

УДК 629.1

EDN: BNXVMC

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ

С.А. Горожанкин

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ru

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Макеевка, ДНР, Россия**Н.В. Савенков**

ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Макеевка, ДНР, Россия**О.О. Золотарев**

ORCID: 0000-0002-8631-390X e-mail: o.o.zolotarev@donnasa.ru

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Макеевка, ДНР, Россия

Рассмотрены вопросы регулирования гибридной силовой установки (ГСУ) при установившемся движении автомобиля с заданной длительностью. На основании выполненного исследования энергетической эффективности рабочего процесса ГСУ установлено, что поиск алгоритмов рационального ее регулирования необходимо осуществлять путем решения соответствующей задачи оптимизации. Для решения задачи предложены частные оценочные критерии энергетической эффективности рабочего процесса ГСУ, подход к выбору параметров оптимизации и вводимые ограничения; введены понятия выходной и оптимизированной выходной характеристик ГСУ, а также нормированного удельного расхода топлива ДВС, приходящегося на зарядку тяговой высоковольтной аккумуляторной батареи. Для параметров агрегатов и механизмов ГСУ последовательно-параллельного на примере автомобиля типа *Toyota Prius* с помощью разработанной авторами компьютерной программы получены рациональные функции регулирования агрегатами при движении автомобиля на различных нагрузочно-скоростных режимах, обеспечивающие наилучшие значения выбранных частных критериев эффективности. Результаты исследования могут быть использованы при разработке перспективного метода оптимизированного выбора стратегии регулирования агрегатов ГСУ при движении автомобиля в комплексе неустановившихся режимов движения.

Ключевые слова: автомобильная гибридная силовая установка, текущий массовый расход топлива, критерий, параметры, режим движения, оптимизация, регулирование силовой установки, выходная характеристика, циркуляция энергии, энергетический баланс.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горожанкин, С.А. Исследование энергетической эффективности рабочего процесса гибридной силовой установки автомобиля при установившемся движении / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, О.О. Золотарев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 90-101. EDN: BNXVMC

STUDY OF ENERGY EFFICIENCY OF HYBRID VEHICLE POWERTRAIN OPERATING PROCESS DURING STEADY MOTION

S.A. Gorozhankin

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ru

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
Makeevka, DPR, Russia

N.V. Savenkov

ORCID: **0000-0003-3803-9528** e-mail: **n.v.savenkov@donnasa.ru**

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Makeevka, DPR, Russia

O.O. Zolotarev

ORCID: **0000-0002-8631-390X** e-mail: **o.o.zolotarev@donnasa.ru**

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Makeevka, DPR, Russia

The paper considered issues of a vehicle hybrid powertrain regulation during steady motion with a given duration. A study of the energy efficiency of the operating process of a hybrid powertrain was carried out. It has been established that the search for its rational regulation algorithms must be carried out by solving the corresponding optimization problem. Partial evaluation criteria for the energy efficiency of the operating process of a hybrid powertrain, an approach to the selection of optimization parameters and introduced restrictions are proposed. The concepts of output and optimized output characteristics of a hybrid powertrain, as well as normalized specific fuel consumption of an internal combustion engine attributable to charging a traction high-voltage battery, are introduced. A computer program has been developed and rational functions for regulating units during vehicle moving at various load-speed modes have been obtained, which provide the best values of selected partial efficiency criteria, on the example of units and mechanisms of a series-parallel hybrid powertrain of Toyota Prius. The results of the study are aimed at developing a promising method for the optimized choice of control strategy for the units of a hybrid powertrain during the vehicle moving in a complex of unsteady driving modes, for example in driving cycles or in actual operating conditions.

Key words: vehicle hybrid powertrain, current mass fuel consumption, criterion, parameters, driving mode, optimization, powertrain regulation, output characteristic, energy circulation, energy balance.

FOR CITATION: S.A. Gorozhankin, N.V. Savenkov, O.O. Zolotarev Study of the energy efficiency of the working process of a hybrid vehicle power plant during steady motion. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 90-101. EDN: BNXVMC

Постановка проблемы

При эксплуатации автомобиля значительная доля времени может приходиться на установившиеся режимы, под которыми подразумевается процесс движения автомобиля с постоянной кинематической и силовой составляющей энергосилового потока на движителе (т.е. при постоянной скорости V и крутящем моменте или мощности N_K) [1-3]. Например, для городской составляющей UDC Нового европейского ездового цикла $NEDC$ на эти режимы приходится 60 % общего времени цикла (табл. 1), из которых 29 % составляет движение с постоянными скоростями, а 31 % – с нулевой скоростью (режим «стоп»), что также может быть отнесено к установившемуся режиму.

Таблица 1.
Доля установившихся режимов в различных ездовых циклах

Table 1.
Proportion of steady modes in various driving cycles

Ездовой цикл	UDC	SORT2	WLTC
Доля установившихся режимов, %	60	56,5	12**
Доля режима «стоп», %	31 (51*)	60	
* от времени цикла, приходящегося на установившиеся режимы; ** приходится от общего времени цикла для автомобиля III класса энерговооруженности на режим $V = 0$			

Для автомобилей, оснащенных классической силовой установкой, содержащей один двигатель (например, ДВС) и агрегаты трансмиссии с постоянными или переменными передаточными числами, на всем протяжении конкретного участка установившегося движения отсутствует явная необходимость изменения нагрузочно-скоростного режима работы агрегатов. Как показывают результаты исследований [4], это обусловлено тем, что для такого режима движения автомобиля существует только одно сочетание значений параметров агрегатов его силовой установки (коэффициента использования мощности и частоты вращения ДВС, общего передаточного числа трансмиссии), при котором обеспечивается максимальное значение общего КПД и, как следствие, минимальное значение потребления энергии (топлива).

Для АТС, содержащих несколько двигателей различных типов, в частности для автомобилей, оснащенных гибридными силовыми установками [5], вышеприведенное положение, не является достаточным для обеспечения минимизации путевого расхода топлива. Это связано с возможностью циркуляции энергии между агрегатами.

Теоретический анализ

В качестве частных оценочных критериев энергетической эффективности рабочего процесса ГСУ предлагается рассматривать сочетание расходов топлива/энергии для работы двигателей, обеспечивающих движение автомобиля на конкретном нагрузочно-скоростном режиме. Например, для ГСУ, содержащих ДВС и электрические машины, таковыми критериями являются соответственно массовый расход топлива G и электрическая мощность P , отдаваемая или запасаемая высоковольтной батареей аккумуляторов (ВВБ):

$$G = f(n_e, k_e), \quad (1)$$

где n_e – частота вращения коленчатого вала ДВС; k_e – коэффициент использования мощности ДВС.

Для ВВБ:

$$P = f(n_1, k_1, n_2, k_2, \dots, n_i, k_i), \quad (2)$$

где n_1, n_2, \dots, n_i – частоты вращения роторов электромашин; k_1, k_2, \dots, k_i – коэффициенты использования мощности электромашин.

Положительные значения мощности P соответствуют зарядке ВВБ, а отрицательные – разрядке. Ее знаки при работе электромашин определяются значениями режимных параметров (2).

Перечисленные в качестве примера эти параметры ($n_e, k_e, n_1, k_1, n_2, k_2, \dots, n_i, k_i$), не могут быть связаны между собой случайным образом. Возможные варианты их сочетаний обусловлены:

- нагрузочно-скоростным режимом движения автомобиля (который определяется сочетанием скорости движения V и мощности на ведущих колесах N_K);
- схемой и характеристиками трансмиссии ГСУ, которые определяют силовые и кинематические соотношения между агрегатами, а также число степеней свободы в сочетании параметров регулирования этими агрегатами для заданного нагрузочно-скоростного режима движения АТС.

Автомобиль *Toyota Prius*, который выбран в качестве примера для выполнения настоящего исследования, оснащен ГСУ последовательно-параллельного типа, содержащей один ДВС, дифференциальный распределитель и две электрические машины. При этом общее количество параметров, определяющих режимы работы всех этих двигателей, составляет шесть ($n_e, k_e, n_1, k_1, n_2, k_2$). Однако, ГСУ рассматриваемой конфигурации имеет только два независимых режимных параметра. Для заданного нагрузочно-скоростного режима движения остальные четыре параметра будут являться функциями этих двух. Например, если в качестве независимых выбрать частоту вращения ДВС n_e и коэффициент нагрузки электродвигателя k_1 , то остальные определяются как $k_e, n_1, n_2, k_2 = f(n_e, k_1, N_K, V)$. Соответственно зависимости для частных оценочных критериев представляются в аналогичном виде – как функции выбранных

независимых режимных параметров агрегатов ГСУ и параметров режима движения автомобиля:

$$\left. \begin{aligned} G &= f(n_e, k_1, N_K, V) \\ P &= f(n_e, k_1, N_K, V) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Эти зависимости в графическом виде для некоторых режимов движения автомобиля показаны на рис. 1. Параметр s – относительная (по отношению к номинальной) частота вращения коленчатого вала ДВС. Данные получены в результате численного моделирования в программной среде компьютерной алгебры Mathcad процесса движения автомобиля на основе разработанных авторами математических моделей характеристик агрегатов ГСУ [6]: внешней и частичных скоростных характеристик ДВС, силовых и кинематических соотношений в трансмиссии и ее элементах, а также механических характеристик и характеристик КПД электрических машин в режимах двигателя либо генератора с учетом потерь в их преобразователях (инверторах).

Для зависимостей (3) предлагается ввести понятие «Выходная характеристика ГСУ», которая определяет значения частных критериев эффективности ГСУ в зависимости от возможных сочетаний независимых режимных параметров ее агрегатов и режима движения автомобиля. Данная характеристика приведена на графиках (рис. 1 а-г) для четырех режимов движения: показаны области допустимых сочетаний значений независимых параметров регулирования агрегатов ГСУ (k_1 и s). Остальные их сочетания, расположенные за пределами изображенных контуров, не могут быть реализованы.

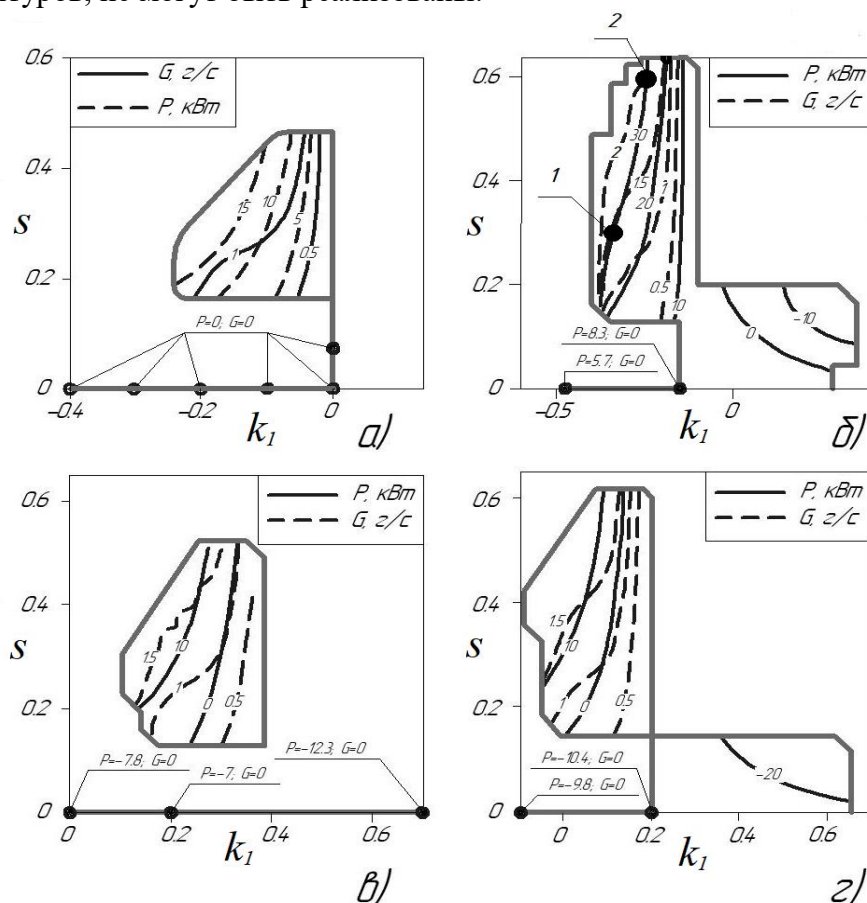


Рис. 1. Выходная характеристика ГСУ автомобиля Toyota Prius для режимов движения:
 а) автомобиль неподвижен ($N_K = 0$ кВт, $V = 0$ м/с); б) рекуперация при $N_K = -9$ кВт, $V = 12,33$ м/с;
 в) тяговый режим движения при $N_K = 6$ кВт, $V = 3,08$ м/с;
 г) тяговый режим при $N_K = 9$ кВт, $V = 9,25$ м/с

Fig. 1. Output characteristics of the Toyota Prius hybrid powertrain for driving modes:
 а) without moving ($N_K = 0$ kW, $V = 0$ m/s); б) recuperation at $N_K = -9$ kW, $V = 12,33$ m/s;
 в) traction mode at $N_K = 6$ kW, $V = 3,08$ m/s; г) traction mode at $N_K = 9$ kW, $V = 9,25$ m/s

Дополнительные режимные точки с указанием на выносках значений G и P будут иметь место в случае применения тормозов на валах ДВС и связанной с ним через дифференциальный распределитель электрической машины.

На основании полученных графиков можно также сделать вывод, что не все возможные сочетания независимых параметров регулирования ГСУ являются рациональными с позиции энергетической эффективности. Например, в режимных точках 1 и 2 на рис. 1б передается одинаковая электрическая мощность для заряда ВВБ – 30 кВт. Но при этом мгновенный расход топлива ДВС в точке 1 составляет 1,5 г/с, а в точке 2 – 2 г/с. Так как для этих точек режим движения автомобиля остается неизменным, то в рассмотренном примере ГСУ обладает большей энергетической эффективностью именно в точке № 1.

Предлагаемый порядок оптимизации работы ГСУ

С целью обеспечения на заданном режиме движения автомобиля работы ГСУ с максимальной энергетической эффективностью (в пределах рассмотренной степени свободы) в исследовании определена первая задача оптимизации. В качестве критерия для нее выбран минимальный текущий массовый расход топлива ДВС для заданного значения электрической мощности (разрядки или зарядки) ВВБ. Выбранный частный критерий позволяет обеспечить наибольшую энергетическую эффективность для всех вариантов движения: только от электродвигателей (электромобиль), рекуперативное торможение, а также при одновременной работе агрегатов различных типов. В качестве оптимизационных параметров определены независимые режимные параметры ГСУ (в частности, s и k_1). Ограничениями являются области допустимых сочетаний значений оптимизационных параметров по выходной характеристике ГСУ. Результаты выполнения оптимизации для рассматриваемых (в качестве примера) в настоящей статье режимов движения автомобиля показаны на рис. 2.

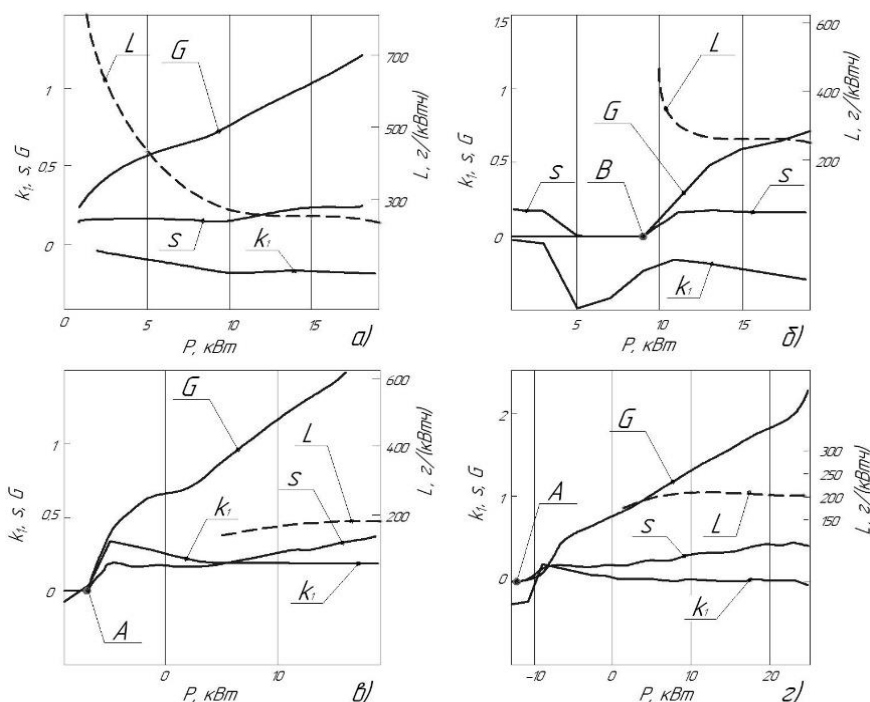


Рис. 2. Оптимизированная выходная характеристика ГСУ автомобиля Toyota Prius:

- а) автомобиль неподвижен ($N_k = 0$ кВт, $V = 0$ м/с); б) рекуперация при $N_k = -9$ кВт, $V = 12,33$ м/с;
 в) тяговый режим движения при $N_k = 6$ кВт, $V = 3,08$ м/с;
 г) тяговый режим движения при $N_k = 9$ кВт, $V = 9,25$ м/с

Fig. 2. Optimized output characteristics of the Toyota Prius hybrid powertrain for driving modes:

- а) without moving ($N_k = 0$ kW, $V = 0$ m/s); б) recuperation at $N_k = -9$ kW, $V = 12,33$ m/s;
 в) traction mode at $N_k = 6$ kW, $V = 3,08$ m/s; г) traction mode at $N_k = 9$ kW, $V = 9,25$ m/s

На графиках, в соответствии с постановкой выполненной задачи оптимизации, показано минимально возможное значение текущего массового расхода топлива ДВС G и соответствующие ему оптимизированные значения независимых режимных параметров ГСУ (s и k_1), которые являются функциями от электрической мощности P , отдаваемой ВВБ. Отрицательные ее значения – разряд, положительные – зарядка. Для полученных рациональных зависимостей предлагается ввести понятие «Оптимизированная выходная характеристика ГСУ». Точки «А» на характеристике (рис. 2в и 2г) соответствуют наиболее эффективному режиму электромобиля – при $G = 0$ и минимально возможной (по модулю) для заданного режима движения автомобиля электрической мощности P . Организация работы ГСУ на режимах, расположенных слева от точки «А» нецелесообразна, поскольку при неизменном режиме движения автомобиля увеличивается электрическая мощность, отдаваемая аккумулятором. При работе ГСУ в диапазоне от точки «А» до $P = 0$, движение автомобиля осуществляется одновременно от ДВС и электромашин с разной долей развиваемых механических мощностей.

Точка «В» (рис. 1б) на характеристике определяет наиболее эффективный режим рекуперации при $G = 0$ и максимально возможном значении электрической мощности P заряда ВВБ. Поэтому в диапазоне от $P = 0$ до точки «В» рекуперацию осуществлять нецелесообразно. При $P > 0$ и $G > 0$, определенная, причем иногда значительная доля механической мощности, которую развивает ДВС, используется для зарядки ВВБ. С целью оценки энергетической эффективности такого преобразования энергии, на графиках рис. 2 приведена функция $L = f(P)$, где L – нормированный удельный расход топлива – расход топлива ДВС, приходящийся на 1 кВт·ч энергии, аккумулированной в ВВБ:

- для неподвижного автомобиля при зарядке ВВБ – точка ($N_k = 0, V = 0$)

$$L = \frac{G}{P}; \tag{4}$$

- для режима рекуперации ($N_k < 0, V > 0$):

$$L = \frac{G}{P - P_B}, \tag{5}$$

где P_B – электрическая мощность зарядки ВВБ в точке «В» (при $G = 0$);

- для тягового режима движения автомобиля ($N_k > 0, V > 0$):

$$L = \frac{G - G_0}{P}, \tag{6}$$

где G_0 – текущий массовый расход топлива ДВС при $P = 0$.

Таким образом, в рамках оптимизированной выходной характеристики ГСУ (рис. 2), рассмотренный показатель в зависимости от режима движения автомобиля и установленной мощности заряда ВВБ может изменяться в достаточно широких пределах. Если известна продолжительность t_{\max} конкретного установившегося режима движения автомобиля (при $N_k = \text{const}, V = \text{const}$), для которого определена оптимизированная выходная характеристика ГСУ, возникает задача рационального регулирования ее агрегатов на протяжении этого режима. Данная задача может решаться в двух направлениях.

Первое направление предусматривает организацию работы агрегатов ГСУ на установившихся режимах на протяжении всего принятого участка движения автомобиля:

$$A^0 = G^0 \times t_{\max}, \tag{7}$$

$$Q^0 = P^0 \times t_{\max}. \tag{8}$$

где t_{\max} – продолжительность конкретного режима движения автомобиля; A^0 – суммарный расход топлива на этом режиме за время t_{\max} ; Q^0 – электрическая энергия, отданная (полученная) ВВБ за время t_{\max} ;

Примеры реализации таких режимов показаны на каждом из рис. 3-6 в правой части. На рис. 3 задан установившийся режим движения автомобиля длительностью $t_{\max} = 3$ с при $N_k = -9$ кВт (рекуперация) и $V = 12,33$ м/с. Для него в соответствии с оптимизированной выходной характеристикой ГСУ, могут быть реализованы различные значения мощности заряда ВВБ – например, $P^0_1 = 13$ кВт, $P^0_2 = 33,3$ кВт и $P^0_3 = 48,3$ кВт.

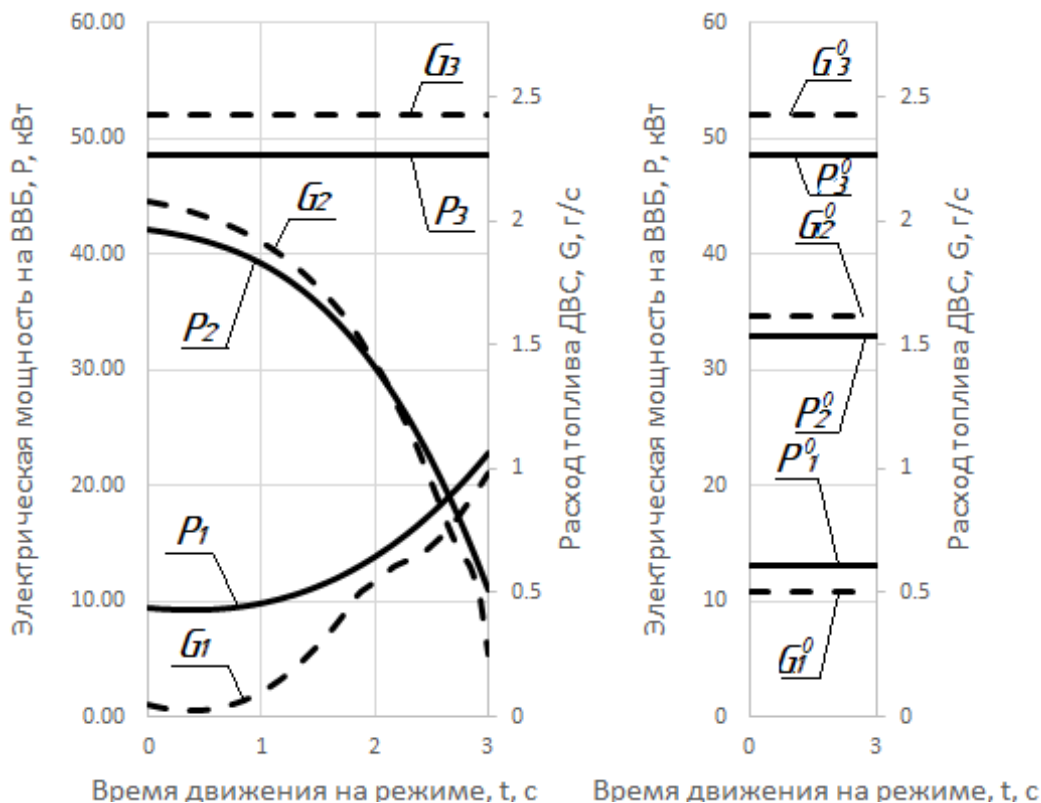


Рис. 3. Регулирование ГСУ на установившемся режиме движения автомобиля:

$$N_k = -9 \text{ кВт}, V = 12,33 \text{ м/с}, t_{\max} = 3 \text{ с}$$

Fig. 3. Regulation of a vehicle hybrid powertrain during steady motion:

$$N_k = -9 \text{ kW}, V = 12,33 \text{ m/s}, t_{\max} = 3 \text{ s}$$

Поскольку зарядка со всеми этими значениями осуществляется с использованием дополнительной мощности, получаемой от ДВС, то для него текущие массовые расходы топлива (также в соответствии с оптимизированной выходной характеристикой ГСУ) соответственно будут равны: $G^0_1 = 0,5 \text{ г/с}$, $G^0_2 = 1,62 \text{ г/с}$ и $G^0_3 = 2,43 \text{ г/с}$; таким образом, в соответствии с (7), за время t_{\max} суммарные расходы топлива составят $A^0_1 = 1,5 \text{ г}$, $A^0_2 = 4,85 \text{ г}$ и $A^0_3 = 7,29 \text{ г}$, а переданная в ВВБ электрическая энергия, определенная по зависимости (8): $Q^0_1 = 39 \text{ кДж}$, $Q^0_2 = 100 \text{ кДж}$ и $Q^0_3 = 145 \text{ кДж}$. Величины P^0 и G^0 , приведенные справа на рис. 4-6, определены аналогичным путем для других, рассмотренных в настоящей работе, режимов движения автомобиля. Значения соответствующих показателей A^0 , Q^0 , t_{\max} сведены в табл. 2.

Для второго направления рассматривается организация работы агрегатов ГСУ на неустановившихся режимах на протяжении времени t_{\max} , в течение которого автомобиль движется на установившемся режиме при $N_k = \text{const}$ и $V = \text{const}$. В рассматриваемом случае:

$$Q = \int_0^{t_{\max}} P(t) dt, \quad (9)$$

$$A = \int_0^{t_{\max}} G(t) dt, \quad (10)$$

Примеры такого способа регулирования агрегатов ГСУ показаны в левой части рис. 3-6. При этом $Q_1 = Q^0_1$, $Q_2 = Q^0_2$, $Q_3 = Q^0_3$, т.е., количества электрической энергии, полученные ВВБ при установившихся режимах работы агрегатов ГСУ (справа) равны таковым в результате осуществления движения на неустановившихся режимах (слева). Но при этом суммарные расходы топлива A_1 , A_2 , A_3 и соответствующие A^0_1 , A^0_2 , A^0_3 могут отличаться, что и становится предметом настоящего исследования.

Для математического описания функции мощности ВВБ, которую обеспечивает работа агрегатов ГСУ в течение времени t_{max} на неустановившихся режимах, в исследовании выбрана полиномиальная зависимость:

$$P = f(t) = \frac{P}{P_{max}} \left(a \cdot \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^3 + b \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^2 + c \cdot \frac{t}{t_{max}} + d \right), \quad (11)$$

где P_{max} – максимальная возможная электрическая мощность, которая может быть достигнута при заряде ВВБ; a, b, c, d – полиномиальные коэффициенты.

Не исключается, что в дальнейшем для уточнения результатов аналитическое выражение для функции (11) может быть изменено.

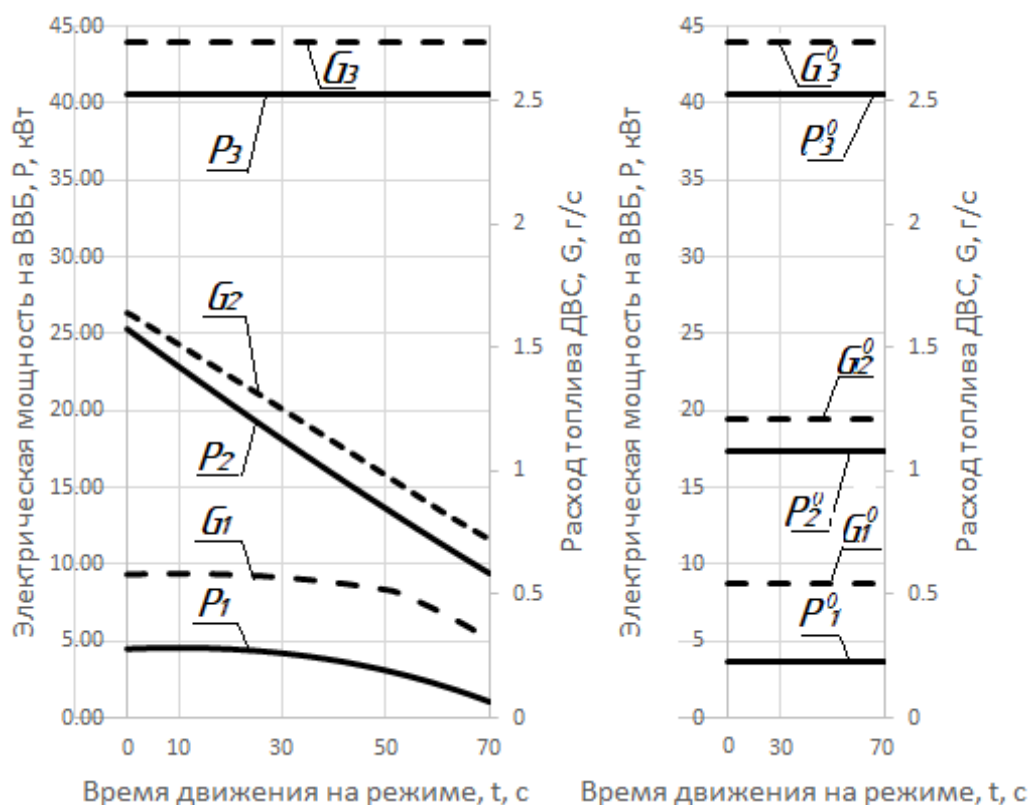


Рис. 4. Регулирование ГСУ при полной остановке автомобиля:

$$N_k = 0 \text{ кВт}, V = 0 \text{ м/с}, t_{max} = 70 \text{ с}$$

Fig. 4. Regulation of the hybrid powertrain when the vehicle is completely stopped:

$$N_k = 0 \text{ кВт}, V = 0 \text{ м/с}, t_{max} = 70 \text{ с}$$

Процесс выбора рациональной формы функции $P = f(t)$ для конкретного установившегося режима движения автомобиля с учетом его длительности является второй задачей оптимизации, для которой в качестве критерия выбрано минимальное значение интегрального показателя расхода топлива A , определенного по выражению (10) при заданном значении интегрального показателя Q (9). В качестве оптимизируемых параметров в данном случае выступают коэффициенты a, b, c, d . Для решения этой задачи оптимизации на языке VBA разработана компьютерная программа.

Рассматривая полученные результаты, приведенные на рис. 3 при работе агрегатов ГСУ на неустановившихся режимах (см. левую часть рисунка) следует отметить, что значения расходов топлива ($A_1 = 1,095 \text{ г}, A_2 = 4,7 \text{ г}, A_3 = 7,29 \text{ г}$) отличаются от вышеприведенных величин ($A^0_1 = 1,5 \text{ г}, A^0_2 = 4,85 \text{ г}$ и $A^0_3 = 7,29 \text{ г}$) для установившегося режима (правая часть рисунка). Отличие между расходами A_1 и A^0_1 составляет 27 %, а между A_2 и A^0_2 3,2 %. Равенство суммарных расходов $A_3 = A^0_3$ объясняется работой ГСУ с максимально возможной электрической мощностью заряда ВВБ.

Таким образом, графики, приведенные на рис. 3, позволяют сделать следующий вывод: для режима движения автомобиля $N_k = -9$ кВт и $V = 12,33$ м/с с известной длительностью t_{\max} , при уменьшении требуемого значения Q , целесообразно организовать работу агрегатов ГСУ на неустановившихся режимах. Аналогичные результаты для других характерных режимов движения автомобиля, рассмотренных в работе, приведены в табл. 2. Для всех режимов, представленных в табл. 2, относительное уменьшение расходов топлива E^* вычислено по зависимости:

$$E^* = \frac{A^0 - A}{A^0} \cdot 100\% \quad (12)$$

Рассмотрим рис. 5. Максимальная энергетическая эффективность расхода электрической энергии Q_1 (-2.76 кДж) на режиме движения автомобиля $N_k = 6$ кВт, $V = 3,08$ м/с в течение $t_{\max} = 3$ с обеспечивается при работе электромеханической части ГСУ в генераторном режиме на протяжении 1,2 сек с последующим переходом в двигательный режим (левый график).

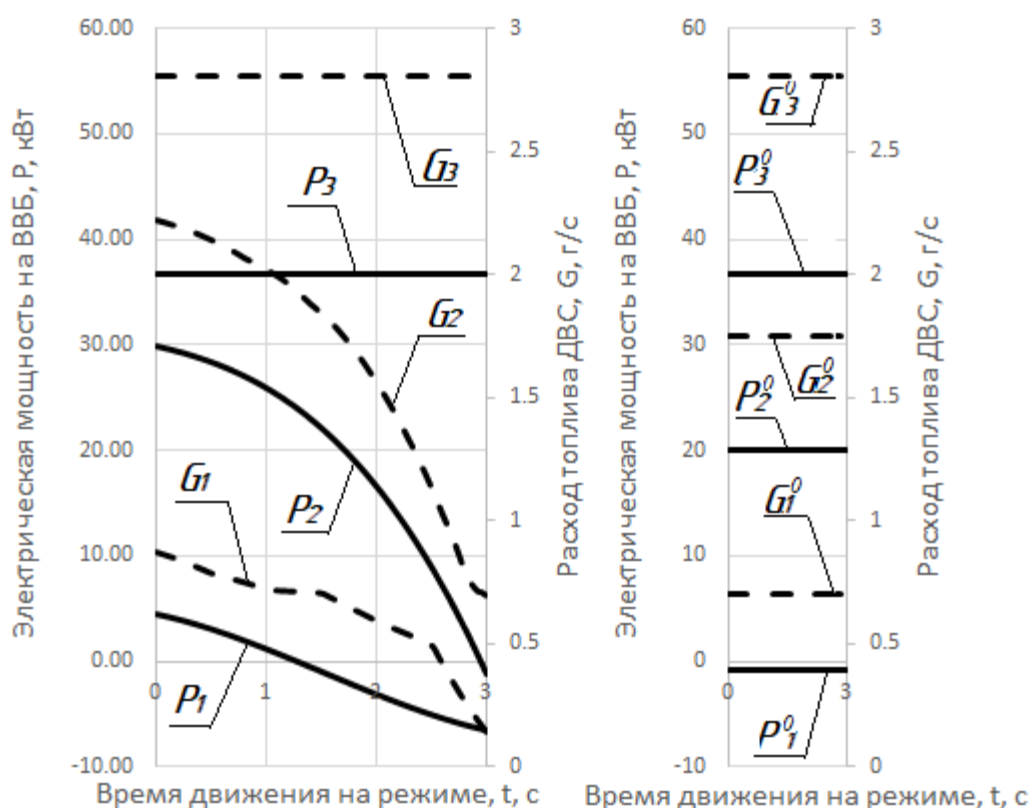


Рис. 5. Регулирование ГСУ на установившемся режиме движения автомобиля:

$$N_k = 6 \text{ кВт}, V = 3,08 \text{ м/с}, t_{\max} = 3 \text{ с}$$

Fig. 5. Regulation of a vehicle hybrid powertrain during steady motion:

$$N_k = 6 \text{ kW}, V = 3,08 \text{ m/s}, t_{\max} = 3 \text{ s}$$

Имеющее место изменение знака передачи потока мощности дает экономию топлива 10,4 % в сравнении с работой с постоянной мощностью $P_1^0 = -0,92$ кВт электромеханической части ГСУ в режиме двигателя в течение 3 сек (правый график). Очевидно, что потери энергии, которые имеют место при циркуляции мощности (левый график), компенсируются возросшими средними значениями эффективного КПД ДВС и электрических машин ввиду организации их работы с большей нагрузкой в течение времени t_{\max} . В общем случае, выигрыш в топливной экономичности путем перехода на неустановившийся режим увеличивается с уменьшением Q (т.е. при работе агрегатов ГСУ с небольшой нагрузкой).

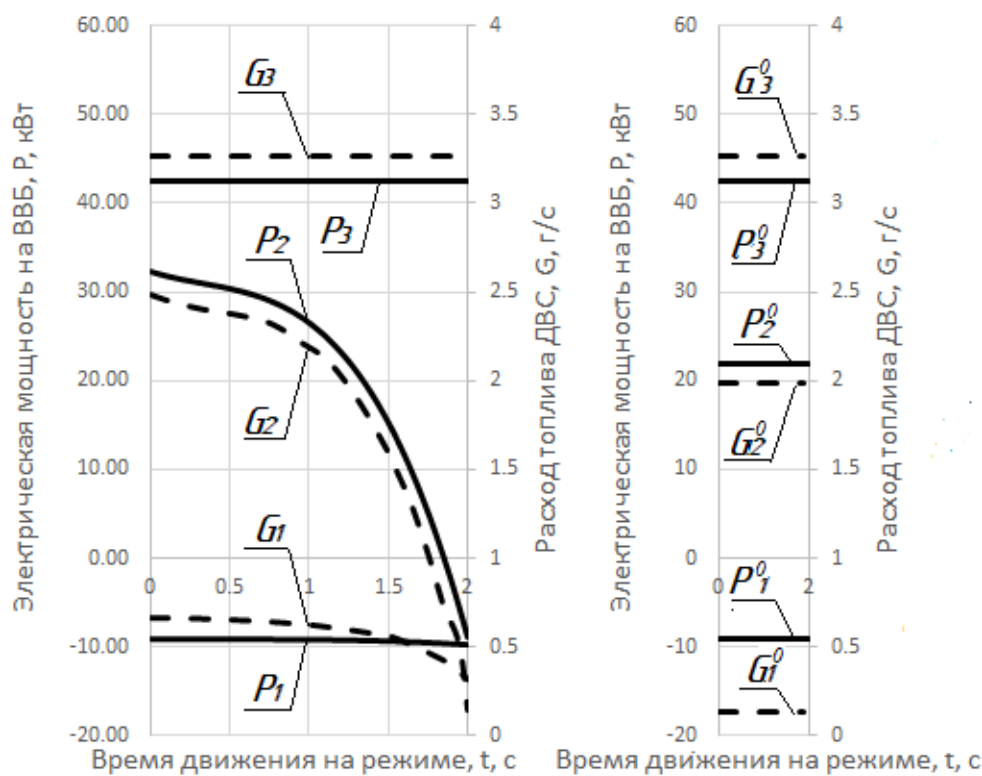


Рис. 6. Регулирование ГСУ на установившемся режиме движения автомобиля:

$$N_k = 9 \text{ кВт}, V = 9,25 \text{ м/с}, t_{max} = 2 \text{ с}$$

Fig. 6. Regulation of a vehicle hybrid powertrain during steady motion:

$$N_k = 9 \text{ kW}, V = 9,25 \text{ m/s}, t_{max} = 2 \text{ s}$$

При предельных для конкретного режима движения автомобиля положительных или отрицательных значениях Q , оптимизация возвращает единственный из возможных результат – агрегаты ГСУ должны работать на установившихся режимах (рис. 3-6, величины Q_3).

Таблица 2.
Результаты оптимизационного расчета

Table 2.
Optimization calculation results

Неустановившийся режим ГСУ (левые части рис. 3-6) $P = \text{var}, G = \text{var}, s = \text{var}, k_1 = \text{var}$						Установившийся режим ГСУ (правые части рис. 3-6) $P^0 = \text{const}, G^0 = \text{const},$ $s = \text{const}, k_1 = \text{const}$				$E^*, \%$
$Q, \text{ Дж}$	a	b	c	d	$A, \text{ г}$	$Q^0, \text{ кДж}$	$P^0, \text{ кВт}$	$G^0, \text{ г/с}$	$A^0, \text{ г}$	
Рис. 3: $N_k = -9 \text{ кВт}, V = 12,33 \text{ м/с}, t_{max} = 3 \text{ с}$										
39	-0.02	-0.025	0.0112	0.160	1,095	39	13	0,5	1,5	27
100	-0.255	-0.107	-0.053	0.561	4,7	100	33,3	1,62	4,85	3,2
145	0	0	0	0.6468	7.29	145	48,3	2.43	7.29	0
Рис. 4: $N_k = 0 \text{ кВт}, V = 0 \text{ м/с}, t_{max} = 70 \text{ с}$										
260	-0.013	-0.046	0.0136	0.0603	37.24	260	3,71	0,546	38.23	2.6
1216	0.003481	0.0158	-0.232	0.337	83,95	1216	17,37	1,21	84,88	1,1
2841	0	0	0	0.5412	194	2841	40,59	2,77	194	0
Рис. 5: $N_k = 6 \text{ кВт}, V = 3,08 \text{ м/с}, t_{max} = 3 \text{ с}$										
-2.76	0.111	-0.17	-0.086	0.0586	1.92	-2.76	-0.92	0,71	2.12	10,4
60	-0.186	-0.136	-0.092	0.398	5.14	60	20	1,75	5.25	2,45
109	0	0	0	0.488	8,5	109	36,3	2,83	8,5	0

Окончание табл. 2.
Результаты оптимизационного расчета

Table 2 continued.
Optimization calculation results

Рис. 6: $N_k = 9$ кВт, $V = 9,25$ м/с, $t_{max} = 2$ с										
-18,1	-0.0217	0.016	-0.0054	-0.12	0.25	-18,1	-9,05	0,135	0.27	8
44,6	-0.781	0.379	-0.149	0.431	3.88	44,6	22,3	1,98	3.96	2
85,1	0	0	0	0.5676	6.6	85,1	42,55	3,3	6.6	0

Выводы

В результате исследования установлено, что при движении автомобиля на установившемся режиме с известной продолжительностью по времени может быть предусмотрена и реализована такая рациональная организация работы агрегатов гибридной силовой установки на неустановившихся режимах, которая обеспечивает повышение эффективности процессов преобразования энергии и, как следствие, снижение путевого расхода топлива. На примере параметров и характеристик автомобиля *Toyota Prius* определено, что на отдельных режимах его движения расход топлива может быть снижен на величину до 27 %. В наибольшей мере полезный эффект от реализации рассмотренного подхода к регулированию силовой установкой имеет место при зарядке ВВБ (при $Q > 0$) и увеличивается со снижением электрической мощности до уровня 15-16 % от максимальной. Таким образом, ожидается, что в реальных городских условиях эксплуатации для автомобилей категории М₁, оснащенных ГСУ последовательно-параллельного типа, повышение топливной экономичности может составить до 4-5 %.

Результаты исследования направлены на разработку рациональных алгоритмов управления агрегатами ГСУ при движении автомобиля в комплексе неустановившихся режимов движения, например в современных ездовых циклах. В условиях реальной эксплуатации такое регулирование может обеспечиваться соответствующими программами, введенными в блок управления силовой установки и обновляемыми на основе адаптивного алгоритма.

Библиографический список

- ГОСТ Р 41.101-99. Правила ЕЭК ООН № 101. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, оборудованных двигателем внутреннего сгорания в отношении измерения объема выбросов диоксида углерода и расхода топлива, а также транспортных средств категории М1 и N1, оборудованных электроприводом, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294820/4294820291.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
- UITP Project «SORT» standardized On-Road Test cycles. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/hybridbus/files/SORT2.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
- ГОСТ Р 59890-2021. Автомобильные транспортные средства. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Технические требования и методы испытаний на базе всемирной согласованной процедуры испытания транспортных средств малой грузоподъемности и испытаний в реальных условиях эксплуатации. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 280 с.
- Савенков, Н.В. Метод выбора передаточных чисел силовой установки автомобиля категории N1 на основе ездового цикла: дис. ... канд. тех. наук : 05.05.03 : защищена 06.06.17 / Савенков Никита Владимирович. – М.: МАДИ, 2017. – 206 с.
- ТР ТС 018/2011. О безопасности колесных транспортных средств. С изменениями на 21 апреля 2023 года. Редакция, действующая с 20 мая 2023 года : издание официальное : Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 877. – М.: Стандартиформ, 2011. – 465 с.

6. **Савенков, Н.В.** Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки / Н.В. Савенков, О.О. Золотарев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №. 1 (35). С. 41-50.
7. **Gianfranco, P.** Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market / P. Gianfranco. Rome. Elsevier. 2010. – 645 P.
8. **Mehrdad, E.** Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design / Mehrdad, E. Yimin G., Sebastien E. – Ali E. CRC Press, West Florida. 2008. – 419 P.

*Дата поступления
в редакцию: 31.12.2023*

*Дата принятия
к публикации: 08.02.2024*