

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629844>

Оригинальное исследование



К выбору параметров аккумуляторной батареи гибридного автомобиля категории М₁

А.В. Шабанов¹, А.Е. Есаков², В.В. Бернацкий², П.А. Красавин³

¹ Научно-исследовательский Центр по испытаниям и доводке автотехники Научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института (НАМИ), Москва, Российская Федерация;

² Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;

³ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для оптимизации работы силовой установки гибридного автомобиля необходим правильный выбор параметров его тяговой аккумуляторной батареи, которые в значительной степени влияют на алгоритм управления и зарядно-разрядный баланс. Наличие методики, позволяющей обоснованно осуществить такой выбор в зависимости от характеристик целевого автомобиля, условий и режимов его эксплуатации, даст возможность повысить показатели энергоэффективности.

Цель — разработка методики расчёта параметров тяговой аккумуляторной батареи гибридного автомобиля с применением энергетического зарядно-разрядного баланса его силовой установки.

Методы. Предложена математическая модель зарядно-разрядного энергетического баланса, с использованием которой можно произвести соответствующие расчёты по количеству энергии, затраченной силовой установкой при движении автомобиля по этапам европейского городского цикла, и проанализировать различные алгоритмы управления ею на предмет достижения максимальной энергоэффективности, а также произвести подбор ёмкости и мощности тяговой батареи. Основой для расчётов послужил цикл, описанный в Правилах ООН № 83.

Результаты. Рассмотрен процесс накопления энергии в тяговой аккумуляторной батарее, указаны критерии выбора алгоритма работы силовой установки автомобиля. Определена энергия движения автомобиля в городском цикле с учётом времени работы агрегатов и рассчитан зарядно-разрядный энергетический баланс, что, в свою очередь, позволило найти должную ёмкость батареи. Установлено, что значение заряженности батареи в конце цикла должно быть равно первоначальному значению, что позволяет использовать батарею меньшей ёмкости и обеспечить максимальную энергоэффективность силовой установки. Также по результатам расчётов вынесены рекомендации, касающиеся оптимизации удельных энергетических и массогабаритных показателей батареи.

Заключение. Предложенная методика позволяет осуществить обоснованный выбор параметров силовой установки гибридного автомобиля для обеспечения её энергоэффективности.

Ключевые слова: автомобиль с электроприводом; энергетическая характеристика; тяговая аккумуляторная батарея; зарядный баланс; энергоэффективность.

Как цитировать:

Шабанов А.В., Есаков А.Е., Бернацкий В.В., Красавин П.А. К выбору параметров аккумуляторной батареи гибридного автомобиля категории М₁ // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 3. С. 222–231. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629844>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629844>

Original Study Article

Selection of battery parameters for a M₁ category hybrid vehicle

Alexander V. Shabanov¹, Alexey E. Esakov², Vladislav V. Bernatsky², Pavel A. Krasavin³

¹ Central Scientific and Research Automobile and Automotive Engines Institute (NAMI), Moscow, Russian Federation;

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;

³ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: To optimize the operation of a hybrid vehicle power plant, it is necessary to select the parameters of its traction battery correctly, which significantly affect the control algorithm and charge-discharge balance. The presence of a method that helps to make a reasonable choice depending on the characteristics of the target vehicle, the conditions and modes of its operation will make it possible to increase energy efficiency indicators.

AIM: Development of the method for calculating the parameters of a hybrid vehicle traction battery using the energy charge-discharge balance of its power plant.

METHODS: A mathematical model of the charge-discharge energy balance has been proposed. Using this model, it is possible to make appropriate calculations on the amount of energy expended by the power plant when a vehicle moving through the stages of the European urban cycle, and to analyze various algorithms for controlling the power plant to achieve maximal energy efficiency, as well as to select capacity and power of a traction battery. The basis for the calculations was the cycle described in the UN Regulation No. 83.

RESULTS: The process of energy accumulation in a traction battery is considered, and criteria for choosing an algorithm for the operation of the vehicle's power plant are indicated. The energy of vehicle motion in the urban cycle was determined, taking into account the operating time of the units, and the charge-discharge energy balance was calculated, which, in turn, made it possible to find the proper battery capacity. It has been found that the battery charge value at the end of the cycle should be equal to the initial value, which allows the use of a lower capacity battery and ensures maximal energy efficiency of the power plant. Also, based on the calculation results, recommendations were made regarding the optimization of the specific energy and weight-size parameters of the battery.

CONCLUSION: The proposed method is helpful to make a reasonable choice of a hybrid vehicle power plant parameters to ensure its energy efficiency.

Keywords: electric vehicle; energy characteristics; traction battery; charging balance; energy efficiency.

To cite this article:

Shabanov AV, Esakov AE, Bernatsky VV, Krasavin PA. Selection of battery parameters for a M₁ category hybrid vehicle. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(3):222–231. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629844>

Received: 02.04.2024

Accepted: 28.10.2024

Published online: 24.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

Проблема развития автомобилей с электроприводом на современном этапе в России стала одной из основных в сфере автомобилестроения. Широкое применение таких автомобилей связано с возможностью решения проблемы снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и достижениями высокой энергоэффективности силовой установки (СУ). Одним из перспективных направлений развития в данной сфере является использование силовых установок для гибридных автомобилей (ГА).

Накопленный мировой опыт по эксплуатации автомобилей с электроприводом позволяет утверждать, что одним из основных путей совершенствования СУ является правильный выбор параметров СУ и алгоритма управления ею. В литературных источниках нет общепризнанной специалистами рабочей методики расчёта параметров СУ и, в частности, поэтапного расчёта параметров тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) ГА. Об этом свидетельствуют различные данные по достигнутым топливно-энергетическим показателям ГА, находящимися в пределах 20...45% от исходных [1, 2]. Такие разработки в определённой степени являются «ноу-хау» у специалистов зарубежных фирм. И это в значительной мере сдерживает разработку новых образцов СУ для отечественных ГА.

ЦЕЛЬ

При проектировании ГА одной из задач является выбор энергетических характеристик агрегатов его СУ и, в частности, ёмкости и мощности ТАБ. Правильный выбор позволит достичь высокой энергоэффективности СУ, оптимизировать работу ТАБ, снизить массу и стоимость. Проблема токсичности выбросов вредных веществ ДВС по требованиям Правил ООН № 83 решается за счёт максимального использования электропривода. Как показывают испытания, эта мера позволяет на порядок снизить выбросы ГА по сравнению с автомобилями, оборудованными ДВС как единственными источниками механической энергии [1].

Для расчёта параметров ТАБ удобно использовать математическую модель энергетического баланса СУ при движении автомобиля по европейскому циклу Правил ООН № 83. Математическая модель позволяет рассматривать различные варианты функционирования СУ, корректировать алгоритм управления ею с учётом энергоэффективности, подбирать параметры электродвигателя (ЭД) и ТАБ. Европейский цикл Правил ООН № 83 хорошо подходит для математического моделирования, так как он достаточно прост для воспроизведения, имеет сравнительно небольшое число реальных режимов движения автомобиля, таких как равномерное движение, разгон на разных передачах и замедлений при торможении [1, 3]. Выполнить же расчёты энергетического баланса

ТАБ по циклам США и Японии с большим числом режимов движения, с переменными нагрузками и частотами вращения коленчатого вала весьма затруднительно. Выбор характеристик ТАБ в этих циклах, по-видимому, можно выполнить только эмпирическим путём.

Для оптимизации работы СУ необходимо определить принципы, на которых выстраивается её функционирование и критерии оценки такового. Главным критерием эффективности функционирования СУ, как будет показано ниже, является оптимальный зарядно-разрядный энергетический баланс ТАБ.

Выбор параметров ТАБ в предлагаемой методике осуществляется на основе следующих условий:

- 1) Ёмкость ТАБ должна быть использована с максимальной эффективностью. При этом батарея не должна иметь слишком большие габариты, а её функционирование должно осуществляться в допустимых пределах зарядки-разрядки.
- 2) Для повышения коэффициента полезного действия (КПД) СУ электроэнергия от генератора на ЭД должна по возможности передаваться напрямую, минуя промежуточный накопитель – ТАБ.
- 3) Значение заряженности ТАБ в конце испытательного цикла должно быть равно первоначальному значению. Это обеспечивает нулевой энергетический зарядно-разрядный баланс ТАБ и наибольший КПД СУ.

Важно также максимально эффективно использовать диапазон изменения степени заряженности ТАБ. Это поддерживает определённый энергетический баланс и позволяет использовать батарею меньшей ёмкости. Дефицит зарядной энергии батареи при неправильно выбранном алгоритме функционирования СУ приведёт к увеличению расхода топлива ДВС ГА. Продемонстрируем данный тезис на приведённых ниже примерах.

МЕТОДЫ

Рассмотрим вначале один из возможных вариантов неоптимального алгоритма управления СУ ГА. Пусть движение автомобиля осуществляется со сравнительно малыми значениями скорости в транспортном потоке на трассе в соответствии с дорожной ситуацией. В данном случае, если в СУ работает только ДВС на частичной нагрузке, то его КПД, как известно, имеет низкое значение.

Для повышения энергоэффективности СУ алгоритм управления ею должен предусмотреть подачу сигналов от датчиков скорости и нагрузки на блок управления с целью отключения ДВС и перехода в режим электротяги. Однако если ТАБ находится в разряженном состоянии, у автомобиля нет возможности двигаться в режиме электротяги. В данной ситуации для обеспечения наибольшей эффективности работы СУ необходимо включение ДВС с переходом его работы на режим максимальной подачи рабочей смеси, в котором значение КПД ДВС является наивысшим. При этом большая часть мощности ДВС

должна идти через генератор на зарядку ТАБ, а оставшаяся — на реализацию движения автомобиля. Таким образом, при разряженной ТАБ необходимо предусмотреть запуск ДВС как для движения, так и для её подзарядки. Если в ГА электротяга используется недостаточно, это отражается на зарядно-разрядном энергетическом балансе (ЗРЭБ) ТАБ и, как будет показано ниже, приводит к низкой энергоэффективности СУ.

Ёмкость и мощность ТАБ должны быть достаточными для приёма электроэнергии от генератора, а запас мощности ДВС должен обеспечить её подзарядку. Алгоритм управления СУ выбирается исходя из дорожных условий и сигналов, поступающих от датчиков скорости, нагрузки и уровня заряженности ТАБ, и должен предусматривать переход на функционирование в экономичный режим электротяги. При интенсивном разгоне автомобиля часть мощности ДВС также должна быть направлена на преодоление сил сопротивления движению, а другая часть — на подзарядку ТАБ. Это возможно при средних и больших значениях частот вращения коленчатого вала, так как на этих режимах ДВС имеет определённый запас мощности, который и обеспечит подзарядку [4].

ДВС при работе на выбранных скоростных режимах городского цикла (ГЦ) должен включаться на полную нагрузку для достижения наибольшего значения КПД и энергоэффективности СУ. В данном случае от ДВС на ТАБ направляется большее количество энергии, что может привести к перезаряду батареи. Во избежание этого может быть применена батарея большей мощности. Но если в процессе управления СУ использовать данные от датчика степени заряженности ТАБ, то можно корректировать функционирование системы с целью дополнительного использования режима электротяги. Энергоэффективность комбинированной СУ определяется временем движения в режиме электротяги, так как значение КПД электропривода существенно выше КПД ДВС.

Мощность ЭД также играет большую роль в энергетическом балансе ГА. Малая мощность не обеспечит высокую энергоэффективность СУ. Избыточная же приведёт к увеличению массы и стоимости СУ. Наличие достаточного большого диапазона изменения заряженности ТАБ будет положительно влиять на ЗРЭБ ТАБ. ЗРЭБ ТАБ зависит от значения силы тока зарядки–разрядки, степени заряженности ТАБ и её ёмкости. Выбор параметров СУ и моменты их актуализации в процессе функционирования ТАБ должен производиться с учётом данных обстоятельств [1, 3]. ТАБ большой ёмкости имеет значительные массогабаритные показатели, высокую стоимость и долгое время зарядки. Однако если она работает в постоянном зарядно-разрядном режиме в соответствии с энергетическим балансом СУ, то ей не требуется большая мощность и ёмкость, что позволяет минимизировать данные недостатки.

Целью предлагаемой методики являются определение расчётным методом ёмкости ТАБ, оптимизация её

функционирования в составе СУ и подбор параметров прочих агрегатов, входящих последней. В работе [3] было показано, что максимальная энергоэффективность в ГЦ достигается при равенстве значений разрядной и зарядной энергий в ТАБ.

Математическая модель функционирования силовых агрегатов СУ при движении ГА в ГЦ и расчёта ЗРЭБ СУ должна учитывать мощности агрегатов (ДВС, ЭД, ТАБ) и процессы их совместного функционирования. В основе математической модели СУ ГА лежит испытательный ГЦ Правил ООН № 83, структура которого довольно проста. Упомянутый ГЦ составлен из набора операций и этапов с нагрузочными и скоростными режимами движения автомобиля. Для повышения его топливной экономичности рабочие режимы ДВС выбираются с минимальным удельным расходом топлива по многопараметрической характеристике. Структура европейского ГЦ, имея ограниченное число режимов движения, позволяет по параметрам сопротивления движению автомобиля рассчитать параметры ЗРЭБ с наименьшим числом вариантов функционирования СУ, а также выявить пути достижения максимальной энергоэффективности.

Режимы движения и сопротивление движению ГА на различных этапах позволяет рассчитать значение энергии движения E по выбранным вариантам функционирования СУ. Для расчёта энергии необходимо знать время t на этапах движения автомобиля. Энергетические составляющие на отдельных этапах ГЦ определяются как произведение средней мощности \bar{N} движения автомобиля на время функционирования ДВС на отдельных этапах ГЦ: $E = \bar{N}t$. Для расчёта используем известное соотношение: 1 Вт·ч соответствует 3,6 кДж (или 1 Вт·с соответствует 1 Дж), которое позволяет рассчитать в одних единицах расходимую электрическую и тепловую энергию для ГА. Энергия движения автомобиля на электротяге и общая зарядно-разрядная энергия определяются суммированием энергий движения на отдельных этапах ГЦ.

Изменение мощности при разгоне имеет линейную зависимость по времени [5, 6]. Учитывая это, можно найти среднюю мощность на этапе разгона. При расчёте баланса мощности необходимо учитывать зарядную мощность ТАБ, направляемую от генератора с приводом от ДВС [5]. Она определяется как разность максимальной мощности ДВС $N_{\text{отт}}$ в рассматриваемом режиме его работы и мощности $N_{\text{тг.д.}}$, расходимой им на движение автомобиля в этом же режиме. Далее необходимо рассчитать общую энергию зарядки ТАБ с учётом рекуперации при торможении автомобиля на отдельных этапах ГЦ.

При разгоне автомобиля количество энергии определяется на отдельных элементарных временных промежутках Δt в ГЦ. В пределах выбранного промежутка скорость автомобиля и мощность считаются постоянными и равными средним значениям, что позволяет рассчитать совокупную энергию, как и в случае равномерного движения. При этом значения средней мощности, затрачиваемой

на преодоление сил инерции, рассчитываются по известным формулам [5, 6].

Большая часть времени в ГЦ Правил ООН № 83 приходится на этапы интенсивного разгона автомобиля с использованием ДВС. Эти режимы позволяют оптимально загрузить ДВС с обеспечением высокого значения КПД. Зарядная мощность E_3 от ДВС и далее от генератора рассчитывается по расчётной резервной мощности ΔN_e , представляющей собой разницу $N_{\text{огт}} - N_{\text{тяг.д.}}$. Эта мощность направляется в накопитель энергии.

Следует отметить, что на ГА Toyota Prius максимальная мощность ТАБ равна 27 кВт и её достаточно, чтобы воспринимать мощность при рекуперации энергии в процессе торможения.

В табл. 1 приведены характерные режимы движения ГА категории М1 в ГЦ Правил ООН № 83. Проанализируем режим разгона № 1, а затем режим равномерного движения № 4. Поток мощности от ДВС на режиме разгона, как уже было упомянуто, делится на две части. Одна часть идёт к генератору, другая — на привод колёс от ЭД. При разгоне на 1-й передаче частота вращения коленчатого вала увеличивается с 700 об/мин до 3100 об/мин. Мощность ДВС при этом изменяется с 15 кВт до 45 кВт, а мощность, направляемая к генератору с последующим поступлением на ТАБ, увеличивается с 2,9 кВт до 16,2 кВт.

Здесь n — частота вращения коленчатого вала, V_a — скорость автомобиля, M_k — крутящий момент на валу ДВС, N_e — мощность ДВС. В скобках указано значение максимальной мощности ДВС в рассматриваемом режиме.

Как уже отмечалось, режимы малых нагрузок для ДВС характеризуются низким значением КПД и повышенной токсичностью выбросов. Нейтрализатор ДВС имеет сравнительно низкую температуру и вследствие этого малую эффективность очистки вредных выбросов. Поэтому использовать ДВС на данных режимах нецелесообразно.

Алгоритм управления СУ ГА предусматривает его разгон от 0 км/ч до 30 км/ч за счёт электротяги, а разгон от 30 км/ч до 50 км/ч за счёт ДВС, работающего по характеристике минимальных удельных расходов. ЭД при этом выключен. Избыток мощности ДВС при разгоне направляется в накопитель энергии.

Мощностной режим ДВС определяется скоростным режимом движения автомобиля и может не соответствовать оптимальному на ΔN_e . Для минимизации потерь энергии алгоритм управления потоком мощности в СУ должен предусматривать полное поглощение ΔN_e включением генератора на зарядку ТАБ. При выключении ДВС потребление энергии ЭД осуществляется от ТАБ. Если мощности ДВС для движения недостаточно, например, при ускорении автомобиля в циклах городского или магистрального движения, то в этом случае дополнительно включается ЭД, потребляющий энергию от ТАБ.

Из табл. 1 следует, что при равномерном движении в ГЦ максимальная зарядная мощность на режиме № 4 может составлять 25 кВт.

Для обеспечения максимальной энергоэффективности и снижения выбросов вредных веществ на режимах малых и средних нагрузок в ГЦ используется электротяга. Применение электротяги на высоких нагрузках обычных ГА ограничивается мощностью ЭД и зарядной энергией накопителя. ЭД большой мощности имеют худшие массогабаритные показатели и меньшие значения КПД по сравнению с оптимально подобранными. ТАБ большой ёмкости обладают большими массогабаритными показателями, стоимостью и большим временем зарядки. Для СУ целесообразно подбирать ЭД с определённой мощностью.

На рис. 1 показана диаграмма КПД ЭД различной мощности. Его значение может составлять 93%...75% в зависимости от режима функционирования.

Следует отметить, что ЭД также имеет зону оптимальных значений КПД и обеспечение работы СУ в этой зоне

Таблица 1. Характерные режимы движения ГА категории М1 в ГЦ Правил № 83 ООН

Table 1. Typical driving modes of a M1 category hybrid car in the urban cycle according to the UN Regulation No. 83

№ п.п.	Режим движения	M_k , Н·м	N_e , кВт ΔN_e , кВт	N_e , кВт ΔN_e , кВт
1	Разгон на 1-й передаче от $n = 700$ об/мин до $n = 3100$ об/мин	40...50	2,9 (15) 12,1	16,2 (45) 28,8
2	Разгон на 2-й передаче от $n = 1600$ об/мин до $n = 2400$ об/мин	50...60	8,4 (21) 12,6	15,1 (35) 19,9
3	Разгон на 3-й передаче от $n = 1600$ об/мин до $n = 2300$ об/мин	65...80	10,9 (21) 10,1	19,3 (33) 13,7
4	Равномерное движение на 1-й передаче при $n = 2500$ об/мин	46		12,0 (37) 25
5	Равномерное движение на 2-й передаче при $n = 1900$ об/мин	58		11,5 (27) 15,5
6	Равномерное движение на 3-й передаче при $n = 2050$ об/мин	80		17,2 (28) 10,8

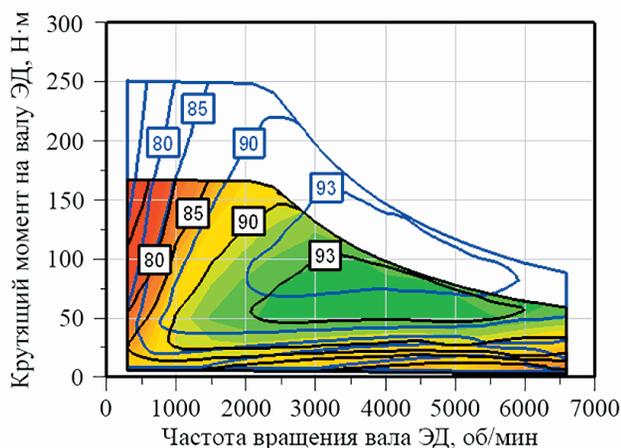


Рис. 1. Сравнение КПД ЭД различной мощности [7]. Чёрными линиями обозначены области, соответствующие ЭД мощностью 40 кВт, синими линиями — ЭД мощностью 60 кВт.

Fig. 1. Comparison of the efficiency of the electric motors with various power [7]. The black lines indicate the areas corresponding to an electric motor with a power of 40 kW, the blue lines indicate the areas corresponding to an electric motor with a power of 60 kW.

может дополнительно улучшить показатели энергоэффективности до 14% [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 2 приведены режимы движения ГА в ГЦ с разными вариантами алгоритмов управления СУ, а в табл. 3 — результаты расчёта энергетических составляющих для них. Следует учитывать, что режим холостого хода в этом расчёте не принимался во внимание.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариант № 4 в цикле характеризуется минимальным значением зарядно-разрядного баланса и наиболее высоким значением КПД СУ.

Последовательность работы компонентов СУ на режимах ГЦ выбиралась, исходя из следующих соображений.

1. На режимах малых нагрузок используется электротяга. Применение электротяги в СУ ограничивается мощностью ЭД и зарядной энергией ТАБ.

Таблица 2. Режимы движения ГА в ГЦ при различных алгоритмах управления СУ

Table 2. Motion modes of a hybrid vehicle in the urban cycle with various control algorithms for its power plant

Этапы ГЦ	Вариант № 1 (ЭД 15 кВт)	Вариант № 2 (ЭД 30 кВт)	Вариант № 3 (ЭД 30 кВт)	Вариант № 4 (ЭД 30 кВт)
Ускорение на 1-й передаче	ДВС	ЭД	ЭД	ЭД
Ускорение на 2-й передаче	ДВС	ЭД	ЭД	ЭД
Равномерное движение	ЭД	ЭД	ЭД	ЭД
Замедление	Рекуперация	Рекуперация	Рекуперация	Рекуперация
Ускорение на 1-й передаче	ДВС	ДВС	ЭД	ЭД
Ускорение на 2-й передаче	ДВС	ДВС	ЭД	ДВС
Ускорение на 3-й передаче	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
Равномерное движение	ДВС	ДВС	ДВС	ДВС
Замедление	Рекуперация	Рекуперация	Рекуперация	Рекуперация
Равномерное движение	ДВС	ЭД	ЭД	ЭД
Замедление	Рекуперация	Рекуперация	Рекуперация	Рекуперация

Таблица 3. Энергетические составляющие для СУ ГА для принятых в рассмотрение алгоритмов управления

Table 3. Energy components for the hybrid vehicle power plant for the considered control algorithms

Наименование составляющей, единица её исчисления	Вариант № 1 (ЭД 15 кВт)	Вариант № 2 (ЭД 30 кВт)	Вариант № 3 (ЭД 30 кВт)	Вариант № 4 (ЭД 30 кВт)
Энергия зарядки от ДВС, кДж	826	436	288	396
Энергия зарядки от ДВС и рекуперации, кДж	1045	655	507	615
Энергия ЭД, кДж	144	353	526	390
Энергия от рекуперации, кДж	219	219	219	219
Энергия движения от ДВС, кДж	721	513	340	475
Зарядно-разрядный баланс, кДж	+901	+302	-19	+6
Общая энергия цикла, кДж	1084	1084	1084	1084

2. На режимах больших нагрузок используется ДВС, избыточная мощность которого направляется через генератор в ТАБ. Избыточная зарядная мощность ДВС ΔN_e выбирается максимально возможной при данном режиме движения. Для поддержания оптимального зарядно-разрядного энергетического баланса СУ в цикле движения происходит непрерывное чередование зарядки и разрядки ТАБ.
3. Для оптимальной работы СУ и использования мощности ДВС, работающего в области минимальных эффективных расходов топлива, последний запускается на наиболее нагруженных режимах движения ГА. Управление запуском ДВС может осуществляться на основании данных, поступающих датчиков нагрузки и заряженности ТАБ.

При реализации алгоритма по варианту № 1 электротяга используется недостаточно, что снижает энергоэффективность СУ. ДВС при работе в ГЦ на выбранных скоростных режимах включается на полную мощность, поэтому при данном варианте в ТАБ направляется большее количество энергии, что может привести к её перезарядке. Следовательно, в данном случае потребуются ТАБ большой мощности. Если же использовать сигнал датчика, фиксирующего перезарядку, то можно корректировать работу СУ для дополнительного использования режима электротяги.

При реализации алгоритма по варианту № 3 недостаточно используется ДВС, что также снижает энергоэффективность СУ. В данном варианте ТАБ может иметь повышенную разрядку. Однако при наличии датчика, фиксирующего таковую, можно корректировать работу СУ, используя ДВС в большей степени.

Алгоритмы вариантов № 4 и № 3 обеспечивают включение ЭД при ускорении ГА на 3-й передаче, так как такового достаточно для движения в ГЦ.

На рис. 2 приведены результаты расчёта энергетического баланса при движении автомобиля категории M_1 в ГЦ с вариантом алгоритма управления СУ, имеющим нулевой зарядно-разрядный баланс на ТАБ.

Как можно видеть, зарядно-разрядный баланс является нулевым, поскольку вся энергия, поступающая на аккумуляторную батарею от ДВС и от рекуперации, расходуется на движение автомобиля в режиме электротяги.

Ранее была получена зависимость между КПД СУ и зарядным балансом [3]. Данная зависимость (рис. 3) показывает прямо пропорциональную связь между этими величинами. При нулевом зарядно-разрядном балансе на ТАБ КПД СУ имеет максимальное значение.

Для определения энергетических параметров ТАБ [8, 9] рассмотрим некоторые варианты эксплуатации ГА, приведённые в предшествующих таблицах.

Наиболее целесообразный алгоритм управления СУ соответствует варианту № 4. Расчётная общая зарядная

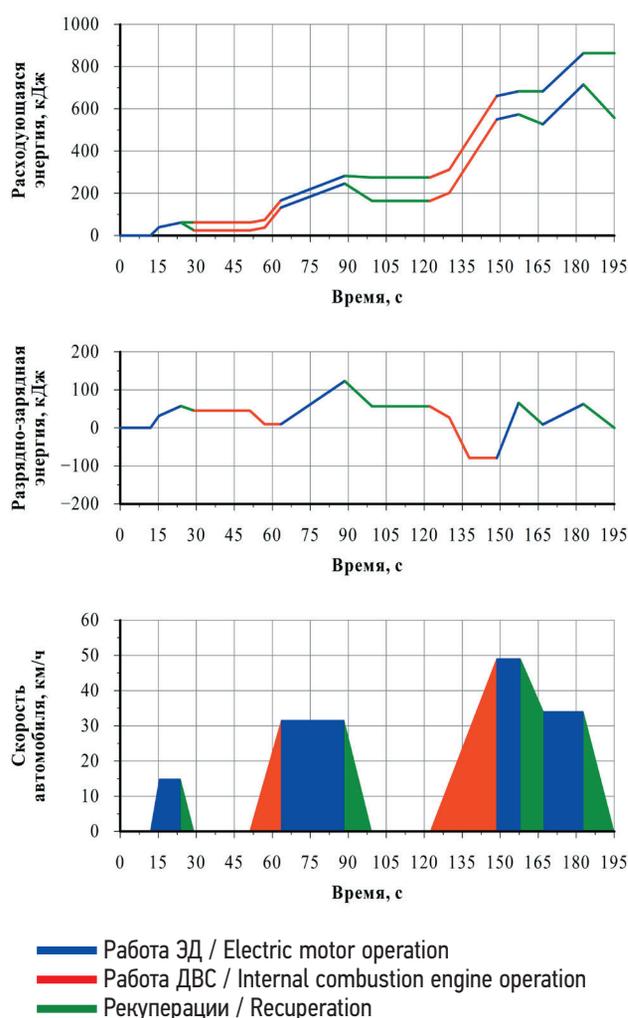


Рис. 2. Цикл движения автомобиля категории M_1 и энергетические показатели его СУ (для алгоритма, обеспечивающего нулевой зарядно-разрядный баланс на ТАБ).

Fig. 2. The energy of the power plant of a M_1 category vehicle, which is controlled by the algorithm that ensures a zero charge-discharge balance for the traction battery.

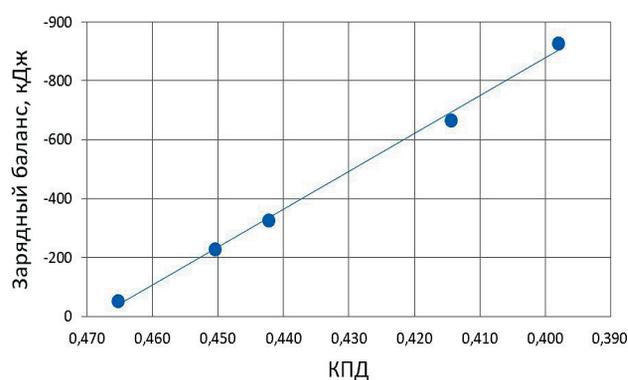


Рис. 3. Зависимость между КПД СУ и зарядным балансом.

Fig. 3. Dependence between power plant efficiency and charge balance.

энергия ТАБ в ГЦ* при выбранном алгоритме составляет 396 кДж за цикл без рекуперации. С учётом же рекуперации получаем 615 кДж за цикл. При этом происходит непрерывное чередование зарядки и разрядки ТАБ. Наибольшая зарядная энергия поступает от генератора в режиме равномерного движения с приводом от ДВС при следующих значениях базовых показателей: 1) пиковая мощность движения — 10 кВт; 2) средняя мощность движения и время движения на этапе — 10 кВт и 12 с; 3) энергия движения в цикле — 120 кДж; 4) зарядная энергия от ДВС — 288 кДж. При этом средняя мощность заряда — 24 кВт.

При движении автомобиля в ГЦ расход энергии составляет 1084 кДж (см. табл. 3, показатель «Общая энергия цикла»). Общая энергия зарядки в ГЦ при рассматриваемом варианте алгоритма: $E_3 + E_p = 0,000278(396 + 219) = 0,171$ кВт·ч. Здесь E_3 — энергия зарядки от ДВС (табл. 3), E_p — энергия от рекуперации (табл. 3), а 0,000278 — коэффициент перевода килоджоулей в киловатт-часы.

На этапе равномерного движения ГА зарядная мощность 25 кВт, поэтому с учётом КПД передачи энергии ($\eta_{п.э.} = 0,827$) необходимая мощность ТАБ $N_{ТАБ} = 0,827 \cdot 25 = 20,7$ кВт.

Если принять во внимание неиспользованные по техническим причинам 40% ёмкости ТАБ, можно определить её ёмкость для движения в ГЦ в зарядно-разрядном гибридном режиме: $E_{ТАБ} = 0,171/0,4 = 0,427$ кВт·ч. Если же применять исключительно электротягу на всём ГЦ протяжённостью 4 км, то автомобилю потребуется ТАБ с ёмкостью $E_{ТАБ} = 1084 \cdot 0,000278 \cdot 4 = 1,205$ кВт·ч, где 1084 кДж — общая энергия движения, а 0,000278 — уже упомянутый коэффициент перевода килоджоулей в киловатт-часы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Довольно показательным в обсуждаемом контексте является сопоставление полученных результатов с ёмкостями ТАБ автомобилей-аналогов.

На автомобиле Honda Insight с ТАБ ёмкостью 0,58 кВт·ч и ЭД мощностью 10 кВт получено снижение расхода топлива на 51%, то есть примерно в 2 раза.

Запас хода автомобилей Toyota Prius Plug-in в режиме электротяги на одной зарядке с ТАБ ёмкостью 4,4 кВт·ч составляет 24 км. Соответственно, для работы его СУ в ГЦ протяжённостью 4 км при использовании электротяги требуется ёмкость ТАБ в 0,73 кВт·ч.

Уместно также привести данные, касающиеся параметров литий-ионных ТАБ (создаваемое напряжение, энергоёмкость) и топливной экономичности некоторых ГА:

- 1) Hyundai Elantra — 180 В; 5,3 А·ч (0,954 кВт·ч); 4,2 л на 100 км в смешанном цикле;
- 2) Honda Insight — 100,8 В; 5,75 А·ч (0,58 кВт·ч); 4,2 / 4,6 / 4,4 л на 100 км (EU);

- 3) Lexus RX — 288 В; 6,5 А·ч (1,87 кВт·ч); 6,6 / 6,0 / 6,3 л на 100 км (EU);
- 4) Toyota Camry — 244,8 В; 6,5 А·ч (1,59 кВт·ч); 6,9 / 7,1 / 6,9 (EU); 7,6 / 6,7 / 7,1 л на 100 км (EPA).

Здесь EU — расход топлива в городском, магистральном и смешанном европейских циклах, а EPA — расход топлива в городском, магистральном и смешанном американских федеральных циклах.

Следует заметить, что на ГА Honda Insight с ТАБ ёмкостью 0,58 кВт·ч (что в 3 раза меньше ёмкости ТАБ ГА Toyota Camry) получена высокая эффективность работы СУ в испытательных циклах.

По данным каталогов *Automobil revue* Женевского автомобильного салона можно проследить, как на автомобилях Toyota Prius и других ГА производились изменения в отношении параметров ТАБ. На первых автомобилях Toyota Prius применялись никель-металлогидридные ТАБ ёмкостью всего 0,4 кВт·ч, что согласуется с нашими расчётными данными. На автомобилях Honda Insight с батареей ёмкостью 0,58 кВт·ч и ЭД мощностью 10 кВт в смешанном испытательном цикле получено снижение расхода топлива на 51%, то есть почти в 2 раза, как и на Toyota Prius с ЭД мощностью 60 кВт. Эти данные показывают, что, имея сравнительно небольшой ЭД и правильный алгоритм управления СУ, можно получить очень большие значения КПД и расход топлива около 4,2 л на 100 км в ГЦ. На автомобилях Toyota Prius второго поколения устанавливалась никель-металлогидридные ТАБ уже с большей ёмкостью (1,3 кВт·ч).

На следующем этапе автомобили Toyota Prius Plug-in для повышения энергоэффективности стали оборудоваться никель-металлогидридными ТАБ, подзаряжаемыми от электрической сети и имеющими ёмкость 4,4 кВт·ч при мощности 27 кВт и относительно небольшой массе (80 кг).

Литий-ионные ТАБ имеют плотность энергии примерно в два раза выше, чем никель-металлогидридные. Это позволяет снизить габариты и массу ТАБ. Запас хода автомобилей Toyota Prius Plug-in в режиме электротяги на одной зарядке с ТАБ ёмкостью 4,4 кВт·ч составляет около 24 км. Соответственно, для работы СУ Toyota Prius Plug-in в режиме электротяги по ГЦ протяжённостью 4 км требуется ёмкость ТАБ 0,73 кВт·ч. Средний расход топлива в цикле движения автомобилей Toyota Prius Plug-in не превышает 2,1 л на 100 км. Заряд ТАБ ёмкостью 4,4 кВт·ч осуществляется всего за 1,5 ч от бытовой электросети переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. С 2013 года на автомобилях Toyota Prius Plug-in устанавливаются ТАБ с ещё большей ёмкостью (6,5 кВт·ч).

В заключении укажем на то, что ёмкость и другие характеристики ТАБ определяют зарядный баланс, КПД СУ и в конечном счёте — энергоэффективность СУ ГА. Для оптимизации её работы необходим правильный выбор параметров, влияющих на алгоритм управления и зарядный баланс тяговой батареи.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.В. Шабанов — формирование основной идеи исследования, сбор и анализ литературных источников, разработка и исследование математической модели, обработка и анализ результатов моделирования, написание части текста статьи; А.Е. Есаков — анализ результатов моделирования и их репрезентация, написание части текста статьи и её редактирование; В.В. Бернацкий — написание части текста статьи и её редактирование; П.А. Красавин — написание части текста статьи и её редактирование. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.V. Shabanov — formation of the main idea of the research, collection and analysis of literary sources, development and study of the mathematical model, processing and analysis of simulation results, writing and editing the part of the text; A.E. Esakov — analysis of simulation results and their representation, writing and editing the part of the text; V.V. Bernatsky — writing and editing the part of the text; P.A. Krasavin — writing and editing the part of the text. All authors confirm that their authorship complies with international criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загарин Д.А., Сальников В.И., Шабанов А.В., и др. Гибридные автомобили. Пути повышения их энергетической эффективности // Автомобильная промышленность. 2016. № 1. С. 4–7.
2. Шабанов А.В., Ванин В.К., Есаков А.Е. Энергосберегающие технологии и энергоэффективность автотранспортных энергоустановок // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 4 (50). С. 83–91. doi: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-83-91
3. Шабанов А.А., Шабанов А.В., Соколов С.А. К расчёту зарядного баланса тяговой батареи комбинированной силовой установки автомобиля и выбору её мощности // Труды НАМИ. 2018. № 4 (273). С. 38–47.
4. Загарин Д.А., Сальников В.И., Шабанов А.В. Аккумуляторные батареи автомобилей с электроприводом // Автомобильная промышленность. 2016. № 5. С. 24–27.
5. Карпухин К.Е. Принципы и алгоритм управления автомобилем с гибридной силовой установкой. дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2008.
6. Шабанов А.В., Бернацкий В.В., Соколов С.А. Моделирование алгоритма работы комбинированной силовой установки спортивного автомобиля // Автомобильная промышленность. 2020. № 6. С. 10–16.
7. Загарин Д.А., Шабанов А.В., Ломакин В.В. и др. Характеристики комбинированных энергоустановок гибридных автомобилей. В кн.: Материалы Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем»; Сентябрь 24–26, 2013. Волгоград, 2013. С. 50–52.
8. Биксалеев П.Ш., Карпухин К.Е., Климов А.В. и др. Имитационная модель системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи с пассивным охлаждением // Труды НАМИ. 2020. №4 (283). С. 42–51. doi: 10.51187/0135-3152-2020-4-42-51
9. Маликов Р.Р., Климов А.В., Биксалеев П.Ш. и др. Имитационное моделирование тяговой аккумуляторной батареи в составе транспортного средства // Автомобильная промышленность. 2022. № 5. С. 8–13.

REFERENCES

1. Zagarin DA, Sal'nikov VI, Shabanov AV, et al. Hybrid cars. Ways to increase their efficiency. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2016;1:4–7. (In Russ.)
2. Shabanov AV, Vanin VK, Esakov AE. Energy saving technologies and energy efficiency of motor transport power plants. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2021;4(50):83–91. (In Russ.) doi: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-83-91
3. Shabanov AA, Shabanov AV, Sokolov SA. To the issue of calculation of the traction battery charging balance of the vehicle combined power unit and the choice of its power. *Trudy NAMI*. 2018; 4 (273): 38–47. (In Russ.)
4. Zagarin DA, Sal'nikov VI, Shabanov AV. Electric car batteries. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2016; 5:24–27. (In Russ.)
5. Karpuhin KE. Principles and algorithm of driving a car with a hybrid power plant [dissertation]. Moscow; 2008. (In Russ.)
6. Shabanov AV, Bernatskiy VV, Sokolov SA. Modeling the work algorithm of a hybrid sports car. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2020;6:10–16. (In Russ.)
7. Zagarin DA, Shabanov AV, Lomakin VV et al. Harakteristiki kombinirovannyh energoustanovok gibridnyh avtomobilej.

In: *Proceedings of the Russian science conference «Progress transportnyh sredstv i sistem»; 2013 Sep 24–26. Volgograd; 2013:50–52. (In Russ.)*

8. Biksaleev RSH, Karpukhin KE, Klimov AV et al. Thermostating system simulation model of the passively cooled

traction battery. *Trudy NAMI. 2020;4(283):42–51. (In Russ.)* doi: 10.51187/0135-3152-2020-4-42-51

9. Malikov RR, Klimov AV, Biksaleev RSH et al. Simulation modeling of a traction battery as part of a vehicle. *Avtomobil'naya promyshlennost'. 2022;5:8–13. (In Russ.)*

ОБ АВТОРАХ

*** Есаков Алексей Евгеньевич,**

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Наземные транспортные средства»;
адрес: Российская Федерация, 107023, Москва,
ул. Большая Семёновская, д. 38;
ORCID: 0000-0003-4393-958X;
eLibrary SPIN: 8766-5750;
e-mail: ravn@mail.ru

Шабанов Александр Викторович,

канд. техн. наук,
эксперт «Экспертного отдела»;
ORCID: 0000-0002-2742-5311;
eLibrary SPIN: 2711-5000;
e-mail: saaha-1955@mail.ru

Бернацкий Владислав Витольдович,

канд. техн. наук, доцент,
профессор кафедры «Наземные транспортные средства»;
ORCID: 0000-0002-3754-8729;
eLibrary SPIN: 1826-6290;
e-mail: vladislav_bern@mail.ru

Красавин Павел Александрович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Автомобили»;
ORCID: 0009-0006-5727-6843;
eLibrary SPIN: 4763-5542;
e-mail: krasavin.mami@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Alexey E. Esakov,**

Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Ground Vehicles Department;
address: 38 Bolshaya Semyonovskaya street, 107023 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0003-4393-958X;
eLibrary SPIN: 8766-5750;
e-mail: ravn@mail.ru

Alexander V. Shabanov,

Cand. Sci. (Engineering),
Expert of the Expert Department;
ORCID: 0000-0002-2742-5311;
eLibrary SPIN: 2711-5000;
e-mail: saaha-1955@mail.ru

Vladislav V. Bernatsky,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Professor of the Ground Vehicles Department;
ORCID: 0000-0002-3754-8729;
eLibrary SPIN: 1826-6290;
e-mail: vladislav_bern@mail.ru

Pavel A. Krasavin,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor of the Automobiles Department;
ORCID: 0009-0006-5727-6843;
eLibrary SPIN: 4763-5542;
e-mail: krasavin.mami@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author