обращения 15.06.2011).

