

Научная статья
УДК 629.018

Повышение энергетической эффективности автомобиля с гибридной силовой установкой последовательно-параллельного типа путем выбора рациональных режимных и конструктивных параметров

Олег Олегович Золотарев

ФГБОУ ВО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА),
г. Макеевка, Россия

o.o.zolotarev@donnasa.ru

Аннотация. Для автомобильных гибридных силовых установок параллельного и последовательно-параллельного типов предложен метод снижения путевого расхода топлива при заданном потреблении электрической энергии в ездовом цикле за счёт оптимизации режимных и конструктивных параметров. Разработанный алгоритм содержит три последовательных этапа: объединение однотипных режимов движения в группы, исключение неэффективных режимных комбинаций агрегатов и последующий многопараметрический эволюционный поиск. Это позволяет существенно сократить необходимые вычислительные затраты.

На примере автомобиля Toyota Prius ZW52 показано, что рациональный выбор передаточных чисел гибридной силовой установки и её регулирование в соответствии с разработанным алгоритмом при заданном балансе электрической энергии обеспечивает снижение путевого расхода топлива в ездовом цикле WLTC (ВЦИМГ) до 7,38% без существенного ухудшения показателей тягово-скоростных свойств.

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, гибридная силовая установка, критерий оптимизации, оптимизационные параметры, ездовой цикл, вычислительная сложность.

Для цитирования: Золотарев О.О. Повышение энергетической эффективности автомобиля с гибридной силовой установкой последовательно-параллельного типа путем выбора рациональных режимных и конструктивных параметров // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 3 (45).

Original article

Improving the energy efficiency of a vehicle with a series-parallel hybrid power plant by selecting rational operating and design parameters

Oleg O. Zolotarev

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture" (DONNACEA), Makeevka, Russia

o.o.zolotarev@donnasa.ru

Abstract. A method for reducing the fuel consumption per mile for parallel and series-parallel hybrid power units with a given electric energy consumption in the driving cycle by optimizing the operating and design parameters is proposed for automobile hybrid power units. The developed algorithm contains three successive stages: combining similar driving modes into groups, eliminating inefficient operating combinations of units, and subsequent multi-parameter evolutionary search. This allows for a significant reduction in the required computational costs. Using the example of the Toyota Prius ZW52, it is shown that a rational choice of gear ratios for the hybrid power unit and its regulation in accordance with the developed algorithm with a given electric energy balance ensures a reduction in fuel consumption per mile in the WLTC driving cycle by up to 7.38% without a significant deterioration in traction and speed properties.

Keywords: hybrid vehicle, hybrid power plant, optimization criterion, optimization parameters, driving cycle, computational complexity.

For citation: Zolotarev O.O. Improving the energy efficiency of a vehicle with a series-parallel hybrid power plant by selecting rational operating and design parameters. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. №3 (45).

Введение. В РФ гибридные транспортные средства (ГТС) являются гибкой альтернативой традиционным и электрическим автомобилям, что обусловлено невысокой плотностью размещения станций зарядки электромобилей. В период 2023-2025 гг. количество эксплуатируемых в РФ ГТС стремительно увеличивается [1], ведется работа над созданием отечественных моделей (ФГУП «НАМИ», ПАО «КАМАЗ» и т.д.).

Задача экономии энергоресурсов, в т.ч. невозобновляемых, является актуальной для всех типов энергоустановок. Распространенным способом её решения для ГТС является режимная оптимизация гибридной силовой

установки (ГСУ). Результаты научных трудов Г.О. Котиева, С.В. Бахмутова, В.В. Селифонова, Н.М. Филькина, С.Б. Аджиманбетова, Е.Е. Баулиной, Р.М. Галиева, К.С. Ившина, А.Н. Лазаревой, В.К. Мазец, Д.А. Копотева, Р.П. Хамидуллина, В.А. Буторина, И.А. Куликова, К.М. Сидорова, Н.В., Савенкова, В.А. Ракова, С.В. Черанёва, Zhang C., Vahidi A., Chen Z., Xiong R., Wang C., Cao J., Guo H., Liang B., Xu F.G., Shen T.L., East, S., Cannon M., Лин З.Н. и др. показывают, что для различных типов ГТС применяются разные подходы к принципам и алгоритмам управления ГСУ. При этом для параллельных и последовательно-параллельных типов соответствующие оптимальные решения требуют больших вычислительных затрат, что обусловлено конструкцией ГСУ, представляющей собой многокомпонентную систему с многомерными нелинейными характеристиками, наличием накопителя избыточной энергии трансмиссии, широким набором эксплуатационных режимов движения. Это препятствует применению простейших алгоритмов. Для таких ГТС известные методы приближённого решения задачи распределения энергии между агрегатами ГСУ для условий ездовых циклов сопряжены со следующими недостатками: динамическое программирование имеет большой объем вычислений; принцип минимума Портнягина характеризуется сложностью моделей, последовательное квадратичное программирование обладает неконтролируемым временем поиска; метод множителя переменного направления имеет низкую точность. С целью сокращения поисковой области распространенным решением является принятие дополнительных ограничений, которые сокращают количество возможных степеней свободы в сочетании режимных параметров. Таким образом, вопросы, связанные с достоверным учетом влияния всех возможных сочетаний режимов работы агрегатов ГСУ на энергетическую эффективность ГТС в условиях ездовых циклов являются актуальными.

Основная гипотеза исследования заключается в наличии одного или нескольких возможных решений задачи оптимизации для ГСУ в условиях цикла движения, которые возможно определить за приемлемое время, используя доступные вычислительные ресурсы, за счёт: объединения

однотипных режимов движения в группы, исключения из числа возможных состояний системы нереализуемых и нерациональных сочетаний режимов работы агрегатов ГСУ с последующим применением к оставшемуся числу состояний известных алгоритмов многопараметрической оптимизации.

В качестве критерия для комплексной оценки энергетической эффективности ГТС выбрано количество израсходованного топлива в некотором ездовом цикле (ЕЦ), A , г/цикл, при заданном потреблении электрической энергии в этом цикле ΔE , Дж/цикл:

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_0^{t_{\text{ц}}} G(t) dt \rightarrow \min \\ \Delta E &= \int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt = B \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ц}}$ – общее время движения ГТС в условиях ЕЦ, с; $G(t)$ – функция текущего расхода топлива ДВС от времени движения в цикле t , г/с; $P(t)$ – функция электрической мощности, отдаваемой (принимаемой) высоковольтной батареей (ВВБ), кВт, от времени t ; B – разница накопленной в ВВБ электрической энергии между концом и началом ЕЦ ($S_{\text{оск}} - S_{\text{осн}}$), Дж: $B = 0$ – принимается при испытаниях по ездовому циклу ВЦИМГ (WLTC) в условиях ГОСТ Р 59890-2021, в эксплуатации характерно для ГТС типа HEV; $B < 0$ – электрической энергии израсходовано больше, чем получено на маршруте (характерно для ГТС типа PHEV); $B > 0$ – электрической энергии израсходовано меньше, чем получено на маршруте – например, при необходимости последующего преодоления зоны с ограничением экологического класса.

В качестве оптимизационных параметров определены (табл. 1, рис. 1):

- режимные: частота вращения коленчатого вала ДВС n и коэффициент использования мощности электрической машины ЭМ1, k_1 ;
- конструктивные: передаточные числа (ПЧ) привода ведущих колес от ЭМ1, $U_{1к}$; ПЧ привода ведущих колес от ДР, $U_{кк}$; силовое ПЧ ДР, $U_{др}$.

Таблица 1

Определение параметров оптимизации

Режимные параметры оптимизации					
Общее количество режимных параметров в ГСУ: $\zeta_{сум} = 2 \cdot n_{д} + n_{кп}$, где $n_{д}$ – количество двигателей (в т.ч. ЭМ), $n_{кп}$ – количество коробок передач. Из количества $\zeta_{сум}$ (при постоянной скорости движения ($V = const$) и мощности на ведущих колесах ($N_{к} = const$)) количество независимых режимных параметров в ГСУ составляет (в соответствии с числом степеней свободы): $\zeta = n_{д} + n_{кп} - 1$.					
Для выбранного в качестве примера ГТС Toyota Prius ZW52: $n_{д} = 3$, $n_{кп} = 0$, таким образом: $\zeta_{сум} = 6$, $\zeta = 2$					
Режимные параметры ГСУ ГТС Toyota Prius ZW52 (рис. 1)					
Прочие режимные параметры		Параметры регулирования ГСУ			
		Выбранные режимные параметры (параметры оптимизации)	независимые параметры		
n_1	n_2	n	k_1	k_2	k
n_1 – частота вращения ротора ЭМ1, n_2 – частота вращения ротора ЭМ2, n – частота вращения коленчатого вала ДВС, k_1 – коэффициент использования мощности ЭМ1, k_2 – коэффициент использования мощности ЭМ2, k – коэффициент использования мощности ДВС. Таким образом: $n_1 = f(V)$, $n_2 = f(n, V)$, $k_2 = f(n, k_1, N_{к}, V)$, $k = f(n, k_1, N_{к}, V)$ – связаны кинематическими и силовыми соотношениями в трансмиссии					
Конструктивные параметры оптимизации					
1. Передаточное число привода ведущих колес от ЭМ1: $U_{1к} = n_1/n_{к}$, где $n_{к}$ – частота вращения ведущего колеса. 2. Передаточное число привода ведущих колес от ДР: $U_{кк} = n_{кор}/n_{к}$, где $n_{кор}$ – частота вращения коронной шестерни ДР. 3. Передаточное число ДР (планетарного механизма): $U_{др} = 1 + z_{к}/z_{с}$, где $z_{к}/z_{с}$ это отношение числа зубьев внутреннего венца коронной шестерни ДР к числу зубьев солнечной шестерни.					

Для ГСУ параллельного и последовательно-параллельного типов задача оптимизации решается одновременно для всех режимных точек ЕЦ. Требуемое количество вычислительных итераций при этом составляет $I_0 = h^{(-\zeta \cdot z)}$, где z – количество режимных точек ($z = t_m$; для WLTC $z = 1794$), h – относительный шаг перебора. Для значений $\zeta = 2$ (табл. 1) и $h = 0.01$ анализ системы с полученным количеством состояний I_0 методом прямого перебора представляет собой трансвычислительную задачу [4], для которой требуются другие подходы к решению.

На рисунке 2 приведен разработанный алгоритм, предложенный для решения задачи оптимизации.

В блоке «Постановка задачи» заданы следующие характеристики ГТС:

- частичная скоростная характеристика ДВС по эффективной мощности:

$$N_e(n, k) = k \cdot N_{e\max} \cdot \left[a \frac{n}{n_N} + b \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 + c \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right], \quad (2)$$

где $N_{e\max}$ – номинальная мощность ДВС; a, b, c – аппроксимирующие коэффициенты; n_N – номинальная частота вращения коленчатого вала;

- частичная скоростная характеристика ДВС по эффективному удельному расходу топлива:

$$g_e(n, k) = g_{eN} \cdot (a_U - b_U \cdot k + c_U \cdot k^2) \cdot \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{n}{n_N} \right) + \beta_2 \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где g_{eN} – эффективный удельный расход топлива на номинальном режиме; $a_U, b_U, c_U, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ – аппроксимирующие коэффициенты;

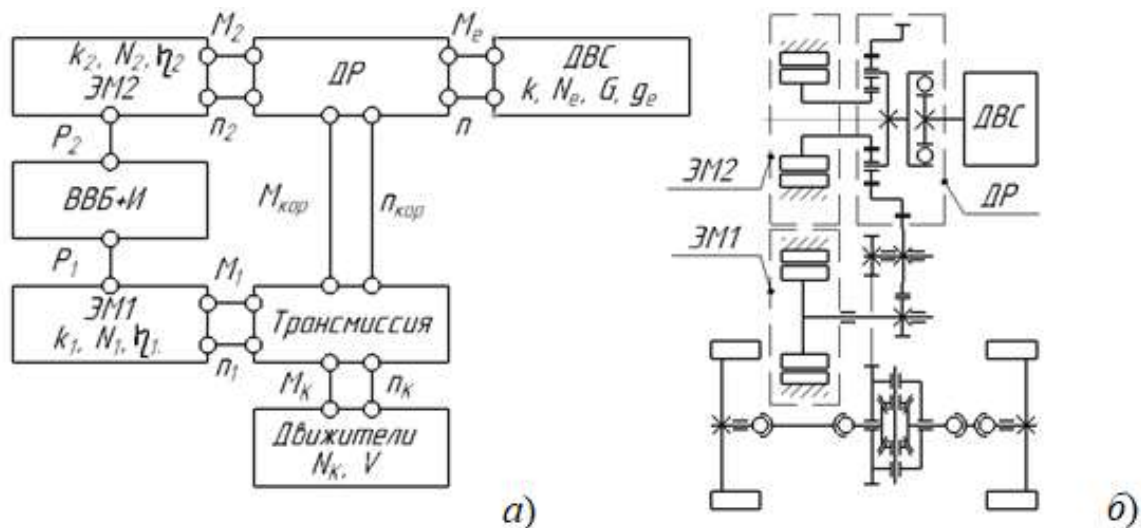


Рис. 1. ГСУ автомобиля Toyota Prius ZVW52:

а) структурная схема кинематического, силового и энергетического взаимодействия между элементами; б) кинематическая структурная схема

- частичная скоростная характеристика ДВС по текущему расходу топлива:

$$G = f(k, n) = g_e(k, n) \cdot N_e(k, n); \quad (4)$$

- механическая характеристика (5) и характеристика КПД (6) i -й ЭМ [5]:

$$M_i(n, k) = K_{Ti} \cdot k_i \cdot \left[a_{li} + b_{li} \left(\frac{n_i}{n_{Ni}} \right) + c_{li} \left(\frac{n_i}{n_{Ni}} \right)^2 + d_{li} \left(\frac{n_i}{n_{Ni}} \right)^3 + e_{li} \left(\frac{n_i}{n_{Ni}} \right)^4 \right], \text{ [при } |n_i| \geq |n_{Ni}|]; \quad (5)$$

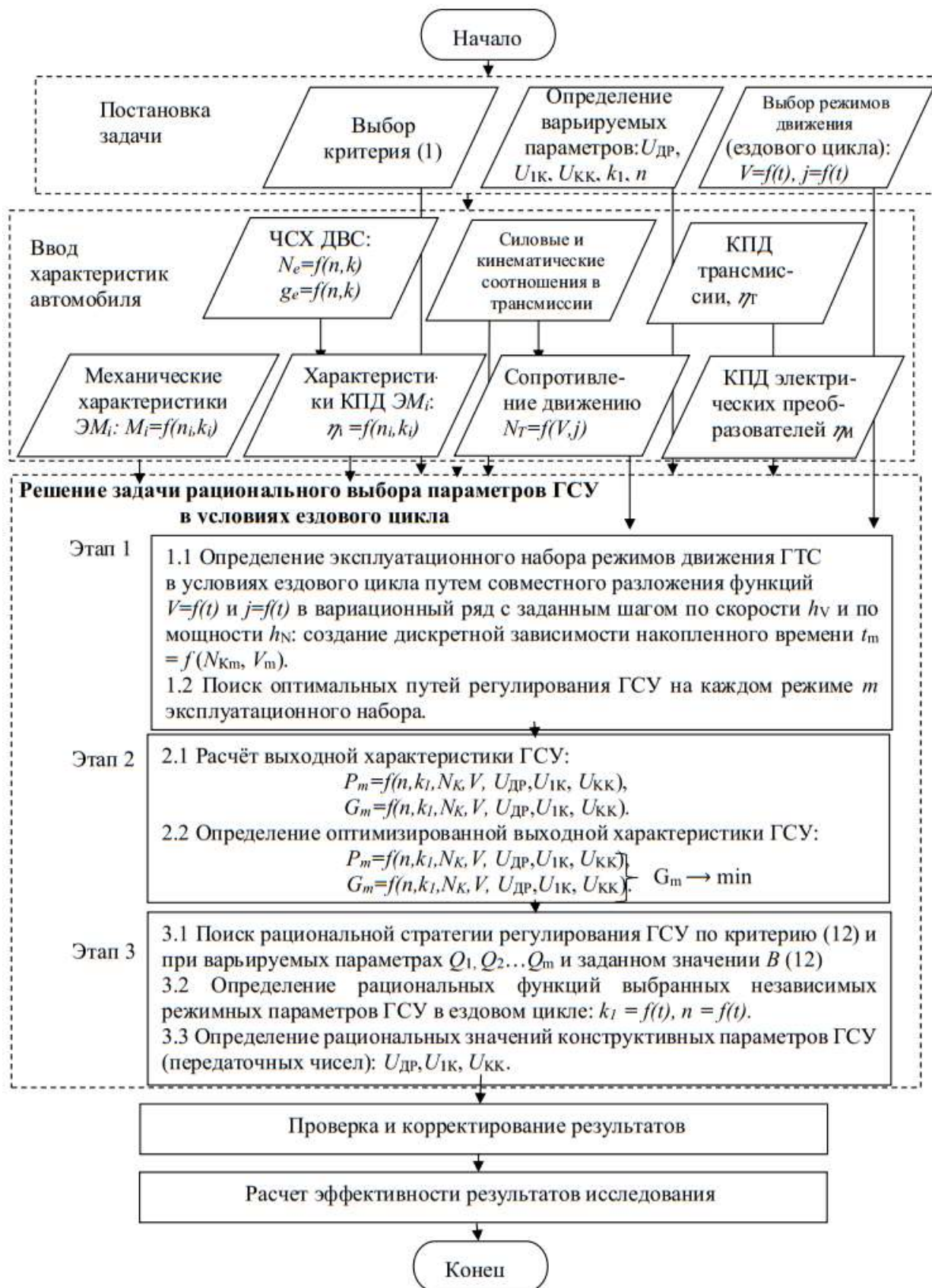


Рис. 2. Алгоритм решения задачи оптимизации

$$\eta_i(n_i, k_i) = \left[1 + \frac{1}{p_{0i} + 1} \left(\frac{1}{\eta_{Ni}} - 1 \right) \frac{p_{0i} \left(\frac{|n_i|}{n_{Ni}} \right)^2 + |k_i|^2}{|k_i| \cdot \left(\frac{|n_i|}{n_{Ni}} \right)} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где K_{Ti} – коэффициент подобия i -й ЭМ; $a_{1i}, b_{1i}, c_{1i}, d_{1i}, e_{1i}$ – аппроксимирующие коэффициенты i -й ЭМ; n_i – текущая частота вращения ротора i -й ЭМ (принимает значения n_1 и n_2); k_i – коэффициент использования мощности i -й ЭМ (принимает значения k_1 и k_2); n_{Ni} – номинальная частота вращения ротора i -й ЭМ; p_{0i} – относительная мощность потерь; η_{Ni} – КПД на номинальном режиме i -й ЭМ;

- кинематическая и силовая связь в дифференциальном распределителе (ДР):

$$n = n_{\text{кор}} \cdot \left(1 - \frac{1}{U_{\text{ДР}}} \right) + \frac{n_2}{U_{\text{ДР}}}; \quad M_e = \frac{M_{\text{кор}}}{\left(1 - \frac{1}{U_{\text{ДР}}} \right) \cdot \eta_{\text{ДР}}}; \quad M_2 = \frac{M_e \cdot \eta_{\text{ДР}}^{\text{sgn}(N_2)}}{U_{\text{ДР}}}, \quad (7)$$

где $M_{\text{кор}}$ – крутящий момент на коронной шестерне ДР (рис. 1); $\eta_{\text{ДР}}$ – КПД ДР;

- кинематическая и силовая связь в трансмиссии ГСУ:

$$n_1 = n_K \cdot U_{1K}; \quad n_{\text{кор}} = n_K \cdot U_{KK}; \quad M_{\text{кор}} = \frac{(M_K + M_1 \cdot U_{1K} \cdot \eta_{1K}^{\text{sgn}(M_1)}) \eta_{KK}^{\text{sgn}(M_{\text{кор}})}}{U_{KK}}; \quad (8)$$

- электрическая мощность зарядки (разрядки) ВВБ:

$$P = \sum P_i = P_1 + P_2; \quad (9) \quad P_i = N_i(k_i, n_i) [\eta_i(k_i, n_i)]^{\text{sgn}(N_i)} \cdot \eta_{\text{и}}^{\text{sgn}(N_i)}, \quad (10)$$

где P_1, P_2 – электрические мощности ЭМ1 и ЭМ2 соответственно; N_i – механическая мощность на роторе i -й ЭМ; $\eta_{1K}, \eta_{KK}, \eta_{\text{и}}$ – КПД привода ЭМ1, привода ведущих колес от ДР и электрического инвертора соответственно.

На первом этапе разработанного метода оптимизации (алгоритм рис. 2) с целью сокращения объема вычислений однотипные режимы движения ГТС объединяются в группы. Это выполнено путем совместного разложения в вариационные ряды с заданным шагом h_v функций скорости и h_N функции мощности на ведущих колесах. Результаты приведены на рис.3. В ячейках

находится накопленное время t_m . Сумма всех ячеек – общая продолжительностью ездового цикла.

N_{Km}	Скорости движения ГТС, V_m , км/ч														
кВт	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
-32	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-29	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
-26	0	0	0	0	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
-23	0	0	0	5	4	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
-20	0	0	0	8	6	1	2	1	0	0	1	2	2	0	0
-17	0	0	5	8	6	1	1	1	0	0	3	3	0	0	0
-14	0	1	12	12	8	5	6	1	0	0	0	1	0	0	0
-11	0	4	7	7	7	5	3	5	0	0	1	1	1	0	0
-8	1	11	16	7	4	6	9	5	0	1	0	0	0	0	0
-5	4	25	26	8	10	8	11	3	2	2	0	1	1	0	0
0	265	60	32	15	17	14	10	3	3	6	2	2	0	0	0
1	11	59	44	7	32	18	15	10	29	6	2	5	1	0	0
4	7	23	18	13	26	35	17	23	6	4	3	3	2	1	0
7	0	18	24	7	13	31	16	7	7	19	7	5	2	0	0
10	0	6	19	20	9	15	9	10	13	39	5	2	3	1	0
13	0	1	12	14	17	7	12	10	12	6	3	1	13	0	0
16	0	0	1	12	4	7	11	5	0	5	3	1	10	1	0
19	0	0	2	5	5	3	2	3	1	2	3	0	19	1	0
22	0	0	0	1	6	3	5	0	0	2	2	1	12	1	0
25	0	0	0	2	2	0	3	0	1	0	2	7	11	2	0
28	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3	6	1	0	0
31	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	4	3	1	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	4	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Исследуемый набор режимов движения ГТС Toyota Prius ZVW52 в условиях ездового цикла WLTC

Характеристика мощности на ведущих колесах составлена на основе мощностного баланса автомобиля и далее преобразована в вид $N_K = f(t)$ для выбранного ездового цикла, заданного зависимостью $V_K = f(t)$. На втором этапе для каждой режимной ячейки таблицы рисунка 3 (при $t_m > 0$) выполняется расчёт выходной характеристики ГСУ – зависимостей G и P ($P = P_1 + P_2$) от выбранных независимых режимных параметров, рис. 4а. При этом не все возможные сочетания выбранных независимых режимных параметров (k_1 и n' , $n' = n/n_N$) являются реализуемыми, и не все из реализуемых (в пределах контура на рис. 4а) рациональны с позиции энергетической эффективности [6]. Например, в точках «А» и «В» электрическая мощность зарядки ВВБ

одинакова $P = 5$ кВт. Но текущий расход топлива ДВС в точке «А» $G = 1.3$ г/с, а в точке «В» $G = 2$ г/с. Т.к. для этих точек режим движения ГТС остаётся неизменным ($N_K = 10$ кВт, $V = 20$ м/с), то точка «А» более эффективна. Аналогичная ситуация с точками «С» и «D» при разрядке ВВБ мощностью $P = -5$ кВт.

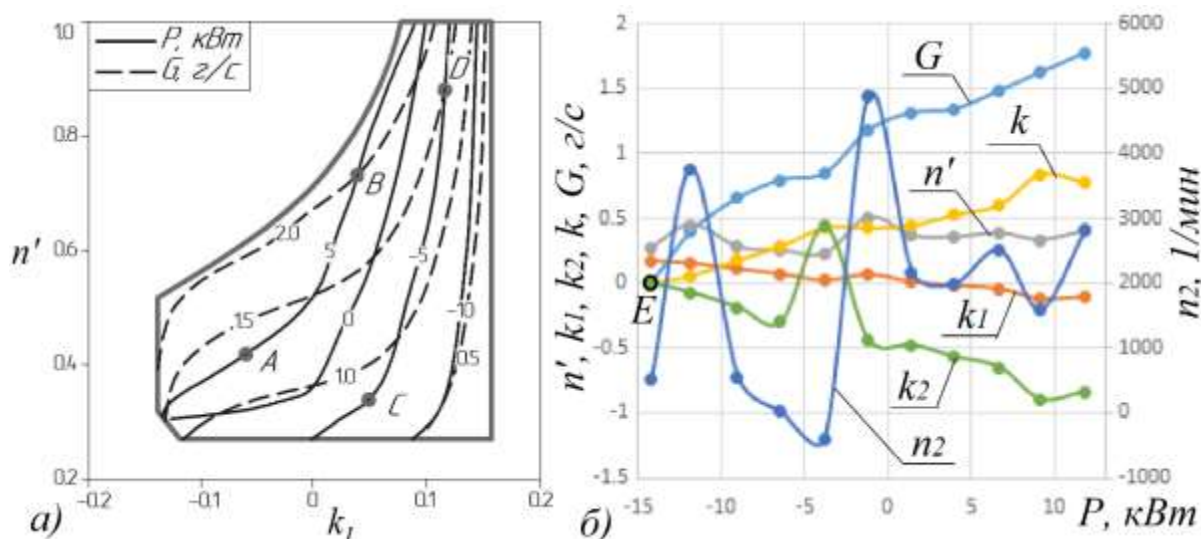


Рис. 4. Выходная характеристика ГСУ для $N_K=10$ кВт, $V=20$ м/с:

а) совместная диаграмма по текущему расходу топлива ДВС и электрической мощности на ВВБ; б) оптимизированная выходная характеристика ГСУ

На рисунке 4б приведена «Оптимизированная выходная характеристика ГСУ», которая позволяет для каждого значения мощности P на режиме движения с заданными N_K и V определить такие значения режимных параметров ГСУ, для которых G принимает минимальное значение [7]. Точка «Е» на этой характеристике является наиболее эффективным режимом полного электромобиля – при $G = 0$ достигается минимально возможная (по модулю) электрическая мощность P .

На третьем этапе предлагаемого метода (рис. 2) выполняется многопараметрический поиск. Если в течение времени t_m каждой группы режимов работа ГСУ осуществляется при постоянных значениях P на этих режимах (P_m), то критерий (1) возможно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_0^{t_{ц}} G(t)dt \cong \sum_1^m G_m \cdot t_m = \sum_1^m A_m \rightarrow \min \\ \Delta E &= \int_0^{t_{ц}} P(t)dt \cong \sum_1^m P_m \cdot t_m = \sum_1^m Q_m = B \end{aligned} \right\}, (11)$$

где A_m – суммарное потребление топлива в группе режимов m ,
 Q_m – суммарная затрата электрической энергии в группе режимов m .

Так как в каждой группе m рис. 3, значения текущего расхода топлива ДВС G_m и выбранных независимых режимных параметров ГСУ k_1 и n являются функциями от текущей электрической мощности на ВВБ P_m (в рамках m -й оптимизированной характеристики ГСУ), то для критерия (11) возможно выполнить замену варьируемых параметров на Q_m . В этом случае количество возможных состояний системы составит: $I_1 = h^{(-m)}$, что $\ll I_0$.

Оптимизационный поиск по третьему этапу выполнен разработанной на языке VBA программой эволюционной многопараметрической оптимизации.

На рисунке 5 приведены диаграммы изменения составляющей A критерия (1) – путевого расхода топлива в условиях ЕЦ (при $B = 0$) в зависимости от значений ПЧ ГСУ, а также их влияние на тягово-скоростные свойства ГТС: время разгона до 100 км/ч, T_{100} , и максимальную скорость $V_{\max}$.

Исследования показывают, что при серийных передаточных числах ГСУ ($U_{\text{ДР}} = 3,6$; $U_{\text{КК}} = 2,83$; $U_{\text{ИК}} = 10,2$), расход A составляет 5,635 л/100 км, $T_{100} = 11,5$ с, $V_{\max} = 57$ м/с (точка «1» на рис. 5б). Точка «2» на диаграмме соответствует минимальному расходу топлива при серийном ПЧ ДР $U_{\text{ДР}}$, остальные ПЧ уменьшены: от ЭМ1 к ведущим колесам $U_{\text{ИК}}$ с 10,2 до 9, от коронной шестерни ДР к ведущим колесам $U_{\text{КК}}$ с 2,83 до 2,6 – путевой расход в ЕЦ сокращается на 7,38%, T_{100} ухудшается на 4,2%, рост $V_{\max}$ составляет 9,47%.

Уменьшение $U_{\text{ДР}}$, рис. 5а, рациональным не является: при $U_{\text{ДР}} = 3$ расход A принимает минимальное значение 6,256 л/100 км в точке «4» (выше на 11%

по отношению к серийным ПЧ «1») при $U_{\text{КК}} = 2,6$, $U_{\text{1К}} = 10$; T_{100} ухудшается на 9,56%, V_{max} уменьшается на 0,35%.

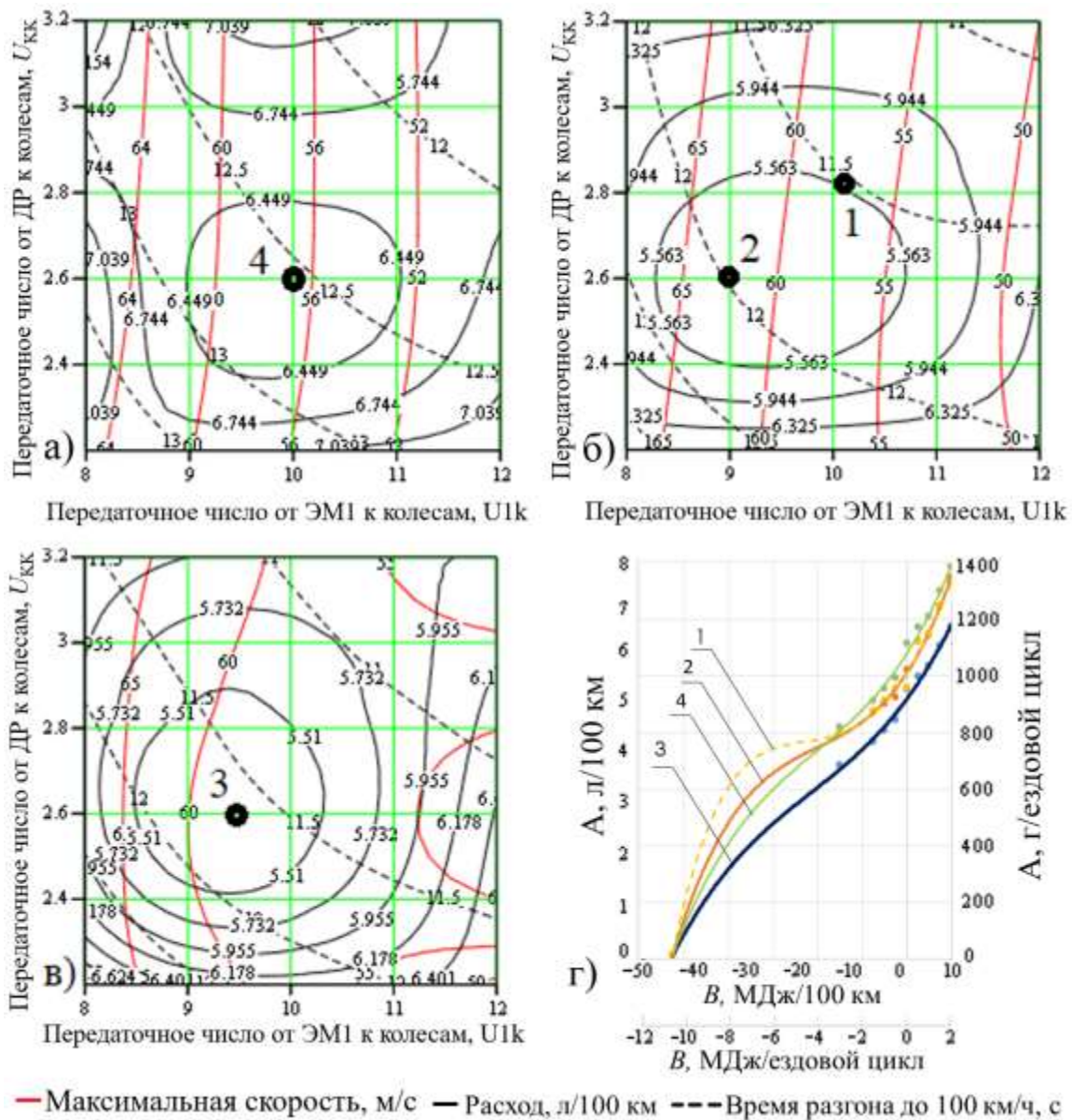


Рис. 5. Зависимости расхода топлива в условиях ЕЦ, времени разгона до скорости 100 км/ч и максимальной скорости движения от значений ПЧГСУ:

a) $U_{DP} = 3$; б) $U_{DP} = 3,6$; в) $U_{DP} = 4$;

2) влияние ПЧ ГСУ на эксплуатационные свойства автомобиля – расход топлива и электрической энергии в ЕЦ

Изменение $U_{\text{др}}$ в сторону увеличения до $U_{\text{др}} = 4$ позволяет обеспечить минимальный расход 5,3 л/100км (точка «3» на рис. 5в), что на 6% меньше, чем при серийных ПЧ и на 1,6% больше минимально установленного в точке

«2». ПЧ в точке «3»: $U_{KK} = 2,6$; $U_{1K} = 9,5$; T_{100} ухудшается на 1,1%, а V_{max} растет на 2,1% относительно точки «1».

Путевые расходы топлива A на диаграммах рис. 5а-в определены при регулировании ГСУ в условиях ЕЦ в соответствии с разработанной в настоящем исследовании рациональной стратегией (рис. 2) при заданном балансе электрической энергии $B = 0$ (1). Функции составляющей критерия A (1) для разных сочетаний ПЧ («1», «2», «3», «4» на рис. 5а-в) в зависимости от значений составляющей B приведены на рис. 5г.

В областях графика, расположенных над этими функциями, повысить энергетическую эффективность ГСУ возможно за счёт режимной оптимизации. Сами функции являются пределом этой оптимизации и обусловлены Законом сохранения энергии – область под ними может быть достигнута только изменением компоновочной схемы ГСУ или применением агрегатов с более высоким КПД.

Выводы и рекомендации

Проведенные исследования показали, что направление по повышению энергетической эффективности путем согласования параметров агрегатов гибридной силовой установки с режимами движения автомобиля позволяет в значительной мере сократить расход топлива во Всемирном гармонизированном ездовом цикле WLTC, выбранном в качестве примера, при заданном потреблении электрической энергии.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложен метод рационального выбора режимных и конструктивных параметров ГСУ последовательно-параллельного типа по выбранному комплексному критерию энергетической эффективности (минимизация путевого расхода топлива при заданном энергопотреблении) в условиях ездового цикла, позволяющий сократить необходимые вычислительные затраты времени за счёт объединения однотипных режимов движения автомобиля в группы, исключения из числа возможных состояний

системы нереализуемых и нерациональных сочетаний режимов работы агрегатов ГСУ с последующим применением к оставшемуся числу состояний известных алгоритмов многопараметрической оптимизации

2. Разработаны математические модели характеристик ДВС, электромашин, трансмиссии и сопротивления движению автомобиля. Выполненный анализ показал, что различные комбинации режимов ГСУ имеют разную энергетическую эффективность. Например, при скорости 20 м/с и мощности на ведущих колесах 10 кВт, расход топлива варьируется от в достаточно широких пределах даже при постоянной мощности заряда (разряда) ВВБ: от 0,75 до 1,7 г/с при разряде мощностью 5 кВт.

3. Для гибридного транспортного средства Toyota Prius ZW52, выбранного в качестве примера, определены значения передаточных чисел ГСУ, позволяющие снизить расход топлива в условиях WLTC на 7,38% без существенного ухудшения тягово-скоростных свойств. Результаты справедливы для нулевого баланса электрической энергии на ВВБ.

Список источников

1. Тимерханов, А. Парк электрокаров и гибридов в России [Электронный ресурс] / А. Тимерханов // ООО «АВТОСТАТ». – Тольятти. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/infographics/58435/> (дата обращения: 29.04.2024).
2. A review of energy management strategies based on model predictive control for hybrid electric vehicles / X. Li, S. Liu, X. Hu [et al.] / Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 56. – Art. № 106112. – DOI 10.1016/j.est.2022.106112.
3. Klir, G. J. Facets of systems science. – New York : Springer, 1991. – P. 121–128. – ISBN 978-0-306-43959-9.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов / Вольдек А. И., Попов В. В. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 350 с.
5. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 287-298. – DOI 10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298. – EDN TODPUE.

6. Савенков, Н. В. Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки / Н. В. Савенков, О. О. Золотарев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 1(35). – EDN WYDHJS.

7. 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. Р.Е. Алексеева. – 2024. – № 2(145). – С. 90-101. – EDN BNXVMC.

References

1. Timerkhanov A. *Park elektrokarov i gibridov v Rossii*, available at: <https://www.autostat.ru/infographics/58435/>.

2. Li X., Liu S., Hu X., Xing C., He S., Xu Y., Fu J., Zhang M., Yang X. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 56, art. 106112, DOI 10.1016/j.est.2022.106112.

3. Klir G.J. *Facets of systems science*, New York, Springer, 1991, pp. 121–128, ISBN 978-0-306-43959-9.

4. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* (Electrical machines. AC machines), Saint Petersburg, Piter, 2010, 350 p.

5. Firago B.I., Aleksandrovskiy S.V. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 287–298.

6. Savenkov N.V., Zolotarev O.O. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 1(35).

7. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Zolotarev O.O. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2024, no. 2(145), pp. 90–101.

Рецензент: В. А. Пенчук, д-р техн. наук, проф., ДОННАСА

Информация об авторе

Золотарев Олег Олегович, ст. преподаватель, ДОННАСА.

Information about the author

Zolotarev Oleg O., senior lecturer, DONNACEA.

Статья поступила в редакцию 24.09.2025; одобрена после рецензирования 25.09.2025; принята к публикации 25.09.2025.

The article was submitted 24.09.2025; approved after reviewing 25.09.2025; accepted for publication 25.09.2025.