

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЯ КАТЕГОРИИ M_1 С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОЛЕС ЗАДНЕЙ ОСИ

Олег Олегович Золотарев

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,
o.o.zolotarev@donnasa.ru, ORCID: 0000-0002-8631-390X*

Аннотация. Выполнено исследование энергетической эффективности применения в конструкции автомобиля категории M_1 гибридной силовой установки. В качестве базового шасси выбран автомобиль производства АО «АвтоВАЗ» «LADA Granta», который рассматривался в оснащении гибридной силовой установкой параллельного типа, содержащей одну электрическую машину с приводом на заднюю ось. В качестве примера рассмотрено движения автомобиля в условиях магистрального участка EUDC Нового европейского ездового цикла NEDC по Правилу ЕЭК ООН № 101. Предложены: критерий энергетической эффективности процесса движения, определены оптимизационные параметры, разработана методика поиска рациональной стратегии регулирования агрегатов гибридной силовой установки в заданном ездовом цикле. Установлено, что принятая компоновочная схема в рассматриваемом цикле обеспечивает возможность снижения путевого расхода топлива на 15,3 % по отношению к серийному автомобилю.

Ключевые слова: автомобиль, двигатель внутреннего сгорания, гибридная силовая установка, ездовой цикл, расход топлива, оптимизация, критерий оптимизации, параметры оптимизации

Для цитирования: Золотарев О. О. Исследование расхода топлива автомобиля категории M_1 с дополнительным электроприводом колес задней оси // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.* 2025. Выпуск 2025-4(174) Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли. С. 63–72. doi: 10.71536/vd.2025.4c174.8. edn: tsbuyi.

Original article

STUDY OF FUEL CONSUMPTION OF A VEHICLE OF CATEGORY M_1 WITH ADDITIONAL ELECTRIC DRIVE OF THE REAR AXLE WHEELS

Oleg O. Zolotarev

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,
o.o.zolotarev@donnasa.ru, ORCID: 0000-0002-8631-390X*

Abstract. A study on the energy efficiency of implementing a hybrid powertrain in a category M_1 vehicle has been studied. The LADA Granta vehicle, produced by JSC «AVTOVAZ», was selected as the base chassis. It was considered to be equipped with a parallel-type hybrid power plant containing one electric machine with a drive to the rear axle. As an example, the vehicle's motion under the Extra-Urban Driving Cycle (EUDC) segment of the New European Driving Cycle (NEDC), according to UNECE Regulation No. 101, was analyzed. The study proposed: a criterion for the energy efficiency of the motion process, an approach for selecting optimization parameters, and a methodology for determining a rational control strategy for the hybrid powertrain components within the given driving cycle. It was established that the proposed layout configuration under the considered conditions enables a reduction in travel fuel consumption by 15,3 % compared to the base series-production vehicle.

Keywords: automobile, internal combustion engine, hybrid power plant, driving cycle, fuel consumption, optimization, optimization criterion, optimization parameters



For citation: Zolotarev O. O. Study of fuel consumption of a vehicle of category M₁ with additional electric drive of the rear axle wheels. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific and technical achievements of students of the construction and architectural industry*. 2025;4(174):63–72. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2025.4c174.8. edn: tsbuyi.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду существенных расстояний между населенными пунктами, а также невысокой плотностью размещения станций для зарядки полных электромобилей, эксплуатация в РФ автотранспортных средств, оснащенных гибридными силовыми установками (ГСУ), является оправданной и позволяет их гибко использовать в качестве альтернативы традиционным автомобилям с ДВС, а также полным электромобилям [1]. Автомобили с ГСУ сочетают в себе преимущества автотранспортных средств перечисленных типов. Вместе с тем, из-за большего количества компонентов, они являются более дорогими и нуждаются в сравнительно более сложной системе управления силовыми агрегатами, что обусловлено наличием нескольких цепочек передачи энергии.

Известно, что эффективность применения ГСУ на автомобиле определяется рядом факторов, в числе которых: выбранная компоновочная схема силовой установки, характеристики агрегатов, реализуемая стратегия управления, масса автомобиля, его режимы движения и т. д. [2].

Применение многокомпонентных ГСУ с развитой структурой обуславливает возможность более полного использования имеющихся резервов повышения энергетической эффективности силовой установки. Это сопряжено с повышением стоимости автомобиля и необходимостью разработки сложных алгоритмов управления, что требует решения многопараметрических задач оптимизации с большой вычислительной сложностью [3; 4]. Противоположный подход, заключающийся в применении более простых ГСУ, имеющих, как правило, одну электрической машины относительно невысокой мощности, например, связанную с коленчатым валом ДВС (мягкий гибрид), характеризуется сравнительно невысокой эффективностью и позволяет получить лишь некоторые из преимуществ автомобилей с ГСУ. Таким образом, выбор рациональной компоновочной схемы ГСУ зависит от комплекса факторов. Одним из наиболее важных является энергетическая эффективность.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследование энергетической эффективности различных схем автомобильных ГСУ в различных условиях эксплуатации выполнено в работах Г. О. Котиева, С. В. Бахмутова, В. В. Селифонова, Е. Е. Баулиной, С. Б. Аджиманбетова, Н. М. Филькина, 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, С. Zhang, A. Vahidi, Z. Chen, R. Xiong, C. Wang, J. Cao, H. Guo, B. Liang, F. G. Xu, T. L. Shen, S. East, M. Cannon, З. Н. Лин и т. д. [2–13]. По причине того, что ГСУ представляет собой многокомпонентную систему с многомерными нелинейными характеристиками – для наиболее полной реализации её потенциала существует необходимость решения многопараметрических задач оптимизации, обладающих большой вычислительной сложностью [10]. Для различных компоновок ГСУ известно применение множества подходов, а также разработаны соответствующие методы поиска рациональных стратегий управления их агрегатами. Каждый из методов обладает как преимуществами, так и недостатками, в числе которых: достоверность, точность, устойчивость получаемых решений, а также необходимое операционное время. В настоящей работе для ГСУ параллельной компоновочной схемы и условий ездового цикла с регламентированной программой переключения передач разработана соответствующая методика, основанная на эволюционной многопараметрической оптимизации и позволяющая найти рациональную стратегию управления агрегатами на основе предложенного комплексного критерия энергетической эффективности.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Для условий ездового цикла оценить энергетическую эффективность силовой установки автомобиля категории М₁, переоборудованного в гибридный электромобиль путем дополнительного оснащения электрическим приводом задней оси.

ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: выбран критерий для комплексной оценки энергетической эффективности процесса движения автомобиля с гибридной силовой установкой; определены оптимизационные параметры; разработан алгоритм поиска рациональной стратегии регулирования агрегатов силовой установки, обеспечивающий достижение наивысших показателей топливно-экономических свойств в условиях ездового цикла; на примере автомобиля принятой компоновки получены численные рекомендации по повышению энергетической эффективности процесса движения.

Методы исследования базировались на положениях теории движения автомобиля, теории ДВС, теории электрических машин, а также методиках аппроксимации экспериментальных данных.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве критерия для оценки энергетической эффективности автомобиля с гибридной силовой установкой выбрано количество топлива, израсходованного в ездовом цикле, A , при заданном расходе электрической энергии, ΔE :

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

где $t_{\text{ц}}$ – общее время движения автомобиля в цикле, с;

$G(t)$ – функция расхода топлива ДВС от времени в цикле t , г/с;

$P(t)$ – функция отдаваемой или принимаемой аккумуляторной батареей электрической мощности, кВт;

B – разница накопленной в аккумуляторе электрической энергии между концом и началом цикла движения в цикле, кДж, таблица 1.

Таблица 1. Возможный баланс электрической энергии гибридной силовой установки в ездовом цикле

$B < 0$	В ездовом цикле электрической энергии израсходовано больше, чем получено*
$B = 0$	В ездовом цикле электрической энергии израсходовано столько, сколько получено*
$B > 0$	В ездовом цикле электрической энергии израсходовано меньше, чем получено*

Примечание: * учитывается электрическая энергия, поступившая в аккумуляторную батарею как от внешних зарядных станций, так и от генераторов гибридной силовой установки.

В настоящей работе для выполнения исследования выбрана сравнительно простая компоновочная схема – параллельная. Один мотор-генератор устанавливается в кормовой части кузова с приводом на заднюю ось. При этом привод на переднюю ось от ДВС остается без изменений. Электрическая машина может работать либо в режиме двигателя, либо в режиме генератора. ДВС и электромотор могут приводить в движение автомобиль как по отдельности, так и совместно. В качестве базового шасси выбран автомобиль «LADA Granta». Преимуществами принятой схемы ГСУ (рис. 1) является отсутствие необходимости внесения существенных изменений в конструкцию серийного автомобиля, а также сопутствующее

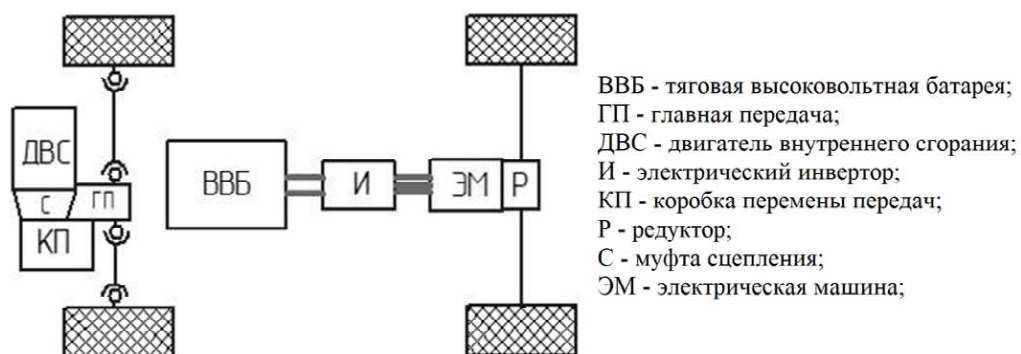


Рисунок 1 – Компоновочная схема силовой установки на базе автомобиля «LADA Granta».

расширение функциональных возможностей ввиду изменения колесной формулы с 2×4 на 4×4 [11–13]. Кроме того, параллельная схема в сравнении с последовательной обладает более высоким КПД передачи энергии от ДВС к ведущим колесам [14]. Ключевые недостатки схемы: возможность зарядки аккумуляторной батареи только в движении, меньшая энергетическая эффективность по отношению к ГСУ с большим количеством электрических машин.

Поиск рациональной стратегии регулирования агрегатами гибридной силовой установки выполнен в соответствии со следующей последовательностью: 1) выбор критерия для оценки энергетической эффективности процесса движения; 2) выбор условий движения (ездового цикла); 3) определение оптимизационных параметров; 4) разработка математических моделей характеристик агрегатов силовой установки; 5) определение ограничений и методики многопараметрического поиска; 6) получение рациональной стратегии регулирования агрегатов силовой установки; 7) разработка рекомендаций по повышению энергетической эффективности.

В таблице 2 приведены режимы движения в условиях выбранного ездового цикла. Связь между кинематическими параметрами силовой установки при прямолинейном движении и отсутствии буксования ведущих колес и муфты сцепления ДВС:

$$V = \omega \cdot r_K = \frac{\pi \cdot n_K \cdot r_K}{30} = \frac{\pi \cdot n_e \cdot r_K}{30 \cdot U_F \cdot U_m} = \frac{\pi \cdot n_1 \cdot r_K}{30 \cdot U_{1K}}, \quad (2)$$

где ω , рад/с, и r_K , м, – угловая скорость и кинематический радиус ведущего колеса соответственно;
 n_e и n_1 – частоты вращения коленчатого вала ДВС и ротора электрической машины соответственно, 1/мин;
 U_F – передаточное число (ПЧ) ГП;
 U_{1K} – ПЧ трансмиссии электрической машины (редуктора на рис. 1);
 U_m – текущее ПЧ КП.

Таблица 2. Операционная карта составляющей EUDC ездового цикла NEDC [15]

№	Режим работы силовой установки	m^*	V , км/ч	t_m , с	j , м/с ²	t , с
1	Холостой ход	Н	–	20	–	20
2	Разгон	1	0–15	4	0,69	26
3	Разгон	2	15–35	9	0,51	37
4	Разгон	3	35–50	8	0,42	47
5	Разгон	4	50–70	13	0,40	61
6	Постоянная скорость	4	70	50	0	111
7	Замедление	4	70–50	8	–0,69	119
8	Постоянная скорость	4	50	69	0	188
9	Разгон	4	50–70	13	0,43	201
10	Постоянная скорость	5	70	50	0	251
11	Разгон	5	70–100	35	0,24	286
12	Постоянная скорость	5	100	30	0	316
13	Разгон	5	100–120	20	0,28	336
14	Постоянная скорость	5	120	10	0	346
15	Замедление	5	120–80	16	–0,69	362
16	Замедление	5	80–50	8	–1,04	370
17	Замедление с отключенным сцеплением	K5**	50–0	10	–1,39	380
18	Холостой ход	Н	0	20	0	400

Примечание: * – номер включенной передачи в КП; ** – включена пятая передача, сцепление выключено.

Взаимосвязь между энергетическими показателями ГСУ в конкретной точке ездового цикла определяется уравнением мощностного баланса, характеристиками силовых агрегатов гибридной силовой установки и потерями в трансмиссии:

$$N_K = N_D + N_B + N_H = N_e(k_e, n_e) \cdot \eta_T^{\text{sgn}(N_e)} + N_1(k_1, n_1) \cdot \eta_{1K}^{\text{sgn}(N_1)} - N_{TM}, \quad (3)$$

где N_K – мощность, реализуемая ведущими колесами;
 N_D, N_B, N_H – мощности сил сопротивления движению: дороги, воздушной среды и инерции;

$N_e(k_e, n_e)$ – функция развиваемой эффективной мощности ДВС в зависимости от коэффициента использования мощности ДВС k_e и n_e ;

$N_1(k_1, n_1)$ – функция механической мощности на валу электрической машины в зависимости от коэффициента использования мощности k_1 и n_1 ;

N_{TM} – мощность, отбираемая от трансмиссии колесными тормозными механизмами;

η_T – КПД трансмиссии ДВС;

η_{1K} – КПД трансмиссии электрической машины; $\text{sgn}(N_e)$ и $\text{sgn}(N_1)$ – кусочно-постоянные функции действительного аргумента (принимает значения «1» или «-1» в зависимости от направления крутящего момента и позволяют моделировать работу ДВС в режиме принудительного холостого хода и работу электрической машины в режиме рекуперации).

Функция $N_e(k_e, n_e)$ получена аппроксимацией [14] экспериментальных данных [16], рис. 2; зависимость $N_1(k_1, n_1)$ определена из механической характеристики электрической машины типа IPM модели Toyota 1NM/1SM, рис. 3, полученной расчетным способом и выбранной в качестве примера для выполнения исследования [17].

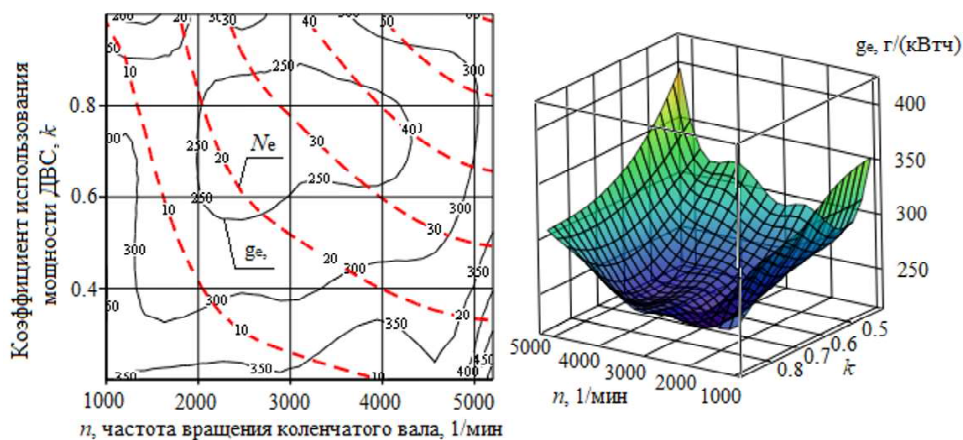


Рисунок 2 – Многопараметрическая характеристика ДВС ВАЗ-1118.

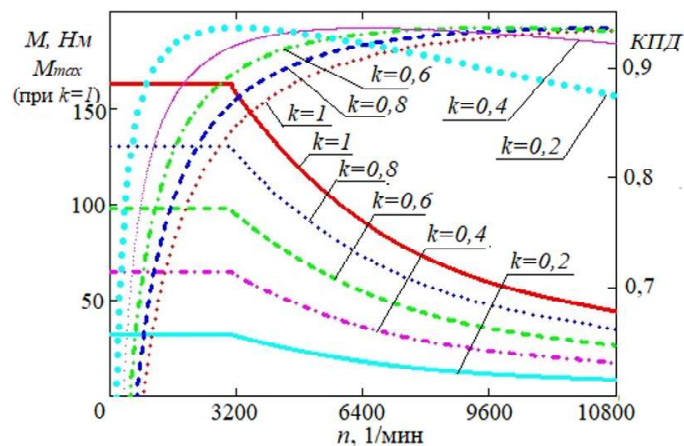


Рисунок 3 – Механическая характеристика и КПД электрической машины.

Т. к., согласно (2), кинематические параметры n_e и n_1 жестко связаны со скоростью движения V , то уравнение (3), составленное для конкретной точки ездового цикла, содержит две неизвестные – k_1 и k_e . Таким образом, это уравнение имеет бесконечное множество решений, каждое из которых будет сопровождаться своими значениями расхода топлива G и электрической мощности P на аккумуляторной батарее.

С целью разрешения данной неопределенности, обусловленной наличием на каждом рассматриваемом режиме движения автомобиля дополнительной степени свободы в сочетании режимных параметров k_1 и

k_e , обуславливающих распределение мощности между силовыми агрегатами, в настоящем исследовании выполнен поиск рациональной стратегии управления этими агрегатами в выбранном ездовом цикле.

Составляющие A и B выбранного критерия (1) в ходе многопараметрического поиска вычислялись путем численного моделирования процесса движения автомобиля с рассматриваемой гибридной силовой установкой в условиях выбранного ездового цикла – таблица 3.

В столбцах 1–15 таблицы 3 содержатся режимные параметры и показатели силовой установки, вычисленные для каждой строки – режимной точки цикла движения. Каждый участок движения с постоянной скоростью (№ 6, 8, 10, 12, 14 таблицы 2) представлен в таблице 3 отдельной строкой с соответствующим накопленным временем движения t_m (столбец № 2): 50, 69, 50, 30 и 10 с соответственно. Каждый участок, сопровождающийся неустановившимся режимом движения автомобиля (участки № 2–5, 7, 9, 11, 13, 15, 16, 17 таблицы 2), представлен в таблице 3 последовательной группой режимов (строк), продолжительностью 1 с каждая. Скорость движения V в этих строках при известных постоянных ускорениях j вычислялась по закону равноускоренного движения. Таким образом, общее количество расчётных строк в таблице 3 составляет:

$$m = K_{II} + \sum_{i=1}^{11} t_m = 7 + 144 = 151, \quad (4)$$

где K_{II} – количество участков в ездовом цикле при $j = 0$.

Таблица 3. Оптимизационный расчёт составляющих комплексного критерия

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
№	t_m , с	V , м/с	j , м/с ²	N_k , кВт	U_m	n_e , 1/мин	n_i , 1/мин	k_1	k_e	g_e , г/кВтч	G_m , г/с	N_e , кВт	η_1	P_m , кВт
1	20	0	0	0	–	800	0	0	0	–	0,184	0	–	0
...
151	20	0	0	0	–	800	0	0	0	–	0,184	0	–	0
Σt_m	400 с									$A = \Sigma G_m$			$B = \Sigma P_m$	

Второе слагаемое формулы (4) определяет суммарную продолжительность всех 11-ти участков неустановившегося движения автомобиля в цикле.

Связь между кинематическими параметрами силовой установки (столбцы № 3, 4, 7, 8 таблицы 3) определяется уравнением (2). ПЧ КП U_m для каждой расчётной строчки таблицы 3 выбирается в соответствии с операционной картой ездового цикла (таблица 2). Взаимосвязь между энергетическими показателями (столбцы № 3, 4, 7, 8 таблицы 3) определяется уравнением (3). Расходы топлива и электрической энергии определяются следующими зависимостями: в каждой строке таблицы 3 системой (5) и за весь ездовой цикл системой (6).

$$\left. \begin{aligned} G_m &= \frac{g_e(k_e, n_e) \cdot N_e}{3600} \\ P_m &= \frac{N}{(\eta_1(k_1, n_1) \cdot \eta_B \cdot \eta_{II})^{sgn(N)}} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^{151} G_m \\ B &= \sum_{i=1}^{151} P_m \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где η_B – КПД заряда/разряда аккумуляторной батареи,
 η_{II} – КПД электрического инвертора.

При решении задачи оптимизации критерием является (6). Оптимизационные параметры – k_1 на каждом из рассматриваемых режимов. Общее количество параметров оптимизации составляет $m = 151$. В качестве ограничений заданы диапазоны возможных значений режимных параметров агрегатов силовой установки (ДВС и электрической машины) и условие соблюдения кинематических и силовых соотношений в трансмиссии.

Для решения поставленной задачи в среде Visual Basic Application разработана программа эволюционной многопараметрической оптимизации, которая позволяет выполнять вычисления для ГСУ параллельного типа, обладающих одним независимым режимным параметром в каждой расчётной точке выбранного ездового цикла с общим количеством точек не более 200, чем и обусловлен выбор принятого в исследовании цикла EUDC. Соответствующие результаты показаны на рис. 4. При необходимости работы с ездовыми циклами, содержащими большее число точек, например WLTC, необходимо применение других подходов – например, объединение однотипных режимов движения в группы путем совместного разложения функции требуемой для движения мощности и функции скорости в ездовом цикле в вариационный ряд [18].

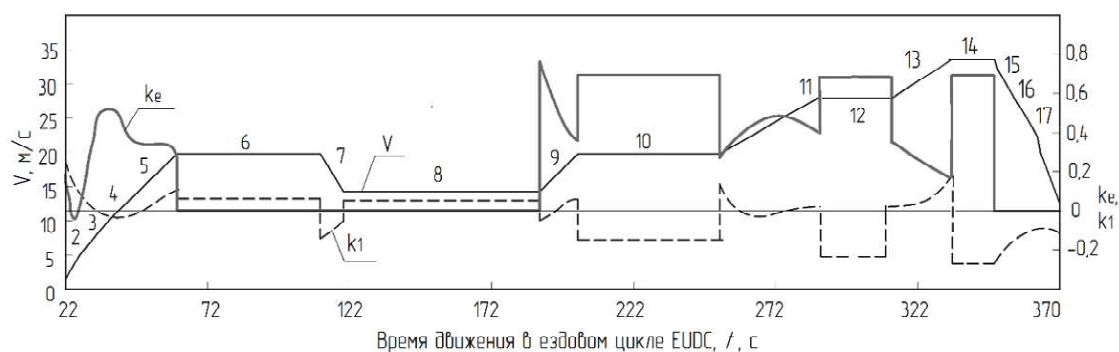


Рисунок 4 – Стратегия рационального регулирования ГСУ в ездовом цикле.

Полученные данные позволяют для каждой расчетной точки цикла движения оценить распределение механических мощностей между электрическим двигателем и ДВС исходя из значений их коэффициентов использования мощности k_1 и k_e . На режимах разгона (участки 2–5, 9, 11, 13) ДВС всегда отдаёт мощность в трансмиссию. Электрическая машина при этом преимущественно также работает в режиме двигателя. Однако, в интервалах времени с 31-й по 46-ю секунды участков 3 и 4, со 188-й по 197-ю секунду участка 9 и с 255 по 280-ю секунду участка 11 электрическая машина переходит в режим генератора с одновременным увеличением подачи топлива в ДВС и преобразует его избыточную развиваемую мощность в электрическую энергию с целью зарядки аккумуляторной батареи.

На разных участках установившегося движения электрическая машина работает в различных режимах: на участках 6 и 8 автомобиль движется в режиме электромобиля, ДВС при этом не работает; на участках 10, 12 и 14, которые сопровождаются более высокой мощностью, развиваемой силовой установкой, электрическая машина работает в режиме генератора, отбирая избыточную мощность ДВС для зарядки батареи – такой режим работы силовой установки позволяет уменьшать эффективный удельный расход топлива ДВС за счёт большей его загрузки (как это следует из рис. 2). При замедлении автотранспортного средства электрическая машина работает в режиме рекуперации ($k_1 < 0$), в ДВС топливо не подаётся.

По результатам численного моделирования процесса движения автомобиля в ездовом цикле, силовая установка которого регулируется в соответствии со стратегией, приведенной на рис. 4, путевой расход топлива составляет 259,4 г/цикл. Данный результат справедлив при нулевом балансе электрической энергии в ездовом цикле (составляющая B критерия (1) равна нулю).

ВЫВОДЫ

В результате выполнения исследования предложен комплексный критерий для оценки энергетической эффективности процесса движения автомобиля с гибридной силовой установкой, учитывающий путевой расход топлива при заданном балансе электрической энергии ГСУ в ездовом цикле. Разработана методика и соответствующая компьютерная программа поиска рациональной стратегии управления агрегатами ГСУ параллельного типа, обладающих одним независимым режимным параметром в каждой расчётной точке ездового цикла. Для выбранных в качестве примера компоновочной схемы ГСУ и базовой модели автомобиля путевой расход топлива в условиях магистральной составляющей EUDC ездового цикла NEDC, вычисленный путем численного моделирования процесса движения автомобиля при регулировании агрегатов его силовой установки в соответствии с полученной рациональной стратегией, составил 5,04 л/100 км. Полученный показатель является на 15,3 % меньшим, чем путевой расход, вычисленный аналогичным образом для автомобиля, оснащенного серийной силовой установкой. В качестве

дальнейших направлений работы планируется усиление апробации за счет уточнения математических моделей характеристик силовых агрегатов путем проведения экспериментальных исследований, повышение эффективности разработанной методики многопараметрического поиска и проведения натурных сравнительных испытаний ГТС различных компоновок с различными стратегиями регулирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимерханов А. Парк электрокаров и гибридов в России [Электронный ресурс] // ООО "АВТОСТАТ": [сайт]. URL: <https://www.autostat.ru/infographics/58435/> (дата обращения: 02.04.2025).
2. Оптимальное управление комбинированными энергетическими установками транспортных средств / И. А. Куликов [и др.]. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. N 6. С. 92-99. EDN VKRASX.
3. Gianfranco, P. Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. Rome: Elsevier, 2010. 645 p. URL: https://www.academia.edu/116820310/ELECTRIC_AND_HYBRID_VEHICLES_POWER_SOURCES_MODELS_SUSTAINABILITY_INFRASTRUCTURE_AND_THE_MARKET (дата обращения: 02.04.2025).
4. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design / M. Ehsani [et al.]. Boca Raton: CRC Press, 2008. 419 p. URL: https://lib.sairam.edu.in/wp-content/uploads/sites/18/2024/11/Modern-electric-hybrid-electric-and-fuel-cell-vehicles_fundamentals-theory-and-design.pdf (дата обращения: 02.04.2025).
5. Горожанкин С. А., Савенков Н. В. Исследование законов изменения ускорений автомобиля в процессе его разгона // Строитель Донбасса. 2019. N 4-2019. С. 27-31. EDN EEVBQI.
6. 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. Вып. 2024-6(170) Технология, организация, механизация и геодезическое обеспечение строительства. С. 47-57. ISSN 2519-2817. DOI 10.71536/vd.2024.6c170.6. EDN JHMFZE.
7. Горожанкин С. А., Савенков Н. В., Понякин В. В. Влияние передаточного числа главной передачи на топливную экономичность автомобиля в ездовом цикле // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15, N 1 (59). С. 19-29. EDN YTMCKG.
8. Раков В. А. Оценка экологической безопасности и энергоэффективности гибридных автомобилей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2025. N 1 (80). С. 63-71. EDN DTDJZW.
9. Раков В. А. Прогнозирование условий эффективной эксплуатации гибридных автомобилей // Мир транспорта и технологических машин. 2024. N 2-1 (85). С. 99-105. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-1(85)-99-105. EDN NGJUKH.
10. Куликов И. А., Селифонов В. В., Филонов А. И. Поиск оптимального управления гибридной силовой установкой автомобиля по критерию баланса его экологических и топливно-экономических свойств // Известия МГТУ МАМИ. 2010. N 2 (10). С. 44-51. EDN NCCXSV.
11. Гибридные автомобили – решение экологической проблемы автомобильного транспорта / В. В. Селифонов [и др.]. // Известия МГТУ МАМИ. 2007. N 2 (4). С. 30-44. EDN LDHNLZL.
12. Логика управления прогностического типа для транспортного средства / Е. Е. Баулина [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. N 6. С. 42-49. EDN ROSNKX.
13. Заватский А. М. Методы активного распределения момента между осями полноприводного электромобиля: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.11; ФГУП "Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ" (ФГУП "НАМИ"). Москва, 2023. 133 с.
14. Горожанкин С. А., Шитов А. А., Савенков Н. В. Методики для аппроксимации зависимостей нескольких переменных в программной среде MS Excel и Mathcad // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2016. N 3(247). С. 35-47. DOI 10.5862/JCSTCS.247.4. EDN WZRGKT.
15. 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 N 101: Пересмотр 3 [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций (ООН): [сайт]. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3r.pdf> (дата обращения: 02.04.2025).
16. Русаков С. С. Разработка методики оптимизации передаточных чисел механической ступенчатой трансмиссии легкового автомобиля с учетом режимов работы его двигателя: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.03; Ижевский государственный технический университет. Ижевск, 2007. 134 с.
17. Савенков Н. В., Золотарев О. О. Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. N 1 (35). 17 р. EDN WYDHJS.
18. Анализ ездовых испытательных циклов автомобилей с помощью вариационных рядов / С. А. Горожанкин [и др.]. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. Вып. 2022-3(155) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. С. 29-35. EDN HFTQYK.

REFERENCES

1. Timerkhanov, A. (2025), "Park of electric vehicles and hybrids in Russia", available at: <https://www.autostat.ru/infographics/58435/> (Accessed 02 April 2025).
2. Kulikov, I.A., Krutashov, A.V., Filonov, A.I. and Bakhmutov, S.V. (2015), "Optimal Control of Combined Power Plants of Vehicles", *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, no. 6, pp. 92-99. EDN VKRASX.
3. Gianfranco, P. (2010), Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market, Elsevier, Rome, Italy, available at: https://www.academia.edu/116820310/ELECTRIC_AND_HYBRID_VEHICLES_POWER_SOURCES_MODELS_SUSTAINABILITY_INFRASTRUCTURE_AND_THE_MARKET (Accessed 02 April 2025).
4. Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S.E. and Emadi, A. (2008), *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*, CRC Press, Boca Raton, FL, available at: https://lib.sairam.edu.in/wp-content/uploads/sites/18/2024/11/Modern-electric-hybrid-electric-and-fuel-cell-vehicles_-fundamentals-theory-and-design.pdf (Accessed 02 April 2025).
5. Gorozhankin, S.A. and Savenkov, N.V. (2019), "The Evaluation of the Vehicles' Speeding up Laws During Acceleration", *The Builder of Donbass*, no. 4-2019, pp. 27-31. EDN EEVBQI.
6. Savenkov, N.V., Zolotarev, O.O. and Trubnikov, M.S. (2024), "Investigation of the Effectiveness of the Hybrid Power Plant in the Design of N₃ Category Vehicle", *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 2024-6(170), pp. 47-57. ISSN 2519-2817. DOI 10.71536/vd.2024.6c170.6. EDN JHMFZE.
7. Gorozhankin, S.A., Savenkov, N.V. and Ponyakin, V.V. (2018), "Influence of Main Gear Ratio on Car Fuel Efficiency in the Drive Cycle", *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, vol. 15, no. 1 (59), pp. 19-29. EDN YTMCKG.
8. Rakov, V.A. (2025), "Assessment of Environmental Safety and Energy Efficiency of Hybrid Cars", *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, no. 1 (80), pp. 63-71. EDN YTMCKG.
9. Rakov, V.A. (2024), "Forecasting Conditions for Efficient Operation of Hybrid Vehicles", *World of Transport and Technological Machines*, no. 2-1(85), pp. 99-105. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-1(85)-99-105. EDN NGJUKH.
10. Kulikov, I.A., Selifonov, V.V. and Filonov, A.I. (2010), "Optimal Control of a Hybrid Powerplant Based on a Balance of Ecological and Fuel Efficiency Factors", *Izvestiya MGTU MAMI*, no. 2 (10), pp. 44-51. EDN NCCXSV.
11. Selifonov, V.V., Karpukhin, K.E., Filonov, A.I., Baulina, E.E. and Avrutsky, E.V. (2007), "Hybrid Vehicles Are the Solution of Environmental Problems of Road Transport", *Izvestiya MGTU MAMI*, no. 2 (4), pp. 30-44. EDN LDHHZL.
12. Baulina, E.E., Dementyev, Yu.V., Krutashov, A.V., Serebryakov, V.V., Deev, O.I. and Filonov, A.I. (2016), "Predictive Type Control Logic for a Vehicle", *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, no. 6, pp. 42-49. EDN ROSNKX.
13. Zavatskiy, A.M. (2023), "Methods of active torque distribution between axles of an all-wheel drive electric vehicle", Ph.D. Thesis, Dynamics and strength of machines, devices and equipment, Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute "NAMI", Moscow, Russia.
14. Gorozhankin, S.A., Shitov, A.A. and Savenkov, N.V. (2016), "Procedures for Approximating Dependences of Several Variables in MS Excel and Mathcad Software Environment", *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, no. 3(247), pp. 35-47. DOI 10.5862/JCSTCS.247.4. EDN WZRGKT.
15. United Nations (UN) (2015), "Agreement concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations: Addendum 100: Regulation No. 101: Revision 3", available at: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3r.pdf> (Accessed 02 April 2025).
16. Rusakov, S.S. (2007), Development of a methodology for optimizing the gear ratios of a mechanical stepped transmission of a passenger car, taking into account the operating modes of its engine, Abstract of Ph.D. dissertation, Automotive design and development, Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.
17. Savenkov, N.V. and Zolotarev, O.O. (2023), "Rational Choice of Operating Parameters of an Automotive Hybrid Power Plant", *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*, no. 1 (35), 17 p. EDN WYDHJS.
18. Gorozhankin, S.A., Savenkov, N.V., Zolotarev, O.O. and Kovaleva, L.R. (2022), "Automotive Driving Test Cycle Analysis Using Variation Series", *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, issue 2022-3(155) Buildings and structures using new materials and technologies, pp. 29-35. EDN HFTQYK.

Информация об авторах

Золотарев Олег Олегович – старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: рациональное регулирование автомобильных гибридных силовых установок.

Information about the authors

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.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2025; принята к публикации 23.05.2025.

The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 16.05.2025; accepted for publication 23.05.2025.