

Научная статья
УДК 629.3.01

Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки

Никита Владимирович Савенков¹, Олег Олегович Золотарев²

^{1,2}ГООУ ВПО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА),
Макеевка, Россия

^{1,2}o.o.zolotarev@donnasa.ru

Аннотация. В статье представлены результаты научного исследования, направленного на изучение вопроса по рациональному регулированию автомобильных силовых установок гибридного типа, содержащих ДВС и электрические машины. Авторами предложены частные и комплексные критерии для оценки эффективности рабочего процесса как на стационарных, так и в комплексе неустановившихся режимов работы гибридных силовых установок (ГСУ). Разработана соответствующая методика численного моделирования рабочего процесса. Составлены математические модели характеристик агрегатов, включая частичную скоростную характеристику ДВС, механические характеристики электрических машин и характеристику дифференциального распределителя. Предложена методика оптимизации режимных параметров ГСУ для заданного режима движения автомобильного транспортного средства (АТС). В качестве примера, для серийной ГСУ Р610 АТС Toyota Prius 2015 модельного года, проведена оценка эффективности рабочего процесса в заданных условиях движения: произведен расчет основных свойств, предложены рекомендуемые значения величин коэффициентов использования мощности каждого из двигателей, приведены рекомендации по выбору режимов работы ГСУ и её компонентов.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, критерий оптимизации, оптимизационные параметры, двигатель внутреннего сгорания, электрическая машина, численное моделирование, ездовой цикл.

Для цитирования: Савенков Н.В., Золотарев О.О. Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

Rational choice of operating parameters of an automobile hybrid power plant

Nikita V. Savenkov¹, Oleg O. Zolotarev²

^{1,2}Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA), Makeevka, Russia

^{1,2}o.o.zolotarev@donnasa.ru

Abstract. The article presents the results of a scientific study aimed at studying the issue of rational regulation of hybrid-type automobile power plants containing internal combustion engines and electric machines. The authors propose particular and complex criteria for evaluating the efficiency of the workflow, both in stationary and in a complex of transient modes of operation of hybrid power plants (HPP). A corresponding technique for numerical simulation of the working process has been developed. Mathematical models of the characteristics of the units are compiled, including the partial speed characteristic of the internal combustion engine, the mechanical characteristics of electrical machines and the characteristic of the differential distributor. A technique for optimizing the regime parameters of the HPP for a given mode of movement of an automobile vehicle is proposed. As an example, for a serial HPP P610 of Toyota Prius 2015 model year automobile vehicle, an assessment was made of the efficiency of the workflow under given driving conditions: the main properties were calculated, recommended values for the power utilization factors of each of the engines were proposed, recommendations were given for choosing the modes of the HPP and its components.

Keywords: hybrid car, hybrid power plant, optimization criterion, optimization parameters, internal combustion engine, electric machine, numerical simulation, driving cycle.

For citation: Savenkov N.V., Zolotarev O.O. Rational choice of operating parameters of an automobile hybrid power plant. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

Актуальность темы. В соответствии с регламентом безопасности колесных транспортных средств технического регламента таможенного союза (ТР ТС), гибридным транспортным средством (ГТС) является транспортное средство (ТС), имеющее не менее двух различных преобразователей энергии (двигателей) и двух различных (бортовых) систем аккумулирования энергии для целей приведения в движение ТС. При этом в качестве энергетической установки ГТС рассматривается совокупность двигателя внутреннего сгорания, электродвигателя, генератора (функции двигателя и генератора могут выполняться одной электромашиной), устройства аккумулирования энергии, электропреобразователей и системы управления [1].

Главное достоинство ГТС заключается в возможности движения как на электротяге, так и с помощью ДВС, включая их совместное использование. К примеру, для передвижения в городских условиях на относительно небольшие расстояния, более рационально использовать электроэнергию, запасенную в аккумуляторной батарее. При длительном движении либо в

случае режимов с повышенной развиваемой мощностью на ведущих колесах (например, интенсивный разгон), эксплуатация предпочтительнее с применением механической энергии ДВС [2].

Эффективная стратегия управления энергопотреблением и её производства необходима для повышения общей энергоэффективности работы силовой установки (СУ), с учетом меняющейся во времени нагрузки на движитель.

Цель исследования заключается в разработке метода рационального выбора режимных параметров ГСУ, обеспечивающего повышение топливной экономичности АТС, в заданном комплексе режимов движения.

Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих задач: выбор общего и частных критериев для оценки эффективности процесса движения, а также рабочего процесса ГСУ; определение оптимизационных параметров; создание математических моделей характеристик агрегатов СУ; разработка методики оптимизационного выбора рациональных режимных параметров; выбор в качестве примера параметров конкретного АТС и получение численных рекомендаций по снижению путевого расхода топлива.

В качестве общего критерия, позволяющего оценить эффективность эксплуатации АТС в эксплуатационных условиях с позиции топливной экономичности, выбрано интегральное количество (1) израсходованного топлива, A , г/цикл, за некоторый цикл движения при заданном потреблении электрической энергии, ΔE , Дж/цикл, например:

$$A = \left. \begin{array}{l} \int_0^{t_{\text{ц}}} G(t) dt \rightarrow \min \\ \Delta E \rightarrow 0 \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ц}}$ – общее время цикла движения АТС, с; $G(t)$ – функция часового расхода топлива ДВС от времени движения в цикле t , г/с.

Выбранный критерий A позволяет комплексно учитывать как топливно-экономические, так и тягово-скоростные эксплуатационные свойства автомобиля. При этом последние определяются заданным набором

режимов движения или для конкретного стандартизированного ездового цикла его операционной картой.

Выбор количества независимых параметров регулирования автомобильной СУ зависит от её конструкции, которую определяет компоновочная схема и, как следствие, количество степеней свободы в сочетании параметров управления агрегатами. Таким образом, для каждого нагрузочно-скоростного режима двигателя АТС, характеризующегося сочетанием определенной частоты вращения n_d и крутящего момента на ведущем колесе M_d существует множество сочетаний значений независимых параметров регулирования СУ, при которых возможно достижение идентичной пары M_d и n_d . Для расчета количества степеней свободы в сочетании параметров регулирования агрегатов СУ предложена зависимость

$$\zeta = n_{кп} + n_d - 1; \quad (2)$$

где ζ – количество независимых параметров регулирования; $n_{кп}$ – количество коробок передач (КП), рассчитывается отдельно для параллельно или последовательно работающих агрегатов, если между ними осуществляется отбор (возврат) механической мощности; n_d – количество двигателей.

В таблице 1 приведен пример расчета количества независимых параметров регулирования СУ для ТС с различными силовыми установками.

Таблица 1

Количество независимых параметров регулирования СУ

Модель АТС	Компоновка СУ	$n_{кп}$	n_d	ζ
-	Классическая * без КП	0	1	0
ГАЗ-33023	Классическая	1	1	1
КамАЗ 5410	Классическая, многоблочная КП	1**	1	1
Toyota Prius	ДВС, дифференциальный распределитель (ДР), две электрические машины	0	3	2
Lexus RX Hybrid	ДВС, ДР, три электрические машины	0	4	3
* ДВС-сцепление-КП-карданная передача-главная передача-двигатель; ** многоблочная КП учитывается как одна, т.к. несколько входных параметров регулирования в итоге формируют общее ПЧ.				

При решении поставленной многопараметрической задачи оптимизации методом прямого перебора при $\varsigma = 2$ и расчётном шаге 1% от диапазона возможных значений каждой независимой переменной, количество итераций, например, для элементарного участка ECE-15 продолжительностью 195 с. городского участка UDC Нового европейского ездового цикла NEDC, составит 100^{390} . Соответственно, данная задача является трансвычислительной, для её решения не хватит всей имеющейся в мире вычислительной мощности [3]. Таким образом, она требует разработки специальных подходов к решению.

На рисунке 1 представлена схема ГСУ Р610 АТС Toyota Prius 2015 модельного года, который выбран в качестве примера для выполнения исследования.

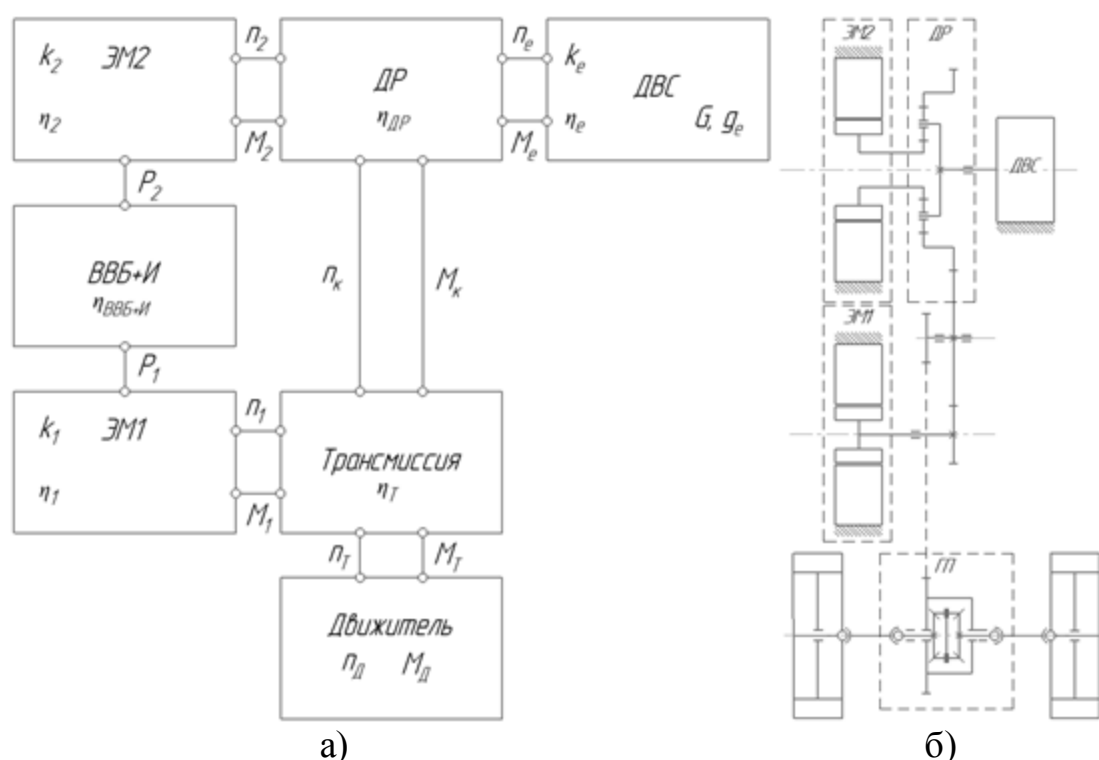


Рис. 1. Силовая установка автомобиля АТС Toyota Prius 2015 модельного года:
а) структурная схема кинематического силового и энергетического взаимодействия между элементами системы;
б) кинематическая структурная схема

На рисунке 1 показаны следующие обозначения: «ЭМ1» и «ЭМ2» – соответственно электрические машины 1 и 2 (мотор-генераторы); «ДР» – дифференциальный распределитель; «ВВБ+И» – высоковольтная батарея с инверторными устройствами; $n_1, n_2, n_e, n_d, n_k, n_T$ – обороты ЭМ1, ЭМ2, коленчатого вала ДВС, коронной шестерни ДР, выходного вала трансмиссии, $M_1, M_2, M_e, M_d, M_k, M_T$ – соответственно крутящий момент на роторе ЭМ1, ЭМ2, коленчатом валу ДВС, коронной шестерне ДР, выходном валу трансмиссии; k_1, k_2, k_e – соответственно коэффициенты использования мощности ЭМ1, ЭМ2 и ДВС; $\eta_1, \eta_2, \eta_e, \eta_{DR}, \eta_T$ – соответственно КПД ЭМ1, ЭМ2, ДВС, ДР, трансмиссии; G, g_e – соответственно часовой и удельный расходы топлива ДВС; P_1, P_2 – соответственно электрические мощности (потребляемые или генерируемые) ЭМ1 и ЭМ2.

На основании таблицы 1 и рисунка 1, в качестве независимых оптимизационных параметров определены: коэффициент использования мощности ЭМ1 k_1 и относительная частота вращения коленчатого вала ДВС s ($s = n_e/n_N$, где n_N – номинальная частота вращения коленчатого вала).

Соответственно, все остальные параметры и показатели, показанные на рисунке 1, для конкретного нагрузочно-скоростного режима работы ГСУ (режима движения автомобиля), характеризующегося сочетанием M_d и n_d , будут являться функциями от параметров k_1 и s .

Известно множество методик и подходов к математическому описанию частичных скоростных характеристик (ЧСХ) автомобильных ДВС, в т.ч. с учетом неустановившихся режимов работы. Наиболее достоверным является применение кусочно-гладких функций (в т.ч. сплайнов) для аппроксимации данных. На начальном этапе исследования для описания функции эффективных показателей ЧСХ ДВС применяются относительно простые традиционные функции Лейдермана и Шлиппе – формулы (3) и (4).

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

$$g_e = g_{eN} \cdot (a_u - b_u \cdot k + c_u \cdot k^2) \cdot \left[\beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right) + \beta_2 \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 \right], \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) применяются следующие значения полиномиальных коэффициентов: $a=0,258$; $b=2,121$; $c=-1,379$; $a_u=2,75$; $b_u=4,61$; $c_u=2,86$; $b_0=1,2$; $b_1=-1,2$; $b_2=1$.

На рисунке 2 показана соответствующая многопараметрическая диаграмма для ДВС Toyota 2ZR-FXE.

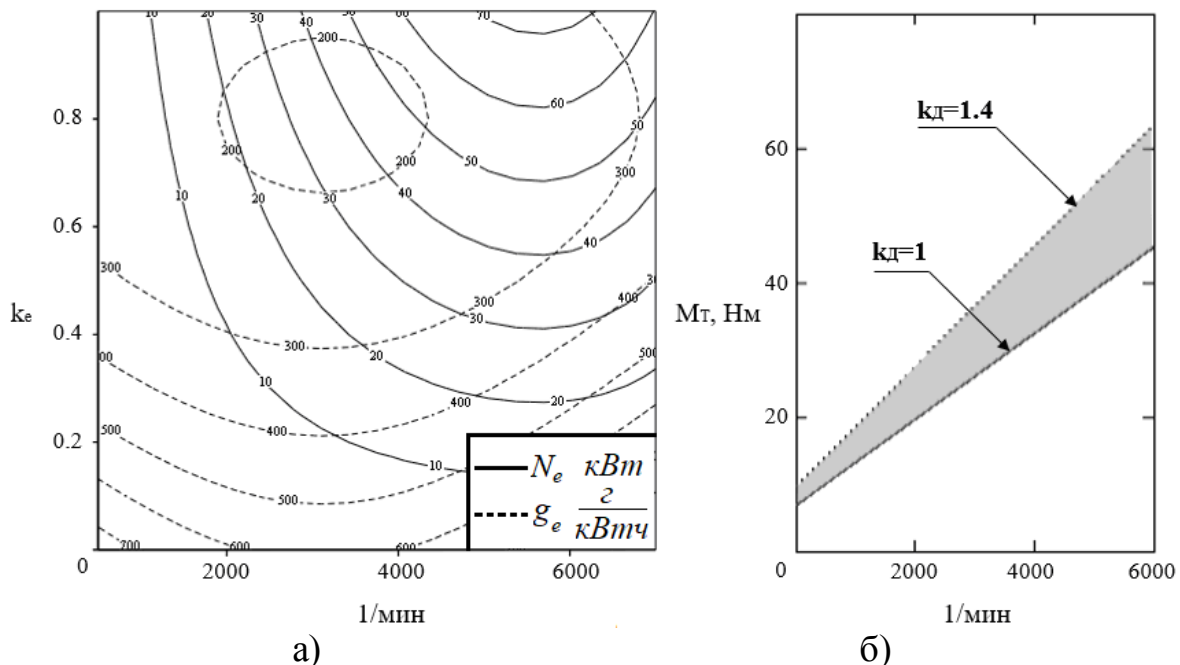


Рис. 2. Характеристики ДВС Toyota 2ZR-FXE: а) ЧСХ; б) режим ПХХ

В процессе движения АТС на коленчатом валу ДВС могут возникать не только положительные значения крутящего момента, но и отрицательные – в этот момент агрегат работает в режиме принудительного холостого хода (ПХХ). Для определения соответствующего момента сопротивления применяется зависимость (5).

$$M_T = \frac{V_h \cdot k_d \cdot (X + Y \cdot S \cdot \frac{n_i}{30000}) \cdot 9550}{30 \cdot \tau}, \quad (5)$$

где M_T – момент сопротивления на коленчатом валу (КВ) в режиме ПХХ, Нм;
 V_h – рабочий объём ДВС, л (1,797 л); τ – тактность работы двигателя; k_d – коэффициент дросселирования; X, Y – коэффициенты, зависящие от типа ДВС и его системы питания, а также от конфигурации КШМ ($X=0,049$; $Y=0,0152$); S – ход поршня, мм (88.4 мм); n – частота вращения коленчатого вала ДВС, 1/мин [4].

С целью математического моделирования механических характеристик вентильно-индукторных машин (ВИМ) и характеристик их КПД применены соответствующие зависимости (6) и (7), учитывающие типоразмер ЭМ и другие их параметры, приведенные в таблице 2 [5].

Таблица 2

Технические характеристики электрических машин ГСУ

Параметры и показатели	Значения (ЭМ1/ЭМ2)
Рабочее напряжение, В	600
Максимальная мощность, кВт	23 / 53
Максимальный крутящий момент, Нм:	40 / 163
Максимальная частота вращения ротора, 1/мин	17000

$$M_{e2}(w) = k_{em} \cdot (a + b \cdot w + c \cdot w^2 + d \cdot w^3 + e \cdot w^4); \quad (6)$$

где w – относительная частота вращения ротора ЭМ (отношение текущей частоты n к номинальной n_N); $a=693,72$; $b=-669,01$; $c=275,64221$; $d=-41,316$; $e=-0,038321$, – полиномиальные коэффициенты, зависящие от типа электрической машины; k_{em} – масштабный коэффициент ЭМ.

$$\eta_2(k, w) = (1 + \frac{1}{p_0 + 1} \cdot (\frac{1}{\eta_N} - 1) \cdot \frac{p_0 \cdot w^2 + k^2}{k \cdot w})^{-1}, \quad (7)$$

где p_0 – относительные постоянные потери мощности в частотно-регулируемом синхронном двигателе ($p_0 = 0,12$); η_N – КПД ЭД на номинальном режиме ($\eta_N = 0,9$).

Для ВИМ ЭМ1 и ЭМ2 на рисунке 3 приведены механические и нагрузочно-скоростные характеристики КПД в двигательном режиме.

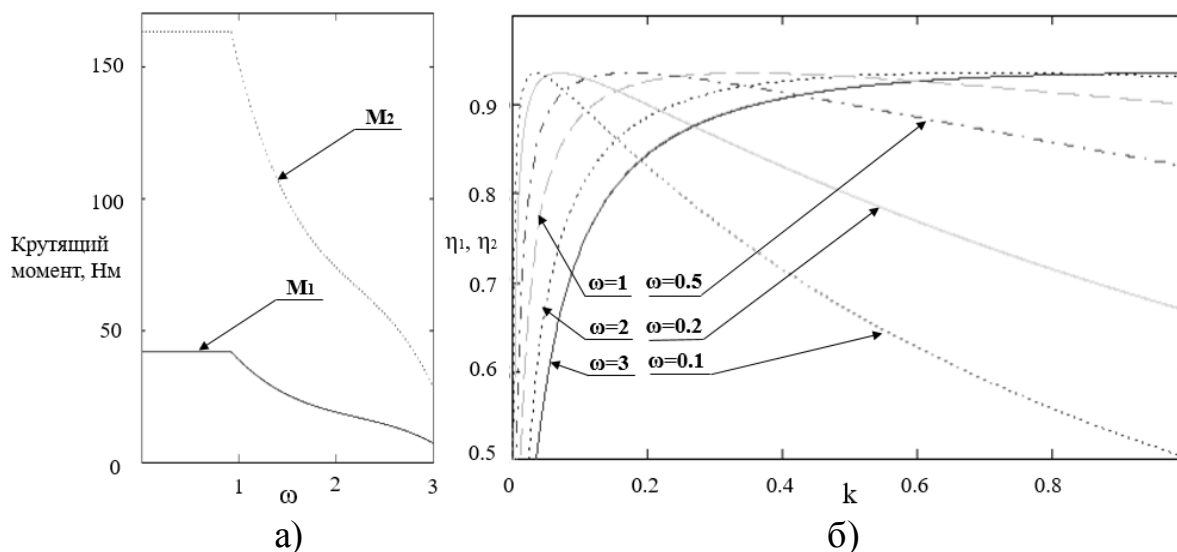


Рис. 3. Характеристики электрических машин ГСУ в двигательном режиме: а) механическая; б) КПД

Рассматривая ДР (рис. 1), связывающий ДВС и ЭМ2 с остальной трансмиссией, его возможно описать как цилиндрическую планетарную передачу, с силовым передаточным числом (ПЧ) U_{Π} - от ЭМ2 к ДВС ($U_{\Pi}=r_e/r_2=(r_2+r_c)/r_2$, где r_e – расстояние от оси сателлита до оси планетарного редуктора; r_c – делительный радиус сателлита; r_2 - делительный радиус солнечной шестерни).

Крутящие моменты агрегатов и выходного звена (коронной шестерни) ДР, вне зависимости от режима работы этих агрегатов, связаны силовыми соотношениями:

$$M_2 = \frac{M_e}{2 \cdot U_{\Pi}}; \quad M_e = \frac{M_K}{1 - \frac{1}{2 \cdot U_{\Pi}}}, \quad (8)$$

где M_2 – крутящий момент на роторе ЭМ2, Нм; M_e - крутящий момент на КВ ДВС, Нм; M_K – крутящий момент на коронной шестерне ДР, Нм.

Ввиду наличия степени свободы в сочетании параметров регулирования, соответствующие звенья ДР связаны кинематическим соотношением (9), которое в виде поля значений частот вращения выходного звена, 1/мин, (коронной шестерни) ДР показано на рисунке 4, (в скобках

показана скорость движения АТС, м/с). Возможные варианты режимов работы агрегатов приведены в таблице 3.

$$n_2 = U_{\Pi} \cdot [2n_e \cdot -n_{\text{кор}} \cdot \left(2 - \frac{1}{U_{\Pi}}\right)]; \quad (9)$$

Таблица 3

Режимы работы агрегатов ГСУ, определяемые ДР

Индекс режима	Режим ДВС	Режим ЭМ2	Вращение ЭМ2*	Контур на рис. 4	Штриховка на рис. 4
А	двигательный	двигательный	левое	1-2-3-4	круг
В	двигательный	генераторный	правое	1-5-6-7-2	квадрат
С**	двигательный	двигательный	правое	5-8-6	ромб
Д**	неподвижен	двигательный	правое	9-10	-
Е	неподвижен	двигательный	левое	9-11	-
F	тормозной	генераторный	левое	2-3-11-9	треугольник
G	неподвижен	генераторный	левое	9-11	-

* со стороны ДВС (правое – совпадает с ДВС; левое – противоположно);
 ** задний ход.

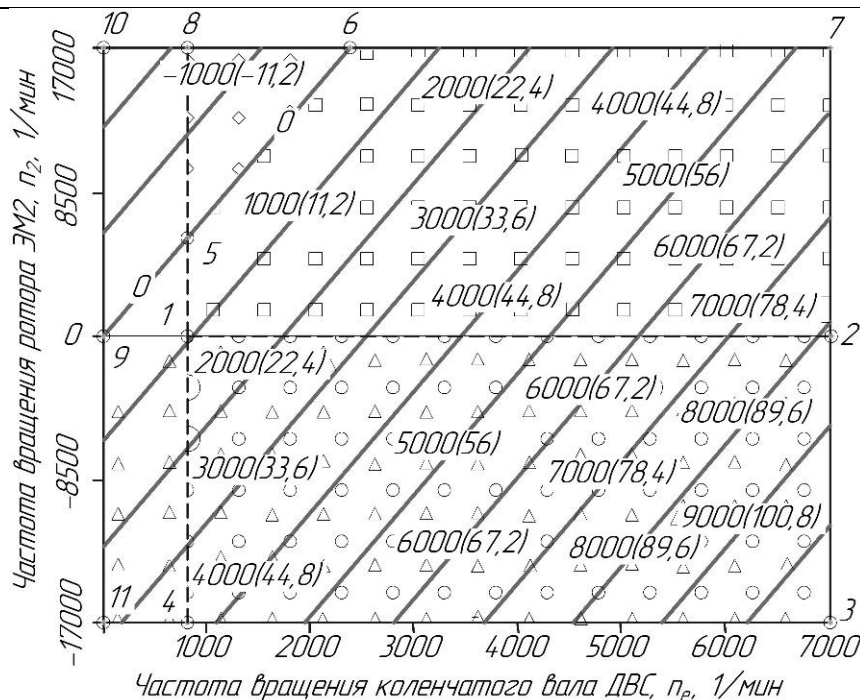


Рис. 4. Частоты вращения агрегатов, подключенных к ДР (для $U_{\Pi}=3,6$)

Кинематические и силовые соотношения в трансмиссии ГСУ:

$$n_{\text{кор}} = n_{\text{д}} \cdot U_{\text{КК}}; \quad n_1 = n_{\text{д}} \cdot U_{\text{ЭМ1-К}}; \quad M_{\text{К}} = \frac{M_{\text{д}} - M_1 \cdot \eta_{1-\text{К}} \cdot U_{\text{ЭМ1-К}}}{U_{\text{КК}} \cdot \eta_{\text{КК}}}; \quad (10)$$

где n_1 – частота вращения ротора ЭМ1; U_{KK} – ПЧ от коронной шестерни ДР к ведущим колёсам ($U_{KK}=2,83$); $U_{ЭМ1-К}$ – ПЧ от ЭМ1 к ведущим колёсам ($U_{ЭМ1-К}=2,83$); $\eta_{1-К}$ – КПД трансмиссии от ЭМ1 к ведущим колёсам ($\eta_{1-К}=0,95$); η_{KK} – КПД трансмиссии от коронной шестерни ДР к ведущим колёсам ($\eta_{KK} = 0,98$).

Ввиду наличия двух степеней свободы в сочетании параметров регулирования ГСУ, для каждой режимной точки, характеризующейся сочетанием M_d и n_d , существует определенный диапазон сочетаний этих параметров регулирования: k_1 и s . При этом каждое из сочетаний должно обеспечивать баланс механической мощности в трансмиссии для обеспечения движения с заданными M_d и n_d , а также баланс электрической энергии на ВВБ.

И в то же время с качественной стороны (по степени влияния на энергетическую эффективность рабочего процесса) каждое из возможных сочетаний k_1 и s характеризуется: величиной часового расхода топлива ДВС, G , г/с; суммарной электрической мощностью ВВБ, P , кВт ($P = P_1 + P_2$).

В работе предлагается диаграмма баланса электрической мощности на ВВБ, $P=f(k_1, s)$ и часового расхода топлива ДВС, $G=f(k_1, s)$. При этом i -е количество таких диаграмм (для каждого возможного сочетания M_d и n_d в процессе работы ГСУ, движения АТС) формирует выходную характеристику ГСУ. Для этой характеристики показатели, определяющие эффективность на каждом режиме, будут функциями: $P=f(M_d, n_d, k_1, s)$, $G=f(M_d, n_d, k_1, s)$.

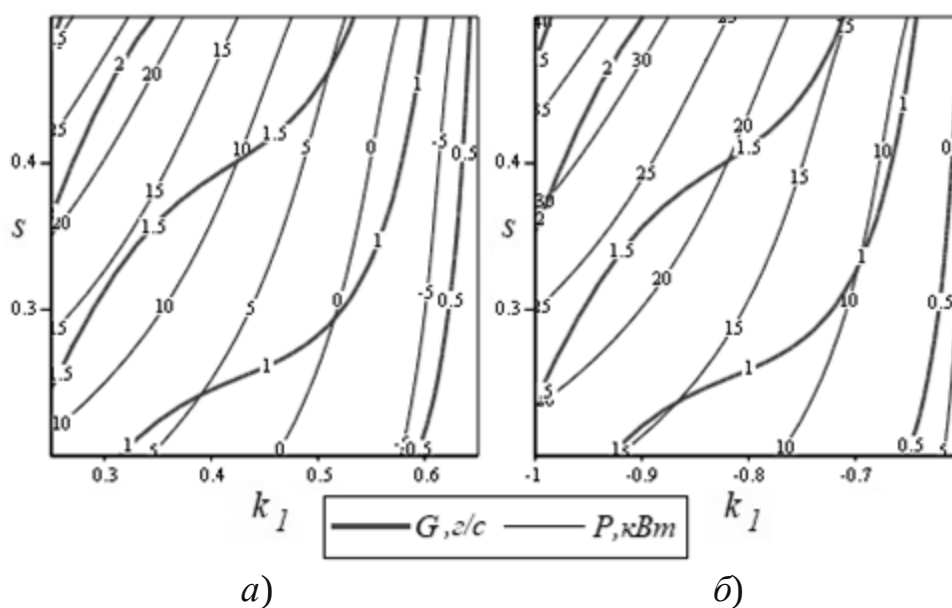
Для рассматриваемых ГСУ, имеющих $\varsigma > 2$, справедливо следующее: $P=f(M_d, n_d, k_1, s, \dots)$, $G=f(M_d, n_d, k_1, s, \dots)$. Таким образом, данные функции являются частными критериями для оценки эффективности работы ГСУ любой конфигурации на конкретном нагрузочно-скоростном режиме. При этом значения P могут принимать как отрицательное значение (разрядка), так и положительные (зарядка).

На рисунке 5 (а, б) для рассматриваемого АТС Toyota Prius представлены диаграммы $P=f(k_1, s)$ и $G=f(k_1, s)$ для выбранных в качестве

примера двух режимов движения: 1) тяговый режим, на ведущих колесах развивается положительная мощность $N_d = 5,9$ кВт, скорость движения АТС $V = 3,1$ м/с ($M_d = 575$ Нм, $n_d = 98$ мин⁻¹); 2) тормозной режим ($N_d = -5$ кВт, $V = 3,1$ м/с).

При рассмотрении диаграмм (рис. 5 а, б) становится очевидным, что в отдельных областях возможна как зарядка ВВБ ($P > 0$), так и её разрядка ($P < 0$); причем каждому значению P могут соответствовать различные значения G . Таким образом, для каждой диаграммы, обусловленной сочетанием N_d и V существует некоторая оптимальная функция регулирования, при которой каждому возможному значению P соответствует минимальная величина G . Эти функции для рассматриваемых в качестве примера режимов показаны на рис. 5 в, г (рассчитаны по разработанному авторами алгоритму в программной среде компьютерной алгебры Mathcad) и аналогичным образом могут быть получены для всех сочетаний N_d и V с целью рационального выбора параметров k_1 и s .

В таблице 4 приведены рекомендуемые частные критерии для оценки эффективности работы ГСУ на одном конкретном режиме.



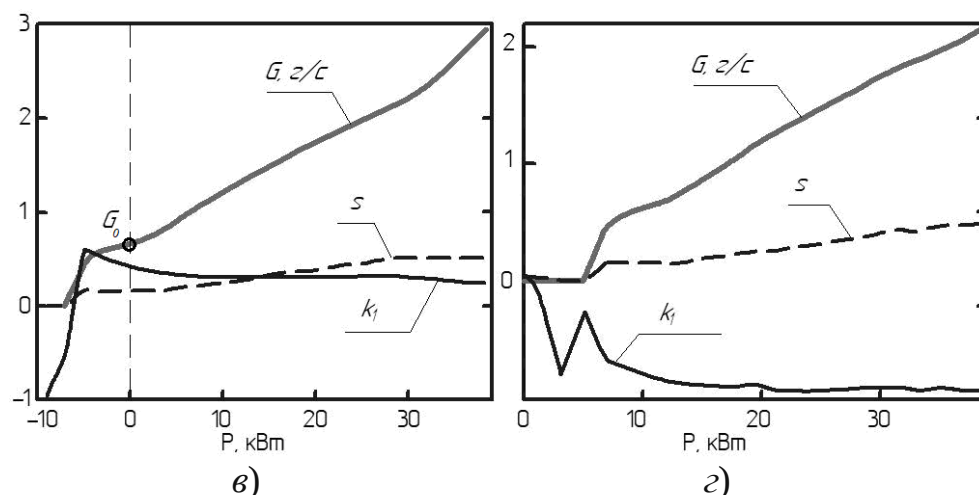


Рис. 5. Выходная характеристика ГСУ для двух режимов:

- а) диаграмма G и P для всех возможных сочетаний k_1 и s на режиме ($N_d = 5,9 \text{ кВт}$, $V = 3,1 \text{ м/с}$);
 б) диаграмма G и P для всех возможных сочетаний k_1 и s на режиме ($N_d = -5 \text{ кВт}$, $V = 3,1 \text{ м/с}$);
 в) оптимизированная по G выходная характеристика ГСУ на режиме ($N_d = 5,9 \text{ кВт}$, $V = 3,1 \text{ м/с}$);
 г) оптимизированная по G выходная характеристика ГСУ на режиме ($N_d = -5 \text{ кВт}$, $V = 3,1 \text{ м/с}$)

Критерий η_p представляет собой общий КПД процессов преобразования в механическую работу химической энергии топлива и электрической энергии из ВВБ. Его применение вместо G может быть оправдано в случае сравнительно низкого тягового КПД электрической (ких) машин на конкретном нагрузочно-скоростном режиме. Критерий L позволяет оценить эффективность зарядки ВВБ.

Таблица 4

Рекомендации по выбору частных критериев в зависимости от режима движения АТС

Режим движения АТС (Режим работы ГСУ)	Режимы работы агрегатов ГСУ	Частный Критерий	Комплексный частный критерий
Тяговый, $V > 0$, $N_d > 0$	Двигательный режим ДВС, разряд ВВБ	$G \rightarrow \min$	$\eta_p \rightarrow \max$
	Двигательный режим ДВС, заряд ВВБ	$G \rightarrow \min$	$L \rightarrow \max$
	ДВС отключен, разряд ВВБ (режим электромобиля)	$P \rightarrow \min$	$\eta_p \rightarrow \max$
	Двигательный режим ДВС, ЭМ отключены	$G \rightarrow \min$	-
Тормозной, $V > 0$, $N_d < 0$	ДВС в режиме ПХХ, заряд ВВБ (рекуперация)	$P \rightarrow \max$	-
	ДВС отключен, заряд ВВБ (рекуперация)	$P \rightarrow \max$	-
	Двигательный режим ДВС, заряд ВВБ (рекуперация)	$G \rightarrow \min$	$L \rightarrow \max$
Неподвижное состояние, $V = 0$, $N_d = 0$	Двигательный режим ДВС, заряд ВВБ	$G \rightarrow \min$	$L \rightarrow \max$

$\eta_p = N_d / (N_Q - P)$, где N_Q – тепловая мощность $N_Q = N_e / \eta_e$, где η_e – эффективный КПД ДВС; $L = P / (G - G_0)$, кДж/г

На рисунке 6 приведены результаты численного моделирования процесса движения в условиях элементарного фрагмента ECE-15 городского участка UDC Нового европейского ездового цикла NEDC [6].

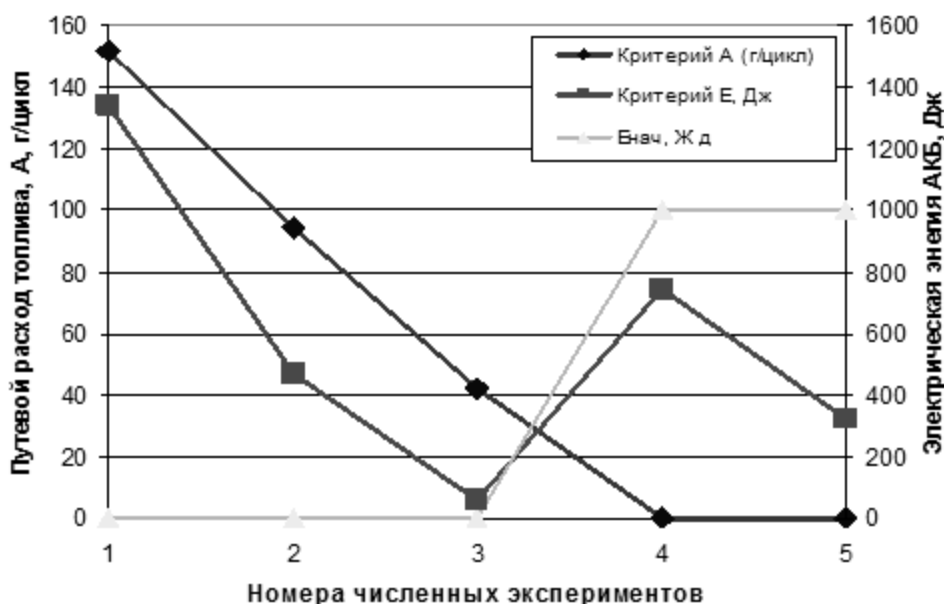


Рис. 6. Результаты численного моделирования процесса движения ATC в условиях фрагмента ECE-15

На рисунке 6 эксперимент №1 (произвольный выбор для каждой режимной точки цикла пары k_1 и s) – общий критерий получился равен $A = 152$ г/цикл (14,9 л/100 км), нулевой начальный уровень заряда ВВБ ($E_{нач} = 0$ Дж), без ограничений на ΔE ($\Delta E = 1342$ Дж/цикл); эксперимент №2 – k_1 и s в каждой точке цикла выбраны по частному критерию $G \rightarrow \min$, общий критерий получился равен $A = 94,5$ г/цикл (9,25 л/100 км), нулевой начальный уровень заряда ВВБ ($E_{нач} = 0$ Дж), без ограничений на ΔE ($\Delta E = 470$ Дж/цикл); эксперимент №3 – k_1 и s в каждой точке цикла выбраны по частному критерию $G \rightarrow \min$, общий критерий получился равен $A = 42,3$ г/цикл (4,14 л/100 км), нулевой начальный уровень заряда ВВБ ($E_{нач} = 0$ Дж), $\Delta E \rightarrow 0$ ($\Delta E = 56$ Дж/цикл); эксперимент №4 – k_1 и s в каждой точке цикла выбраны по частному критерию $G \rightarrow \min$, общий критерий получился равен $A = 0$ г/цикл (0 л/100 км), без ограничений на начальный уровень заряда ВВБ

($E_{\text{нач}} = 1$ кДж), $\Delta E = 742$ Дж/цикл); эксперимент №4 – k_1 и s в каждой точке цикла выбраны по частному критерию $\eta_p \rightarrow \max$, общий критерий получился равен $A = 0$ г/цикл (0 л/100 км), без ограничений на начальный уровень заряда ВВБ ($E_{\text{нач}} = 1$ кДж), $\Delta E = 322$ Дж/цикл).

Вывод

Предложенный в работе подход обеспечивает эффективное, с позиции энергетической эффективности, совместное и отдельное использование электрических машин и ДВС в составе ГСУ. Результаты показывают значительную зависимость общего критерия оптимизации от выбранных режимов движения.

В исследовании выбран общий (путевой расход топлива в условиях ездового цикла, A , г/цикл при затраченной электрической энергии ВВБ, ΔE , Дж/цикл) и предложены частные критерии оценивания эффективности работы ГСУ на конкретном нагрузочно-скоростном режиме (часовой расход топлива ДВС, G , г/с; текущее значение электрической мощности, P , кВт, а также комплексные частные критерии η_p и L); определены оптимизационные режимные параметры ГСУ – k_1 и s ; созданы математические модели характеристик агрегатов ГСУ; разработана методика оптимизационного выбора рациональных режимных параметров; получены предварительные численные рекомендации по повышению эффективности эксплуатации элементов ГСУ на примере АТС Toyota Prius. Установлено, что в зависимости от законов изменения k_1 и s общие критерии могут изменяться в достаточно широких пределах – например, расход топлива в 2,23 раза; а при движении только за счёт электротяги – расход электрической энергии в 2,3 раза.

Список источников

1. Технический регламент таможенного союза 018/2011 – О безопасности колесных транспортных средств [Электронный ресурс] /Комиссия Таможенного союза. Москва. 2011 – 465 с. – URL: <http://mintest->

russia.ru/upload/iblock/2ae/2ae58fb3b93d447793015ad1d7038ad2.pdf (дата обращения: 01.02.2023).

2. Савенков, Н.В. Место гибридного автомобиля в современном мире / Н.В. Савенков, О.О. Золотарев // Строитель Донбасса. – 2022. – № 1(18). – С. 22-31.
3. Klir George J. Facets of systems science [Text] / Klir George J. — Springer New York, 1991. — P. 121–128 – ISBN 978-0-3064-3959-9
4. ДРОМ: Информационный портал: Двигатель 2ZR-FXE технические характеристики [Электронный ресурс]/ – Обновляется в течение суток. – URL: <https://www.drom.ru/catalog/toyota/engine/2-zr-fxe/> (дата обращения: 01.02.2023).
5. 2016 - 2022 Prius, Prius Prime Transaxle - P610 Deep Dive (P710, P810 Similar) [Видеозапись] / John D. Kelly; Weber State University Computer & Automotive Engineering Building – Загл. с титул. экрана. – Видео вышло 31 мая 2017 г. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=-dHeRJdrnI8> – Изображение (движущееся; трехмерное).
6. Соглашение о принятии единообразных технических предписаний для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях взаимного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний Добавление 100: Правила № 101 Пересмотр 3 .Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, приводимых в движение только двигателем внутреннего сгорания либо приводимых в движение гибридным электроприводом, в отношении измерения объема выбросов двуокиси углерода и расхода топлива и/или измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге, а также транспортных средств категорий M1 и N1, приводимых в движение только электроприводом, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге [Электронный ресурс]/ ООН//URL:<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3r.pdf> (дата обращения: 01.02.2023).

References

1. URL: <http://mintest-russia.ru/upload/iblock/2ae/2ae58fb3b93d447793015ad1d7038ad2.pdf>
2. Savenkov N.V., Zolotarev O.O. *Stroitel' Donbassa*, 2022, no 1(18), pp. 22-31.
3. Klir George J. *Facets of systems science*. Springer New York, 1991. pp. 121–128.
4. URL: <https://www.drom.ru/catalog/toyota/engine/2-zr-fxe/>
5. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=-dHeRJdrnI8>
6. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3r.pdf>

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Рецензент: М.Г. Шатров, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Савенков Никита Владимирович, канд. техн. наук, доц., ДонНАСА.

Золотарев Олег Олегович, ассистент, ДонНАСА.

Information about the authors

Savenkov Nikita V., Ph.D., associate professor, DonNACEA.

Zolotarev Oleg O., assistant, DonNACEA.

Статья поступила в редакцию 02.03.2023; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 23.03.2023.

The article was submitted 02.03.2023; approved after reviewing 06.03.2023; accepted for publication 23.03.2023.