НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

Совершенствование процесса рекуперации энергии гибридного автомобиля

 # 07, июль 2013
DOI: 10.7463/0713.0588384

Бахмутов С. В., Филонов А. И., Баулина Е. Е.

УДК 629.113

Россия, ГНЦ ФГУП «НАМИ»
Россия, Университет машиностроения (МАМИ)
s.bakhmutov@nami.ru
filonov@mami.ru
baulina@mami.ru

Введение

Рекуперацией называется процесс возвращения части энергии для повторного использования в том же технологическом процессе. Этот процесс возможен на автомобилях с комбинированной энергетической установкой (КЭУ). Использование КЭУ позволяет повлиять на состояние накопителя энергии, т.к. в нем возможна регенерация энергии во время движения автомобиля.

Существует несколько путей для рекуперации на борту автомобиля с комбинированной энергетической установкой. При наличии двигателя внутреннего сгорания, обладающего избытком мощности для движения, этот избыток можно возвращать в батарею. Избыток энергии может образоваться при движении автомобиля на постоянной скорости и даже при ускорении автомобиля. Еще один резерв для пополнения запаса энергии – это рекуперативное торможение. Именно процесс возвращения энергии при торможении потенциально представляется основным источником для пополнения недостатка энергии и устранения ее отрицательного баланса.

В целях удобства для данного исследования будем использовать термин «бортовая система рекуперации энергии» как неотъемлемую часть всей комбинированной энергетической установки гибридного автомобиля. Одной из основных задач при разработке систем рекуперации является правильный выбор накопителя энергии, который позволит системе рекуперации создавать высокие замедления при торможении, воспринимая большие мощности при создании значительного тормозного момента, что

позволит автомобилю на некоторых режимах замедляться только при помощи рекуперативного торможения.

1 Анализ основных проблем при создании системы рекуперации

Основными задачами при разработке систем рекуперации являются следующие:

- правильный выбор накопителя энергии;
- разработка эффективного алгоритма работы КЭУ;
- определение наилучших параметров агрегатов КЭУ для увеличения времени использования рекуперативного торможения с достаточной эффективностью без вовлечения в работу фрикционных тормозов. Высокие замедления при торможении способна обеспечить система рекуперации, воспринимающая большие мощности, следовательно, создающая значительный тормозной момент, что позволит автомобилю на некоторых режимах замедляться только при помощи рекуперативного торможения.
- выбор рациональной схемы КЭУ с минимальными потерями при преобразовании энергии из одного вида в другой при ее передаче от источника к источнику. КПД преобразований зависит от схемы примененной КЭУ. Выбранная схема оказывает заметное влияние на эффективность процесса рекуперации.

В Университете машиностроения работы над рекуператорами энергии ведутся на протяжении ряда лет. Например, результаты исследований маховичных рекуператоров показали, что это техническое решение позволяет улучшить топливную экономичность малого автобуса почти на 30% [1].

Применение маховичных накопителей исключает преобразования энергии из одного вида в другой, что повышает КПД процесса рекуперации. Эти накопители обладают большой удельной мощностью. Однако, такие недостатки механических рекуператоров, как большие размеры, необходимость применения бесступенчатой передачи, высокие требования к безопасности и необходимость учета аэродинамических эффектов из-за высокой скорости вращения маховика ограничивают возможности их применения в системах рекуперации массовых автомобилей.

В настоящий момент в рамках научно-образовательного центра «Автомобили с комбинированными энергетическими установками» Университета машиностроения ведутся работы над накопителями электрической энергии – аккумуляторными батареями. Комбинированная энергетическая установка с данными накопителями используется на автомобиле «МАМИ-КВАНТ», созданном сотрудниками центра (в соответствии с рисунком 1) [2].



Рисунок 1 - Автомобиль «МАМИ-КВАНТ»

В таблице 1 дана характеристика используемого на автомобиле накопителя энергии.

Таблица 1 – Характеристики накопителя энергии

Марка и модель аккумулятора	Optima YellowTop
Напряжение, В	120
Аккумуляторная батарея (тип)	свинцово-кислотная
Количество аккумуляторов	10
Масса общая, кг	190
Макс. емкость (при 3-х часовом разряде), Ач	55

На рисунке 2 можно видеть расположение батареи на борту автомобиля.



Рисунок 2 - Аккумуляторные батареи

При использовании в системе рекуперации автомобилей с КЭУ накопителей электрической энергии возникает ряд проблем, обусловленных внутренними свойствами этих накопителей. Например, при высоком уровне заряда аккумуляторной батареи эффективность процесса подзарядки резко снижается.

Кроме того, невозможно заряжать батареи при низких скоростях движения автомобиля из-за того, что при малой частоте вращения якоря электромашины, работающей в режиме генератора, на возбуждение ее обмотки тратится больше энергии, чем возвращается в батарею. Данные ограничения влияют на величину тормозного момента, создаваемого генератором.

Тип батарей также накладывает ряд ограничений на процесс рекуперации. В нашем случае во избежание негативных эффектов, связанных с разрушением батареи, ток при ее зарядке не мог быть больше порогового значения. Это повлекло за собой уменьшение мощности рекуперации. Кроме этого, батарея имеет ограничение напряжения на терминальных выводах, превышение которого может привести к ее разрушению (в нашем случае ограничение составило 156 В).

В связи с вышесказанным необходимо тщательно подходить к выбору типа накопителя электрической энергии. В настоящее время в системах рекуперации гибридных автомобилей используются более перспективные никель-металлогидридные и литий-ионные аккумуляторы, а также в будущем возможно применение суперконденсаторов и комбинации «суперкондесатор-батарея».

2 Принципы выбора накопителя энергии

Выбор аккумуляторной батареи базируется на анализе и сравнении свойств и показателей аккумуляторов различных типов. Во-первых, при проектировании комбинированной энергетической установки необходимо учитывать удельные характеристики накопителей, такие как удельная энергия [Вт*ч/кг] и удельная мощность [Вт/кг]. Для свинцово-кислотных аккумуляторов, установленных на экспериментальном автомобиле «МАМИ-КВАНТ» абсолютные значения данных показателей сравнительно невелики, но их зависимость друг от друга удовлетворительна – при увеличении удельной мощности, например, в режиме зарядки, что требуется для обеспечения необходимой мощности рекуперации, удельная энергия, т.е. способность запасать полученное количество энергии, отнесенное к единице массы батареи, уменьшается незначительно. Для никель-металлогидридных батарей данная зависимость оптимальна – при увеличении удельной мощности в определенных пределах удельная энергия почти не уменьшается. Это выгодно отличает данные аккумуляторы от литий-ионных, у которых удельная энергия может уменьшиться в несколько раз при незначительном увеличении удельной мощности. Но этот недостаток в данном случае может компенсироваться увеличением числа аккумуляторов в батарее, так как масса одного литий-ионного аккумулятора намного меньше, чем свинцово-кислотного и никель-металлогидридного. В итоге масса батареи может быть одинаковой у всех трех типов аккумуляторов, а удельная мощность заметно отличаться.

Данный факт указывает на то, что при выборе накопителя необходимо анализировать и другие показатели батарей, такие как: масса, стоимость, освоенность в производстве, приспособленность к конкретным условиям эксплуатации, величину жизненного цикла и т.д. При разработке комбинированной энергетической установки для автомобиля «МАМИ-КВАНТ» выбор был сделан в пользу свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, потому что по стоимости, приспособленности к эксплуатации при низких температурах и освоенности в производстве данные батареи заметно отличаются в лучшую сторону от батарей других типов, а именно эти показатели, при допустимых ограничениях по удельным мощности и энергии, были определяющими в проекте. Благодаря высокой удельной мощности, практически неограниченному числу циклов заряда-разряда и широкому температурному диапазону работы суперконденсаторы представляются перспективным источником энергии, но в настоящий момент их низкие удельные энергетические параметры и высокая стоимость не позволяют говорить о возможности их широкого применения в качестве тяговых на автомобилях с КЭУ.

Упомянутые выше комбинации батарей с маховиками и суперконденсаторами также являются перспективными. Такое решение позволяет избежать ограничений по мощности зарядки, накладываемое батареей, так как в этом случае именно суперконденсатор воспринимает большую мощность и сразу передают ее в батарею, которая используется для хранения возвращенной энергии. В этом случае при подзарядке исключена возможность ее разрушения.

3 Проведение экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований необходимо определить алгоритм работы автомобиля с КЭУ. Для исключения работы ДВС на режимах повышенной токсичности и высоких удельных расходов топлива автомобиль с КЭУ должен трогаться и разгоняться до определенной скорости в электрорежиме.

Далее необходимо определить до какой скорости автомобиль должен разгоняться в электрорежиме, какая передача должна быть включена в коробке передач в дальнейшем, на каком двигателе – электрическом или ДВС – осуществлять равномерное движение, сколько времени должен работать ДВС в цикле, чтобы обеспечить полную зарядку накопителей к концу цикла. При этом автомобиль с КЭУ должен обладать необходимой динамикой разгона с целью исключения возможности торможения городского транспортного потока, то есть ускорения при разгоне на электротяге должны быть порядка 1 м/с^2. Так как электродвигатель обеспечивает требуемые ускорения в достаточно узком диапазоне скоростей автомобиля, то при достижении определенной скорости в работу вступает ДВС, работающий на режиме минимальных удельных расходов топлива. В случае избытка мощности ДВС разница между мощностью требуемой для движения и мощностью, которую обеспечивает ДВС, направляется в накопитель энергии через электромашину, работающую в режиме генератора. Если мощности ДВС не достаточно, дополнительно включается тяговый электродвигатель. При торможении происходит рекуперация энергии, батареи заряжаются.

Кроме того, за время городского цикла нужно обеспечить баланс энергий – энергия, затрачиваемая на разгон и равномерное движение автомобиля в цикле, должна быть компенсирована энергией, рекуперируемой в процессе замедления и вырабатываемой двигателем внутреннего сгорания в течение дополнительного времени работы в цикле. Для обеспечения экономии топлива двигатель внутреннего сгорания должен работать в любом режиме по характеристике минимальных удельных расходов.

Далее требуется определить количество энергии, затраченной электродвигателем из накопителя при разгоне, и энергию, направленную в накопитель от ДВС. Для этого

необходимо для каждого интервала «разгон-равномерное движение-торможение» цикла получить и построить график баланса мощностей при движении автомобиля в городском цикле. Интегрирование мощностей позволит определить затраченную и рекуперируемую энергию.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции на участке Δt:

$$\overline{N}_j = \frac{G_a}{g} \cdot j_a \cdot \delta_j \cdot \frac{\overline{V}_a}{3.6},$$

где G_a – полный вес автомобиля, g – ускорение свободного падения, j_a – ускорение автомобиля, δ_j – коэффициент учета инерции вращающихся масс автомобиля, $\overline{V}_a$ - среднее значение скорости автомобиля в выбранном интервале времени, км/ч.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению на участке Δt:

$$\overline{N}_f = G_a \cdot f_0 \cdot \left(1 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot \overline{V}_a^2\right) \cdot \frac{\overline{V}_a}{3.6},$$

где f_0 – номинальное значение коэффициента сопротивления качению.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха на участке Δt:

$$\overline{N}_w = \frac{c_x}{2} \cdot \rho \cdot F \cdot \frac{\overline{V}_a^3}{3.6^3},$$

где C_x - коэффициент сопротивления воздуха, ρ - плотность воздуха, F - площадь лобового сопротивления автомобиля.

Средняя мощность, затрачиваемая на преодоление суммарного сопротивления на участке Δt:

$$\overline{N}_\Sigma = \overline{N}_f + \overline{N}_w + \overline{N}_j .$$

При переключении передач мощность затрачивается только на преодоление сил сопротивления качению и воздуха, при этом $N_j = 0$.

Мощность двигателя при равномерном движении затрачивается на преодоление сопротивления воздуха и сопротивление качению.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению на участке равномерного движения:

$$N_f = G_a \cdot f_0 \cdot \left(1 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot V_{р.д.}^2\right) \cdot \frac{V_{р.д.}}{3.6},$$

где $V_{р.д.}$ – скорость равномерного движения в городском цикле.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха на участке равномерного движения:

$$N_w = \frac{c_x}{2} \cdot \rho \cdot F \cdot \frac{V_{p.\partial.}^3}{3.6^3}.$$

Мощность, затрачиваемая на преодоление суммарного сопротивления на участке равномерного движения:

$$N_{p.\partial.\Sigma} = N_f + N_w.$$

На этапе замедления происходит рекуперация энергии автомобиля. Мгновенное значение мощности при рекуперации представляет собой разницу мощности, затрачиваемой на преодоление сил инерции и мощности, затрачиваемой на преодоление дорожного сопротивления:

$$N_{рек} = N_j - (N_f + N_w).$$

Интегрирование мощностей позволяет определить необходимую в фазе разгона и равномерного движения энергию и энергию, рекуперируемую в фазе замедления.

Энергия, рекуперируемая в фазе замедления:

$$A_{\text{рек}} = \int_{t_\text{н}}^{t_\text{к}} N_{\text{рек}} \times dt$$

Так как накопленная энергия меньше затраченной на фазе разгона, то равномерное движение только на электродвигателе невозможно. Для зарядки накопителя требуется дополнительное время работы ДВС при равномерном движении.

Для определения времени работы ДВС и электродвигателя при движении в цикле требуется составить баланс энергий в каждом интервале «разгон-равномерное движение-торможение» цикла: энергия, затрачиваемая на разгон и равномерное движение в цикле должна быть равна сумме энергии, накопленной в процессе замедления и вырабатываемой ДВС при разгоне и равномерном движении.

$$\text{А}_{\text{раз.}} + \text{А}_{\text{р.д.}} = \text{А}_{\text{нак.}} + \text{А}^{\text{ДВС}}{}_{\text{нак.}} + \text{А}_{\text{доп.}},$$

где $\text{А}_{\text{раз.}}$ - энергия, затраченная электродвигателем на фазе разгона в городском цикле, $\text{А}_{\text{р.д.}}$ - энергия затрачиваемая электродвигателем на фазе равномерного движения при движении в электрорежиме, $\text{А}_{\text{нак.}}$ – энергия, накопленная в процессе замедления, $\text{А}_{\text{нак.}}^{\text{ДВС}}$ – энергия, вырабатываемая ДВС при разгоне, $\text{А}_{\text{доп.}}$ – энергия, направляемая в накопитель при равномерном движении.

Для прохождения заданного городского цикла с использованием средств вычислительной математики был составлен алгоритм работы КЭУ, позволяющий прийти к энергетическому балансу в конце цикла (в соответствии с рисунком 3).

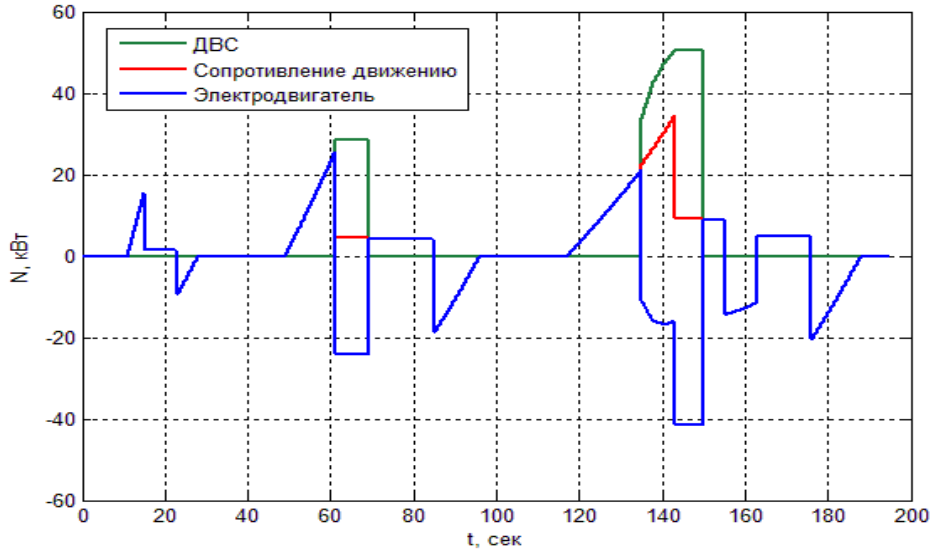


Рисунок 3 - Распределение мощности при движении в цикле ECE-15

Первый участок - автомобиль движется в электрорежиме.

Второй участок - автомобиль разгоняется в электрорежиме. При достижении заданной скорости 32 км/ч в работу вступает ДВС, при этом в коробке передач включена 3 передача. Из-за избытка мощности ДВС разница между мощностью требуемой для движения и мощностью, которую обеспечивает ДВС, направляется в накопитель энергии через электромашину. Через 10 секунд ДВС выключается и движение продолжается в электрорежиме.

Третий участок – автомобиль разгоняется в электрорежиме. При достижении заданной скорости 35 км/ч в работу вступает ДВС. В течение следующих 15 секунд работы ДВС избыточная мощность так же через электромашину направляется в накопитель. Оставшуюся часть цикла автомобиль проходит в электрорежиме.

Сотрудниками научно-образовательного центра были проведены стендовые и дорожные испытания автомобиля с комбинированной энергетической установкой. В ходе испытаний была выполнена оценка эффективности работы системы рекуперации энергии торможения и ее влияния на топливную экономичность автомобиля с КЭУ. Так как данный автомобиль имеет возможность накапливать энергию не только во время торможения, а также в режимах разгона и равномерного движения, это также было учтено при расчете расхода топлива [3].

Испытания проводились в соответствии с Правилами № 83 по европейскому городскому циклу ECE-15.

4 Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты испытаний показали, что применение комбинированной энергетической установки значительно улучшает топливную экономичность и экологичность автомобиля. С учетом норм Правил № 101 ЕЭК ООН для автомобилей с КЭУ эквивалентный расход топлива составил 12.4 л/100 км. Экономия топлива при компенсации дисбаланса энергии получена за счет выключения ДВС при замедлении, остановках и в начальной фазе разгона автомобиля. Кроме этого, экономия обеспечивается рекуперацией энергии. Этот процесс иллюстрируется таблицей 4:

Таблица 4 - Экономия топлива с учетом рекуперации

	Рекуперация при торможении	Подзарядка батареи при равномерном движении	Подзарядка батареи во время разгона
Снижение расхода топлива, л/100 км	0.6	1.71	0.28
Возвращенная энергия, кДж	55.61	156.91	25.74
Доля возвращенной энергии	23	66	11

Таблица 4 демонстрирует возможности рекуперации на автомобиле «МАМИ-КВАНТ». Наибольшую долю возвращенной энергии дает рекуперация при равномерном движении автомобиля в цикле, когда двигатель внутреннего сгорания работает по характеристике минимальных удельных расходов топлива, а значит с почти полностью открытой дроссельной заслонкой, а избыток энергии направляется в накопитель. Также небольшой вклад вносит и подзарядка батареи при разгоне автомобиля в цикле, когда также образуется небольшой избыток энергии при работе ДВС по характеристике минимальных удельных расходов топлива. Рекуперация при торможении возвращает в батарею 23% энергии. Но общая эффективность процесса рекуперативного торможения невелика. Данный факт иллюстрирует таблицей 5.

Таблица 5 - Эффективность процесса рекуперации

Свободная кинетическая энергия при торможении, кДж	457.16
Энергия, возвращенная в накопитель при торможении, кДж	55.61
Эффективность, %	12

Как можно видеть из таблицы 5, при торможении запасается лишь 12% от всей кинетической энергии, которую теоретически можно было бы вернуть в накопитель во время замедления. Это произошло из-за того, что процесс рекуперации невозможен при низких скоростях движения и по причине ограничения тока (а значит и мощности) зарядки во избежание разрушения свинцово-кислотных батарей, установленных на автомобиле.

5 Рекомендации по выбору накопителя энергии

На основе анализа представленных на рынке гибридных автомобилей и аккумуляторов энергии были сформированы требования к «идеальному» аккумулятору, применение которого позволит решить большинство существующих проблем и простимулирует автопроизводителей к широкому внедрению КЭУ на автомобилях. Основными требованиями, которым должен удовлетворять аккумулятор, в том числе с учетом отечественных условий, являются:

- Цена за кВт*ч должна быть ниже 500 $;
- Диапазон рабочих температур: -50 … +80 °С;
- Число циклов заряд-разряд: более 2000;
- Способность к микроциклированию;
- Удельные характеристики:
    - Удельная энергия более 300 Вт*ч/кг,
    - Удельная мощность выше 500 Вт/кг;
- Способность воспринимать перегрузки свыше 20С;
- Пожаро- и взрывобезопасность;
- Экологичность в полном жизненном цикле.

С учетом сделанных выводов в настоящее время ведется работа по созданию модернизированной системы накопления энергии на базе современных литий-ионных аккумуляторов энергии. В основе блока накопителя лежат аккумуляторные ячейки фирмы Thunder Sky, приведенные на рисунке 4. Параметры ячеек приведены в таблице 6. Указанные ячейки объединены в модули. Каждый модуль имеет систему контроля текущего состояния по уровню заряда и температуре, а также систему выравнивания заряда аккумуляторов в модуле. Накопитель требуемой емкости и напряжения набирается

из вышеуказанных модулей, оснащается системой поддержания рабочей температуры в узком диапазоне и устанавливается на автомобиль. Форму накопителя можно менять в зависимости от компоновочных особенностей базового автомобиля.



Рисунок 4 – Общий вид аккумулятора энергии

Таблица 6 – Характеристика аккумулятора энергии

Показатель	Значение
Номинальная емкость, А*ч	40
Напряжение разряда, В	2,8
Напряжение заряда, В	4,0
Максимальный зарядный ток	3С
Максимальный разрядный ток (постоянный)	3С
Максимальный разрядный ток (импульсный)	20С
Номинальный зарядный/разрядный ток	0,5С
Количество циклов при 80% разряде	Более 3000
Количество циклов при 70% разряде	Более 5000
Температура корпуса, ^{0}С	Не более 200
Рабочая температура, ^{0}С	-45 … 85
Саморазряд	Не более 3% в месяц
Масса, кг	1,6

Одним из преимуществ данных аккумуляторов является возможность в ближайшей перспективе организации их массового производства на территории России, что приведет к снижению их цены и повышению доступности компонентной базы для КЭУ.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что использование рекуперации положительно влияет на топливную экономичность и экологичность автомобиля, однако ее эффективность на автомобиле «МАМИ-КВАНТ», относительно невысока. Во многом из-за несовершенства бортового накопителя энергии. Поэтому для улучшения параметров рекуперации необходимо провести ряд усовершенствований, а именно:

- применить накопители энергии с высокими удельными мощностными и энергетическими показателями;
- применить комбинированную систему накопления энергии, состоящую из высокомощных конденсаторов и тяговых батарей (в перспективе).

Список литературы

1. Фиронов А.М. Повышение топливной экономичности городского автобуса путем применения рекуператора энергии торможения: дис. … канд. техн. наук. М., 1987. 188 с.
2. Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Филонов А.И. Работы МГТУ «МАМИ» в области автомобилей с гибридными силовыми установками // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 2 (20). С. 17-21.
3. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками / С.В. Бахмутов, А.Л. Карунин, А.В. Круташов, В.В. Ломакин, В.В. Селифонов, К.Е. Карпухин, Е.Е. Баулина, Ю.В. Урюков. М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 72 с.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408
electronic scientific and technical journal

Improvement of recuperation for a hybrid vehicle

 # 07, July 2013
DOI: 10.7463/0713.0588384

Bakhmutov S.V., Filonov A.I., Baulina E.E.

Russia, Federal State Unitary Enterprise «Central Scientific Research Automobile and Engine Institute»
Russia, Moscow State Universityof Mechanical Engineering (MAMI) University of Mechanical Engineering
s.bakhmutov@nami.ru
filonov@mami.ru
baulina@mami.ru

In this article the authors analyze various energy recovery systems of hybrid vehicles. Conclusions on inadequacy of existing technical solutions were drawn. The article also describes principles of selecting an energy recovery device that meets the performance level requirements of a hybrid vehicle. The authors describe the construction of an experimental vehicle with a hybrid powertrain. They also developed an algorithm of the operation of a vehicle with a hybrid powertrain during its movement in the urban cycle, which takes power balance in the drive into account. Results of the experimental research of a vehicle confirmed existence of limitations associated with a mounted energy storage device and electrical components. In addition, requirements for an "ideal" battery were specified.

Publications with keywords: energy performance, car, hybrid, recuperation
Publications with words: energy performance, car, hybrid, recuperation

References

1. Fironov A.M. *Povyshenie toplivnoy ekonomichnosti gorodskogo avtobusa putem primeneniya rekuperatora energii tormozheniya. Kand. diss*. [Increase of fuel economy of city bus through the use of recuperator of braking energy. Cand. diss.]. Moscow, 1987. 188 p.

2. Bakhmutov S.V., Selifonov V.V., Filonov A.I. Raboty MGTU «MAMI» v oblasti avtomobiley s gibridnymi silovymi ustanovkami [Scientific activity of MSTU «MAMI» in the field of hybrid electric vehicles]. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2011, no. 2 (20), pp. 17-21.

3. Bakhmutov S.V., Karunin A.L., Krutashov A.V., Lomakin V.V., Selifonov V.V., Karpukhin K.E., Baulina E.E., Uryukov Yu.V. *Konstruktivnye skhemy avtomobiley s gibridnymi silovymi ustanovkami* [Structural designs of vehicles with hybrid power plants]. Moscow, MSTU «MAMI» Publ., 2007. 72 p.