

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ АТС КАТЕГОРИИ N₃ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Никита Владимирович Савенков¹, Олег Олегович Золотарев², Максим Сергеевич Трубников³

^{1,2,3} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

¹ n.v.savenkov@donnasa.ru, ² o.o.zolotarev@donnasa.ru, ³ trubnikov.m.s-aah-26b@donnasa.ru

Аннотация. Выполнено исследование энергетической эффективности применения в конструкции автомобиля категории N₃ гибридной силовой установки. В качестве базового шасси выбран автомобиль КамАЗ 53212, который рассматривается в оснащении простейшей гибридной силовой установкой параллельного типа, содержащей одну электрическую машину, размещенную между двигателем внутреннего сгорания и коробкой передач, и имеющую возможность работы как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Движение рассмотрено в соответствии с условиями магистрального цикла на дороге для грузовых автомобилей по ГОСТ Р 54810-2011. В ходе исследования получена рациональная стратегия управления агрегатами рассматриваемой гибридной силовой установки на основе предложенного оценочного критерия энергетической эффективности процесса движения и разработанной авторами соответствующей расчетной методики с элементами оптимизации.

Ключевые слова: автотранспортное средство, двигатель внутреннего сгорания, электрическая машина, гибридная силовая установка, ездовой цикл, оценочный критерий, оптимизация, математическая модель

Для цитирования: Савенков Н. В., Золотарев О. О., Трубников М. С. Исследование эффективности применения в конструкции АТС категории N₃ гибридной силовой установки // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. Выпуск 2024-6(170) Технология, организация, механизация и геодезическое обеспечение строительства. С. 47–57. doi: 10.71536/vd.2024.6c170.6. edn: jhmfze.

Original article

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE HYBRID POWER PLANT IN THE DESIGN OF N₃ CATEGORY VEHICLE

Nikita V. Savenkov¹, Oleg O. Zolotarev², Maksim S. Trubnikov³

^{1,2,3} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia

¹ n.v.savenkov@donnasa.ru, ² o.o.zolotarev@donnasa.ru, ³ trubnikov.m.s-aah-26b@donnasa.ru

Abstract. The energy efficiency of using a hybrid power plant in the design of an N₃ vehicle was investigated in the article. The KamAZ 53212 model vehicle was selected for research as an example. The vehicle is considered to be equipped with the simplest parallel hybrid power plant, which contains one electric machine between the internal combustion engine and the gearbox. The electric machine has two operating modes: engine mode and generator mode. The process of movement of the selected vehicle is considered in the conditions of the main driving cycle on the road for trucks in accordance with GOST R 54810-2011 standard. A rational management strategy for the hybrid power plant units was obtained as a result of the study. For this purpose, the authors proposed an evaluation criterion for the energy efficiency of the movement process and developed an appropriate computational optimization technique.

Keywords: motor vehicle, internal combustion engine, electric motor, hybrid power plant, driving cycle, evaluation criterion, optimization, mathematical model

© Савенков Н. В., Золотарев О. О., Трубников М. С., 2024



For citation: Savenkov N. V., Zolotarev O. O., Trubnikov M. S. Investigation of the effectiveness of the hybrid power plant in the design of N_3 category vehicle. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Technology, organization, mechanization and geodetic support of construction.* 2024;6(170):47–57. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2024.6c170.6. edn: jhmfze.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Задача экономии ресурсов планеты является всегда актуальной. На долю автомобильного транспорта приходится значительная часть потребления энергии, в том числе в виде углеводородного топлива, и, соответственно, доля выбросов вредных веществ с отработавшими газами от автомобильного транспорта также велика.

Одним из направлений решения этой проблемы является задача совершенствования эффективности технологий преобразования химической энергии моторного топлива в механическую работу на движителях автотранспортных средств (АТС). Данное направление интенсивно развивается на протяжении всей истории автомобилестроения, реализация его основных этапов заключалась в повышении эффективности термодинамического цикла ДВС, установке устройств очистки и нейтрализации отработанных газов, внедрении многоступенчатых и бесступенчатых трансмиссий, оснащении силовых установок накопителями энергии. Последние позволяют запасать, а затем возвращать (рекуперировать) в трансмиссию избыточную механическую энергию и являются отличительной конструкционной особенностью гибридных автомобилей [1]. Совместно с совершенствованием технологий преобразования энергии на автомобильном транспорте развиваются и успешно применяются методы оптимизации и рационального выбора параметров соответствующих технических систем. Это позволяет более полно использовать содержащийся в них потенциал.

В настоящее время большинство производимых и эксплуатируемых автомобилей, оснащенных гибридными силовыми установками (ГСУ), включающими ДВС и электромеханический привод, приходится на категорию M_1 [2].

Очевидно, это объясняется бóльшим влиянием одного кВт мощности электрической машины и одного кВт·ч ёмкости батареи на относительное улучшение топливно-экономических и тягово-скоростных эксплуатационных свойств АТС указанной выше категории. С увеличением полной массы автомобиля, его энерговооруженность, как правило, снижается, среднеэксплуатационное значение коэффициента использования мощности ДВС возрастает, а значит, в общем случае, совместно с применением многоступенчатой трансмиссии, увеличивается и его средний эффективный КПД. Данный факт оставляет меньше резервов для повышения топливной экономичности за счет дополнительных гибридных систем и снижает их потенциал применения. Для того, чтобы повысить эффективность применения ГСУ в конструкции более тяжелых автомобилей, резонно увеличивать долю мощности электрических машин и ёмкость аккумуляторов не только пропорционально росту полной массы автомобиля, но и пропорционально уменьшению показателя энерговооруженности. Это, в свою очередь, влечет относительно большее удорожание производства таких автомобилей.

Однако, в различные периоды времени автомобили категории N_3 , оснащенные гибридными силовыми установками, создаются и серийно выпускаются.

Например, с 1974 по 1986 год в Советском Союзе серийно производился карьерный самосвал БелАЗ 549, оснащенный электромеханической трансмиссией. Данный тип силовой установки может быть отнесен к гибридной силовой установке последовательного типа.

Модельный ряд Шведской фирмы «Scania AB» содержит автомобили категории N_3 , оснащенные гибридной силовой установкой. Например, Scania L320 и Scania P320 в модификациях HEV (без возможности зарядки высоковольтной батареи от внешнего источника) и PHEV (с возможностью такой зарядки) оснащаются традиционным ДВС и электромеханической трансмиссией модели GE 281, содержащей две электрические машины и автоматическую коробку передач Scania Opticruise [3].

В Российской Федерации ПАО «КАМАЗ» разработан перспективный автомобиль категории N_3 КамАЗ 54907, который оснащен коробкой передач с гибридным модулем.

Таким образом, задачи разработки, внедрения и рационального управления агрегатами гибридных силовых установок являются актуальными для автомобилей различных категорий.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Широкое распространение АТС с ГСУ началось относительно недавно. Соответственно, разработка и совершенствование оптимизационных методик выбора их параметров является актуальной задачей для мировой и отечественной практики проектирования и эксплуатации средств транспорта [4, 5, 6]. Данные методики более сложны по отношению к подходам, применяемым для работы с традиционными силовыми установками АТС [7]. Это обусловлено наличием нескольких источников и потребителей механической мощности, её дифференциальных преобразователей и т.д., что обуславливает наличие дополнительных степеней свободы в сочетании параметров регулирования силовыми установками рассматриваемого типа [7].

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе технических характеристик и экспериментальных данных для агрегатов гибридной силовой установки автомобиля категории N_3 разработать алгоритм рационального регулирования её агрегатов, обеспечивающий достижение наименьшего путевого расхода топлива в эксплуатационных условиях на примере стандартизированного ездового цикла.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В качестве примера для выполнения исследования выбран автомобиль категории N_3 , состоящий из базового шасси КамАЗ 53212 и гибридной силовой установки, компоновочная схема которой показана на рис. 1.

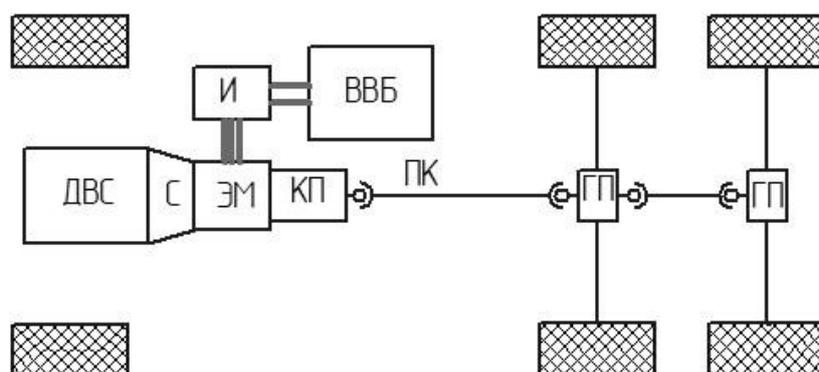


Рисунок 1 – Компоновочная схема силовой установки на базе автомобиля КамАЗ 53212: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; С – муфта сцепления; ЭМ – электрическая машина (мотор-генератор); КП – коробка передач; ПК – передача карданная; ГП – главная передача; И – электрический инвертор; ВВБ – тяговая высоковольтная батарея.

Компоновка силовой установки классическая, обусловлена колесной формулой 6x4 автомобиля-прототипа: двигатель расположен спереди продольно, привод на среднюю и заднюю оси. В составе силовой установки применяется электрическая машина, которая может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Ротор электрической машины установлен жестко на первичный вал коробки передач. Соответственно, гибридная силовая установка является параллельной. Процесс движения автомобиля может осуществляться, как только от ДВС, так и только от электрической машины (при этом муфта сцепления отключается), включая их совместное использование. Дополнительным преимуществом выбранной компоновочной схемы, кроме ее относительной простоты, является возможность зарядки высоковольтной батареи от ДВС при неподвижном автомобиле (при включенном сцеплении и нейтральной передаче в КП). Вопрос рационального выбора величины электрической емкости высоковольтной батареи в настоящем исследовании не рассматривался. Данная величина принята в соответствии с электрической трансмиссией автомобиля-аналога Scania GE281 – 90 кВт·ч. Основные параметры шасси приведены в таблице 1.

В Российской Федерации для расчетов параметров циклов автотранспортных средств принят ГОСТ Р 54810-2011 [9]. Исследуемые в данной работе грузовые автомобили относятся к категории N_3 . Для таких автомобилей принято движение в магистральном цикле на дороге (рис. 2).

Таблица 1 – Параметры шасси автомобиля КамАЗ 53212

Показатели и параметры	Обознач.	Ед. измер.	Значения
Испытательная масса АТС	m_a	кг	18 150
Передаточные числа КП	$U_{КП(m)}$	–	Основная: 7,82; 4,03; 2,5; 1,53; 1, делитель: 0,815.
Передаточное число (ПЧ) главной передачи	$U_{Г}$	–	5,43
КПД трансмиссии	$\eta_{Г}$	–	0,84
Фактор обтекаемости	W	кг/м	5,06
Радиус ведущего колеса	$r_{к}$	м	0,476

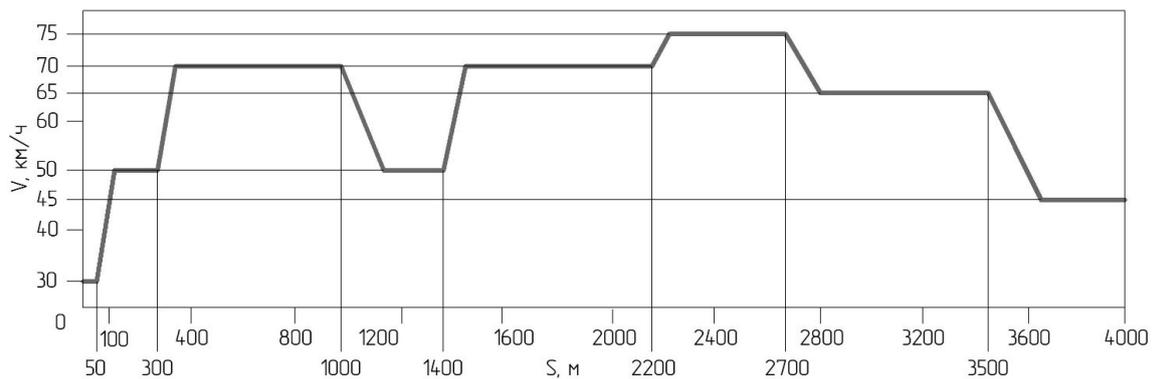


Рисунок 2 – Схема магистрального цикла на дороге для грузовых автомобилей категории N_3 .

В ГОСТ Р 54810-2011, как и в ранее введенном ГОСТ 20306-90, не установлено время движения на отдельных участках ездового цикла, а также отсутствуют жесткие требования к выбору номеров включенных передач. Соответственно, расчеты движения АТС по этому циклу являются в значительной мере ориентировочными, поскольку стандартом также не регламентированы значения их ускорений и замедлений. Это позволяет варьировать ускорениями и замедлениями, а также предусматривать возможность оценки других вариантов движения с целью оптимизации какого-либо из его параметров. При этом в качестве целевой функции критерия, кроме расхода топлива в ездовом цикле, становится возможным принимать и другие – время движения, среднюю скорость и т. д. [10]. В настоящем исследовании принят такой вариант рассматриваемого ездового цикла, который характеризуется минимальными значениями ускорений. Соответствующая зависимость скорости V от времени движения t показана на рис. 3 и получена с помощью выражений:

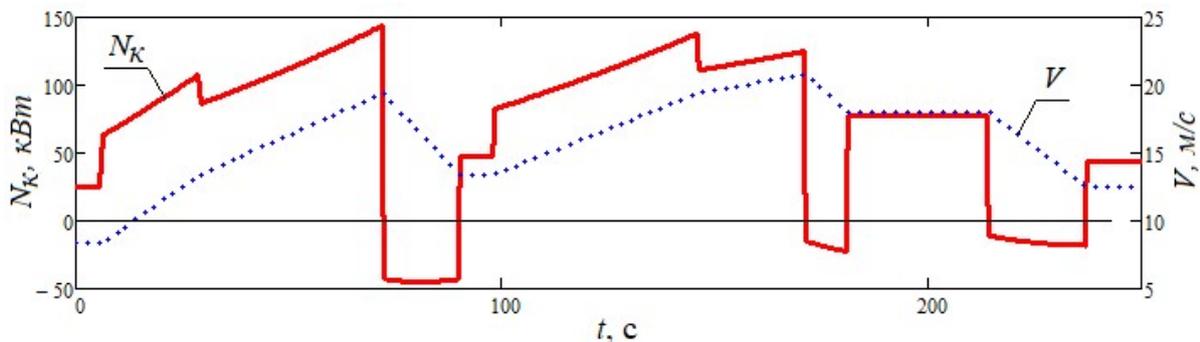


Рисунок 3 – Вариант магистрального цикла на дороге для грузовых автомобилей категории N_3 с минимальными величинами ускорений.

$$t_o = \frac{S_K - S_H}{[0.5(V_K - V_H) + V_H]}; \quad (1)$$

$$j_o = \frac{V_K - V_H}{t_o}, \quad (2)$$

где t_o – продолжительность операции,
 S_H и S_K – отметки пути в начале и в конце операции соответственно,
 V_H и V_K – скорости в начале и в конце операции соответственно.

Операционная карта ездового цикла приведена в таблице 2. Функция мощности на ведущих колесах $N_k = f(t)$, требуемая для движения автомобиля в условиях принятого ездового цикла получена на основе уравнения мощностного баланса по данным таблицы 1 и также показана на рис. 3.

Таблица 2 – Операционная карта

Данные ГОСТ Р 54810-2011			Выбранный вариант ездового цикла		
Номер операции	Отметка пути, S, м	Последовательность операций	Ускорение, j, м/с ²	Время операции, t, с	Номера элементарных участков, m
1–3	0–50	V = 30 км/ч	0	6	1
4	50–300	Разгон до 50 км/ч и движение с этой скоростью до отметки 300 м	0,22	23	2–24
5	300–1000	Разгон до 70 км/ч и движение с этой скоростью до отметки 1 000 м	0,14	43	25–67
6	1 000–1 300	Замедление двигателем до 50 км/ч и движение с этой скоростью до отметки 1 300 м	–0,333	18	68–85
7	1 300–1 400	V = 50 км/ч	0	8	86
8	1 400–2 200	Разгон до 70 км/ч и движение с этой скоростью до отметки 2 200 м	0,125	48	87–134
9	2 200–2 700	Разгон до 75 км/ч и движение с этой скоростью до отметки 2 700 м	0,056	25	135–159
10	2 700–2 900	Замедление двигателем до 65 км/ч	–0,274	10	160–169
11	2 900–3 500	V = 65 км/ч	0	33	170
12	3 500–3 850	Замедление двигателем до 45 км/ч	–0,242	23	171–193
13–15	3 850–4 000	V = 45 км/ч	0	13	194
				Общее время, с	250

В настоящем исследовании применены реальные характеристики ДВС КамАЗ 740 [11], приведенные в таблицах 2 и 3. Соответствующие математические модели получены путем аппроксимации приведенных в таблицах данных кусочно-заданными функциями кубического сплайна [12]: $N_e = f(n, k)$, $g_e = f(n, k)$, где k – коэффициент использования мощности в долях от максимально возможной при текущей частоте вращения коленчатого вала n . Результаты в виде универсальной характеристики ДВС [13, 14] показаны в таблице 4 и на рис. 4.

Таблица 3 – Развиваемая эффективная мощность по внешней скоростной характеристике

n , мин ⁻¹	950	1 300	1 700	2 100	2 500	2 600
N_e , кВт	60	90	118	136	152	154

Таблица 4 – Эффективный удельный расход топлива по частичной скоростной характеристике

n	1 000	1 400	1 800	2 200
k	$g_e, \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$			
1	231	227	234	238
0,8	222	220	227	232
0,6	228	224	235	246
0,4	247	256	269	303
0,2	279	306	364	401

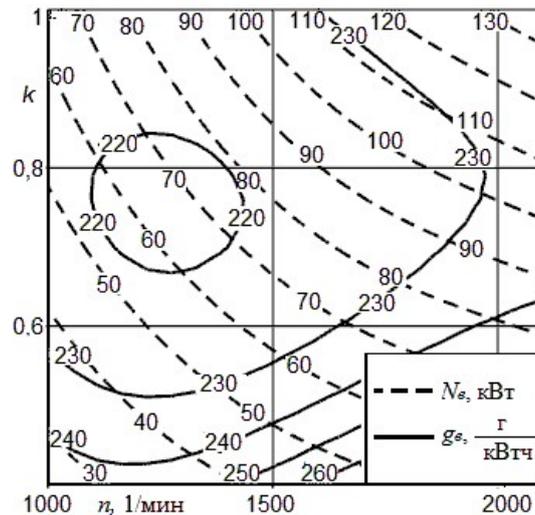


Рисунок 4 – Универсальная характеристика ДВС КамАЗ-740.10.

В работе применены следующие характеристики ЭМ:

– механическая характеристика [15]:

$$M_1(n_1, k_1) = K_{Т1} \cdot k_1 \cdot \left[a_1 + b_1 \left(\frac{n_1}{n_{N1}} \right) + c_1 \left(\frac{n_1}{n_{N1}} \right)^2 + d_1 \left(\frac{n_1}{n_{N1}} \right)^3 + e_1 \left(\frac{n_1}{n_{N1}} \right)^4 \right], \text{ [При } |n_1| \geq |n_{N1}|]; \quad (3)$$

– характеристика КПД [16]:

$$\eta_1(n_1, k_1) = \left[1 + \frac{1}{p_{01} + 1} \left(\frac{1}{\eta_{N1}} - 1 \right) \frac{p_{01} \left(\frac{|n_1|}{n_{N1}} \right)^2 + |k_1|^2}{|k_1| \cdot \left(\frac{|n_1|}{n_{N1}} \right)} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Приведенные зависимости в графическом виде показаны на рис. 5, их параметры приведены в таблице 5. При разработке математических моделей принято допущение – характеристики электрической машины в двигательном и генераторном режимах являются «зеркальными».

Электрическая мощность, отдаваемая ВВБ при работе ЭМ в режиме двигателя:

$$P = N_1 / (\eta_1 \eta_{И} \sqrt{\eta_{Б}}), \quad (5)$$

где N_1 – механическая мощность, развиваемая на валу ЭМ,
 η_1 – КПД электрической машины (4),
 $\eta_{И}$ – КПД инвертора,
 $\eta_{Б}$ – КПД ВВБ.

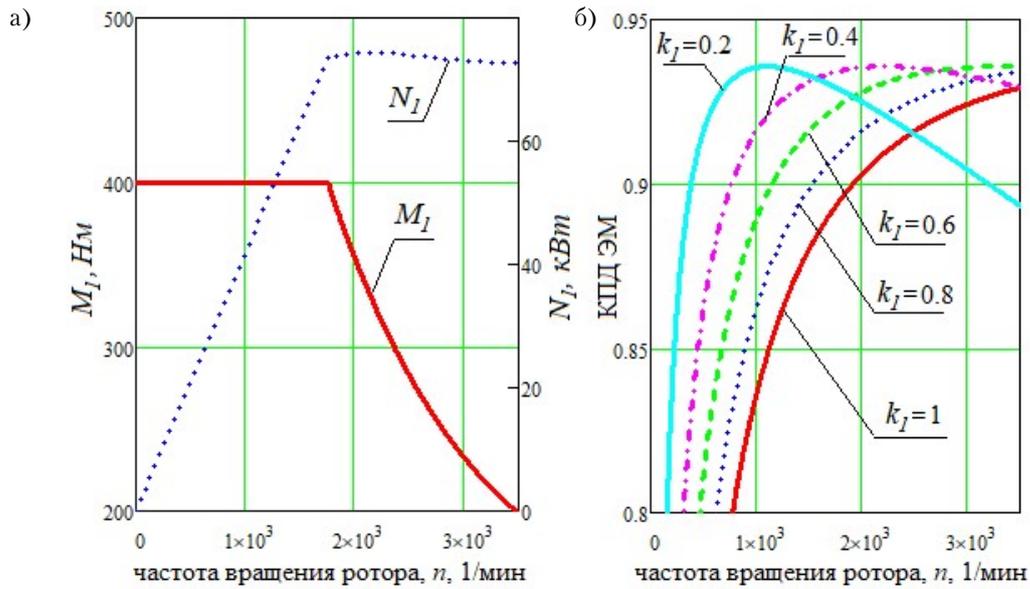


Рисунок 5 – Характеристики электрической машины: а) механическая характеристика в двигательном режиме при полной нагрузке ($k_T = 1$); б) характеристика КПД.

Таблица 5 – Параметры математических моделей характеристик ЭМ

Показатели и параметры	Обозначения	Ед. измер.	Значения
Максимальный крутящий момент ($0 \leq n_1 < n_{N1} $)	$M_1(n_{N1}, 1)$	Нм	400
Номинальная частота вращения	n_{N1}	1/мин	1920*
Коэффициент подобия (З)	K_{T1}	–	1,4235
Полиномиальные коэффициенты (З)	a_1, b_1, c_1, d_1, e_1	–	693,7, -669, 275,6, -41,32, -0,038
Относительная мощность потерь	p_{01}	–	0,12
КПД на номинальном режиме	η_{N1}	–	0,9
КПД инвертора	η_I	–	0,9

При работе электрической машины в режиме генератора выражение для определения электрической мощности на высоковольтной батарее приобретает вид:

$$P = N_1 \eta_I \eta_{II} \sqrt{\eta_B}. \quad (6)$$

В исследовании параметры η_{II} и η_B в качестве допущения приняты постоянными и численно равными: $\eta_{II} = 0,9$ и $\eta_B = 0,9$ [17].

Принятые при расчётах диапазоны возможных значений режимных параметров агрегатов ГСУ приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Диапазоны возможных значений режимных параметров агрегатов ГСУ

k	n	k_1	n_1	$U_{КП(м)}$
$-1 \dots 1^*$	$n_{\min} \dots n_N^{**}$	$-1 \dots 1$	$0 \dots n_{\max 1}$	7,82; 4,03; 2,5; 1,53
* – отрицательные значения k определяют возможный режим работы ДВС – принудительный холостой ход; n_{\min}, n_N – минимально устойчивая и номинальная частоты вращения коленчатого вала ДВС.				

Для рассматриваемого в исследовании автомобиля кинематическая и силовая составляющие параметров энергосилового потока в ГСУ определены на основе известных соотношений и представлены системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} [M_e(n, k) + M_1(n_1, k_1)] U_{КП(m)} U_{Г} \cdot \eta_T = M_K \\ 0,105 n_1 r_K / (U_{КП(m)} U_{Г}) = V \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Погрешность в расчете обуславливается точностью определения радиуса качения ведущего колеса r_K и КПД трансмиссии η_T при различных режимах работы.

При отрицательных значениях M_e и M_1 данные агрегаты механическую мощность поглощают – реализуется работа ДВС в режиме принудительного холостого хода, а электрической машины в генераторном режиме. При $M_K < 0$ автомобиль движется в режиме торможения. Если при этом осуществляется поглощение мощности агрегатами силовой установки ($M_1 < 0$ и (или) $M_e < 0$), то КПД в уравнении (7) возводится в степень «-1» (т. к. меняется направление передачи энергии).

При заданных значениях момента на ведущем колесе M_K ($M_K = 10^3 \cdot r_K \cdot N_K / V$) и скорости движения автомобиля V (например, для некоторой точки выбранного ездового цикла), уравнение моментов (верхнее) содержит три неизвестных: коэффициент использования мощности ДВС k , коэффициент использования мощности ЭМ k_1 и текущее передаточное число КП $U_{КП(m)}$ (оставшиеся режимные параметры – частоты вращения n и n_1 , являются функциями от скорости V , ПЧ $U_{КП(m)}$ и коэффициента буксования сцепления); кинематическое уравнение (нижнее) содержит одну неизвестную – $U_{КП(m)}$.

Таким образом, для рассматриваемого случая общее количество неизвестных системы двух уравнений (7) составляет три: k , k_1 и $U_{КП(m)}$. Следовательно, имеет место неопределенность, так как такая система имеет множество вариантов решения. На разработку стратегий рационального управления агрегатами ГСУ в рамках рассмотренной неопределенности направлен ряд известных исследований [4–8].

В настоящей работе для этой цели выбран оценочный критерий энергетической эффективности процесса движения АТС с ГСУ (8) и применена предложенная авторами ранее соответствующая методика рационального выбора искомых значений режимных параметров [7] по выбранному критерию.

$$\left. \begin{aligned} A = \int_0^{t_{II}} G(t) dt \cong \sum_1^m G_m \cdot t_m = \sum_1^m A_m \rightarrow \min \\ \Delta E = \int_0^{t_{II}} P(t) dt \cong \sum_1^m P_m \cdot t_m = \sum_1^m Q_m = B \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где A – количество израсходованного топлива в некотором цикле движения, г/цикл;
 t_{II} – общее время движения АТС в условиях цикла, с;
 $G(t)$ – функция текущего расхода топлива ДВС от времени движения в цикле t , г/с
 $(G = g_c \cdot N_c / 3\ 600)$;
 $P(t)$ – функция электрической мощности на высоковольтной батарее (ВВБ), кВт, от времени движения в цикле t ;
 B – разница запасённой в ВВБ электрической энергии между концом и началом цикла движения, кДж.

Для уменьшения количества расчетных точек по ездовому циклу в работе принято допущение, в соответствии с которым, при движении АТС на установившемся режиме агрегаты его ГСУ также работают на установившихся режимах [18]. Это позволило сократить количество расчетных точек до 194 (правый столбец таблицы 2). Таким образом, если для каждого элементарного участка m задана его продолжительность t_m , с, а также известны текущий расход топлива ДВС G_m , г/с, и электрическая мощность на ВВБ P_m , кВт, то возможно рассчитать суммарные величины израсходованного топлива на этом участке A_m , г/участок, и затраченной (или возвращенной) электрической энергии ВВБ Q_m , кДж/участок. Далее суммированием по всем участкам m вычисляются составляющие критерия (8): A и B .

В настоящем исследовании задача определения значений G_m и P_m для каждой режимной точки m решается в два этапа.

Этап первый – оптимизация по частному критерию G_m . В рамках каждой режимной точки m перебираются и сравниваются все возможные сочетания G_m и P_m с целью исключить нереализуемые их сочетания (которые влекут нарушение указанных в таблице 6 ограничений или невозможность решения уравнений системы (7)) и отобрать из оставшихся наиболее эффективные, при которых каждому значению P_m будет соответствовать минимально возможное значение G_m . Полученная зависимость названа оптимизированной выходной характеристикой ГСУ и в качестве примера приведена на рис. 6 для элементарного участка № 194 (таблица 2, $m = 194$). Такой характеристикой будет обладать ГСУ при регулировании её агрегатов

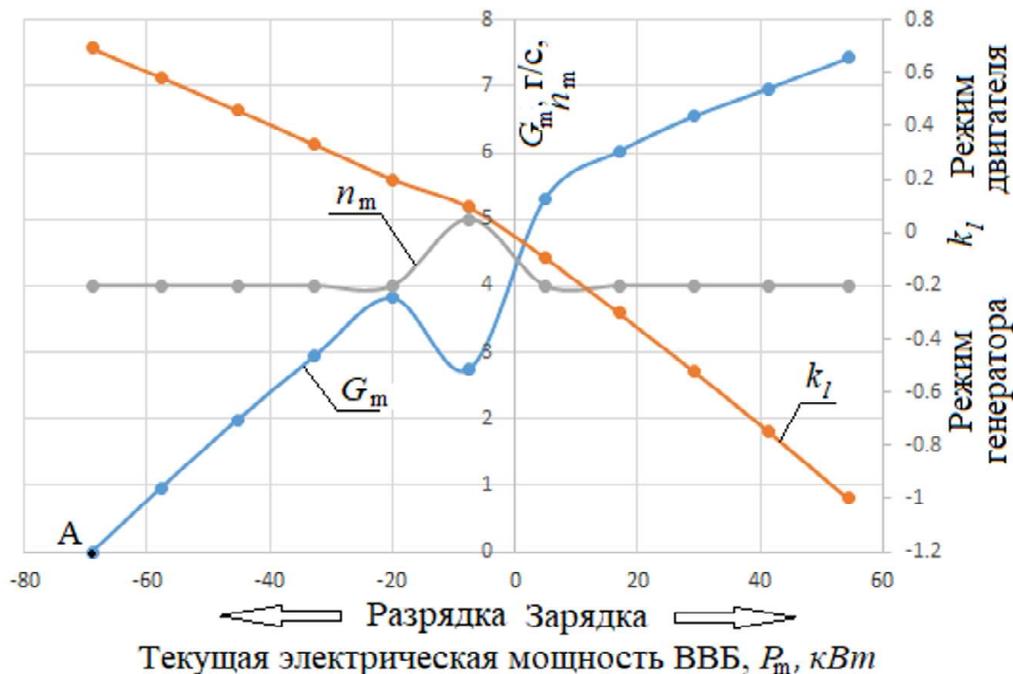


Рисунок 6 – Оптимизированная выходная характеристика ГСУ для режима движения АТС при $N_k = 43,3$ кВт и $V = 12,5$ м/с (элементарный участок № 194).

в соответствии с полученными зависимостями $n_m = f(P_m)$, где n_m – порядковый номер включенной в КП передачи, и $k_1 = f(P_m)$. При этом соответствующие значения оставшегося третьего неизвестного k системы (7) могут быть выражены из её верхнего уравнения. Точка «А» на характеристике соответствует наиболее эффективному режиму полного электромобиля, ДВС при этом остановлен, ВВБ разряжается. При $P_m = 0$ имеет место нулевой баланс электрической энергии, $k_1 = 0$, ротор ЭМ вращается без нагрузки. При $P_m > 0$ ВВБ заряжается, с увеличением P_m расход топлива G_m возрастает.

Второй этап – оптимизация по общему критерию (8). Параметрами являются значения Q_m в рамках m -го количества оптимизированных выходных характеристик для условий выбранного ездового цикла. Для выполнения оптимизационного поиска авторами на языке VBA составлена программа эволюционной многопараметрической оптимизации со следующими параметрами: максимальное время перебора 10^3 с, число итераций 10^5 , сходимость 10^{-5} , скорость изменения 0,075, размер совокупности 100, случайное начальное значение 0, максимальное время без улучшения 10^3 с. Результаты работы программы при заданном $V = 0$ приведены на рис. 7. Отрицательные значения Q_m соответствуют работе ЭМ в режиме двигателя, а положительные – в режиме генератора. Минимизированное значение A при этом составило 1 207,65 г/цикл

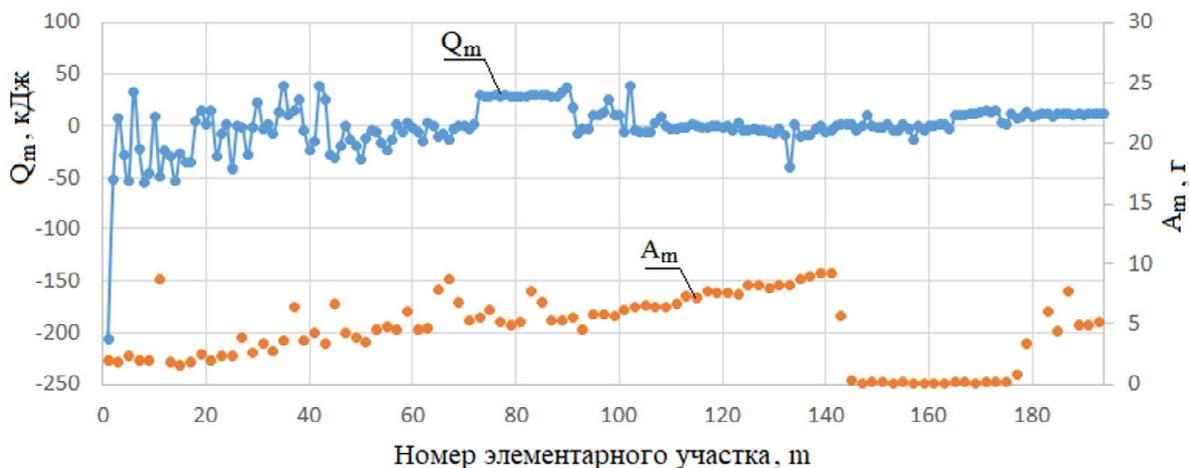


Рисунок 7 – Результаты оптимизационного расчёта.

(30,19 кг/100 км). Соответствующие функции режимных параметров агрегатов ГСУ ($n, n_1, k, k_1, U_{\text{КП}(m)}$) могут быть выражены из оптимизированных выходных характеристик для каждого участка m , а также из уравнений системы (7).

ВЫВОД

По результатам выполненного исследования для выбранной компоновочной схемы гибридного автомобиля, в качестве базового шасси которого выбран автомобиль КамАЗ 53212, снижение путевого расхода топлива по данным численного моделирования процесса движения в условиях магистрального ездового цикла по ГОСТ Р 54810-2011 по отношению к серийному автомобилю составило 8,63 %. Достигнутая относительная экономия топлива является значительно меньшей, чем для автомобилей категории M_1 , гибридные модификации которых позволяют уменьшить путевой расход в среднем на 35...40 %.

Дальнейшие направления по снижению расхода топлива автомобиля категории N_3 , оснащенного ГСУ, очевидно и безальтернативно могут быть выбраны следующими: применение другой компоновочной схемы – с планетарным механизмом (например, как на автомобилях Toyota Prius, Chevrolet Volt и т. д.), применение нескольких электрических машин – двух и более, повышение мощности электрических машин.

Кроме улучшения показателей топливной экономичности, применение электрических машин в составе силовой установки (а в особенности с увеличением количества ведущих осей) позволяет повысить и тягово-скоростные эксплуатационные свойства автомобиля.

Предложенная авторами и рассмотренная в статье методика позволяет выполнять рациональный выбор режимных параметров автомобильных гибридных силовых установок с любым количеством ДВС и электрических машин, а также с любой конфигурацией трансмиссии. В этом случае все режимные параметры (сколько бы их не было) будут связаны между собой через показатель P_m в рамках оптимизированных выходных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О безопасности колесных транспортных средств (ТР ТС 018/2011) : Технический регламент таможенного союза : утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 г. № 877. – 465 с. – URL: <http://mintest-russia.ru/upload/iblock/2ae/2ae58fb3b93d447793015ad1d7038ad2.pdf> (дата обращения: 01.02.2023). – Текст : электронный.
2. Тимерханов, А. Парк электрокаров и гибридов в России / А. Тимерханов. – Текст : электронный // Автостат : аналитическое агентство : [сайт]. – 2023. – 8 сентября. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/55588/?ysclid=m1pfglwqq4866676383>.
3. Ефимкин, А. Гибридные грузовики Scania пошли в серию / А. Ефимкин. – Текст : электронный // Движок : про автомобили в деталях : [сайт]. – 2021. – 13 декабря. – URL: <https://dvizhok.ru/komtrans/gibridnyie-gruzoviki-scania-poshli-v-seriyu?ysclid=m27w3m71mg917047302>.
4. An on-line predictive energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles to counter the uncertain prediction of the driving cycle / Z. Chen, R. Xiong, C. Wang, J. Cao. – Текст : непосредственный // Applied Energy. – 2017. – Volume 185 (2). – P. 1663–1672.
5. A robust co-state predictive model for energy management of plug-in hybrid electric bus / H. Guo, B. Liang, H. Guo, K. Zhang. – Текст : непосредственный // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Volume 250 (3). – 119478. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119478.
6. Zhang, B. Receding horizon optimal control of HEVs with onboard prediction of driver's power demand / B. Zhang, F. G. Xu, T. L. Shen. – Текст : непосредственный // IET Intelligent Transport Systems. – 2020. – Volume 14 (12). – P. 1534–1545.
7. Савенков, Н. В. Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки / Н. В. Савенков, О. О. Золотарев. – Текст : непосредственный // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 1(35). – EDN: WYDHJS.
8. East, S. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: convex optimization algorithms for model predictive control / S. East, M. Cannon. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2020. – Volume 28 (6). – P. 2191–2203.
9. ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1178-ст : введен впервые : дата введения 2012-09-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ"». – Москва : Стандартинформ, 2012. – 23 с. – Текст : непосредственный.
10. Горожанкин, С. А. Оптимизация движения автобусов категории M_3 на основе загородных ездовых циклов / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков. – Текст : непосредственный // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2021. – № 3(134). – С. 86–98. – DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_86. – EDN: VIILBE.

11. Диваков, Н. В. Методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Теория автомобиля» для студентов специальности 0513, специализация «Автомобили» / Н. В. Диваков, Б. Ф. Юдаков, В. Ю. Лепешев. – Москва : МАМИ, 1981. – 37 с. – Текст : непосредственный.
12. Горожанкин, С. А. Методики для аппроксимации зависимостей нескольких переменных в программной среде MS Excel и Mathcad / С. А. Горожанкин, А. А. Шитов, Н. В. Савенков. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2016. – № 3(247). – С. 35–47. – DOI: 10.5862/JCSTCS.247.4. – EDN: WZRGKT.
13. Володин, А. И. Локомотивные двигатели внутреннего сгорания / А. И. Володин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1990. – 256 с. – Текст : непосредственный.
14. Двигатели внутреннего сгорания (тепловозные дизели и газотурбинные установки) / А. Э. Симсон, А. З. Хомич, А. А. Куриц [и др.]. – Москва : Транспорт, 1980. – 384 с. – Текст : непосредственный.
15. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 350 с. – Текст : непосредственный.
16. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский. – Текст : непосредственный // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Том 61, № 4. – С. 287–298.
17. Тихомиров, В. А. Компьютерный анализ КПД преобразовательных устройств / В. А. Тихомиров, Е. В. Бычков. – Текст : непосредственный // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 1(13). – С. 93–108. – DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_93. – EDN: DDFXGH.
18. Горожанкин, С. А. Исследование энергетической эффективности рабочего процесса гибридной силовой установки автомобиля при установившемся движении / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков, О. О. Золотарев. – Текст : непосредственный // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2024. – № 2 (145). – С. 90–101. – EDN: BNXVMC.

Информация об авторе

Савенков Никита Владимирович – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: комплексная оптимизация режимных и конструкционных параметров силовых установок автотранспортных средств.

Золотарев Олег Олегович – старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: рациональное регулирование автомобильными гибридными силовыми установками.

Трубников Максим Сергеевич – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: топливная экономичность гибридных автотранспортных средств категории N₃ в условиях ездовых циклов.

Information about the author

Savenkov Nikita V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: comprehensive optimization of operational and structural parameters of power plants of motor vehicles.

Zolotarev Oleg O. – Senior Lecturer, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: rational regulation of automotive hybrid power plants.

Trubnikov Maksim S. – master's student, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fuel efficiency of hybrid vehicles of category N₃ in driving cycles.

Статья поступила в редакцию 31.10.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 29.11.2024.

The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 22.11.2024; accepted for publication 29.11.2024.