

Научная статья
УДК 629.018

Определение характеристик двигателей автотранспортного средства в ходе дорожных испытаний

Олег Олегович Золотарев¹, Никита Владимирович Савенков²

^{1,2}ФГБОУ ВО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА),
г. Макеевка, Россия

¹o.o.zolotarev@donnasa.ru

²n.v.savenkov@donnasa.ru

Аннотация. В статье предложен метод определения показателей агрегатов гибридной силовой установки автотранспортного средства в процессе выполнения дорожных испытаний. Приводятся описание конструкции, рабочий процесс, аппаратное и программное обеспечение разработанного устройства для определения крутящего момента на ведущем колесе автомобиля. Предложена усовершенствованная методика определения текущего расхода топлива ДВС объемным способом. Результаты работы позволят определять внешние и частичные скоростные характеристики ДВС, его эффективный крутящий момент, развиваемую эффективную мощность и эффективный удельный расход топлива в рамках этих характеристик при работе как на установившихся, так и на неустановившихся режимах, а также механические характеристики и характеристики КПД электрических машин силовых установок гибридного типа как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, измерение крутящего момента, методика измерения, автомобиль, силовая установка.

Для цитирования: Золотарев О.О., Савенков Н.В. Определение характеристик двигателей автотранспортного средства в ходе дорожных испытаний // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 3 (45).

Original article

Determination of characteristics of motor vehicle engines during road tests

Oleg O. Zolotarev¹, Nikita V. Savenkov²

^{1,2}Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture" (DONNACEA), Makeevka, Russia

¹o.o.zolotarev@donnasa.ru

²n.v.savenkov@donnasa.ru

Abstract. The article proposes a method for determining the performance of hybrid power plant units of a vehicle during road tests. The description, design, workflow, hardware and software of the developed device for determining the torque on the drive wheel of a vehicle are given. An improved method for determining the current fuel consumption of an internal combustion engine by a volumetric method is proposed. The results of the work will allow determining the speed characteristics of an internal combustion engine by effective power, effective torque, effective specific and hourly fuel consumption during engine operation, both in steady-state and non-steady-state operating modes, as well as mechanical characteristics and efficiency characteristics, both in engine mode and in generator mode, of electric machines for hybrid power plants.

Keywords: hybrid vehicle, torque measurement, measurement technique, vehicle, power plant.

For citation: Zolotarev O.O., Savenkov N.V. Determination of characteristics of motor vehicle engines during road tests. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. №3 (45).

Введение. В современном мире актуальными являются задачи разработки эффективных и оперативных методов проверки и испытаний автотранспортных средств, их компонентов с целью выявления конструктивных недостатков, уточнения математических моделей характеристик их агрегатов, создания соответствующих рациональных стратегий регулирования и т.д.

Важным этапом в жизненном цикле автомобиля является проведение экспериментальных исследования агрегатов силовых установок на предмет определения их характеристик.

Для лабораторных исследований мощностных и экономических показателей при полных и частичных нагрузках, показателей на холостом ходу, условных механических потерь, равномерности работы цилиндров, безотказности работы, выбросов вредных веществ и дымности отработавших газов, шумовых характеристик и пусковых качеств автомобильных ДВС применяются обкаточно-тормозные стенды [1].

При официальном утверждении автотранспортных средств [2] с различными силовыми установками (традиционной конструкции,

гибридными или электромеханическими) предусматривается проведение испытаний на предмет определения расхода топлива (электроэнергии) с использованием динамометрических стендов мощностного типа, которые оснащены беговыми барабанами [3, 4, 5]. Также известны подходы с применением колесных стендов, например [4].

Перечисленные выше методы исследования характеристик агрегатов автомобильных гибридных силовых установок (ГСУ) сопряжены со следующими сложностями, требующими решения:

1. Проведение лабораторных исследований на обкаточно-тормозных стендах требует предварительной разборки ГСУ на агрегаты.

2. Динамометрический стенд должен воссоздавать как двигательный, так и тормозной (рекуперативный) режим движения автотранспортного средства; при этом нагрузочное устройство стенда должно обеспечивать регулирование крутящего момента в достаточно широких пределах [6].

3. Мощностные стенды для испытания автомобилей позволяют определить момент только в одной точке силовой установки – на двигателях. ГСУ, как правило, содержит несколько силовых агрегатов и, соответственно, степеней свободы в сочетании их режимных параметров при неизменной частоте вращения и крутящем моменте на ведущих колесах. Это требует решения задачи достоверного определения фактического распределения составляющих энергосилового потока между агрегатами ГСУ. При этом известные бестормозные методы должны быть в достаточной степени обоснованными для этой цели [7].

На разрешение этих сложностей направлена настоящая работа, основная цель которой – обосновать и предложить для применения метод определения показателей агрегатов гибридной силовой установки автомобиля безразборным способом путем проведения дорожных или стендовых испытаний.

Основная часть. Особенность определения характеристик ГСУ безразборным методом состоит в том, что все агрегаты в силовой установке связаны механически параллельно или последовательно и на тех или иных режимах могут работать как отдельно, так и совместно, реализуя различные режимы движения автомобиля. Поэтому методика испытания такого автотранспортного средства должна учитывать кинематические и силовые соотношения в его трансмиссии.

В качестве примера в настоящей работе выбран автомобиль Toyota Prius ZVW52, который оснащен последовательно-параллельной ГСУ, содержащей ДВС и две электрические машины, каждая из которых может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя [8], рис. 1.

Предлагаемый метод включает в себя два последовательных этапа. На первом определяется механическая характеристика и характеристика КПД электрической машины, связанной с трансмиссией параллельно (ЭМ1), (1, 2) [9]. При этом движение автотранспортного средства осуществляется в режиме электромобиля (ДВС и электрическая машина ЭМ2 не нагружают трансмиссию крутящим моментом).

$$M_1 = f(n_1, k_1), \quad (1)$$

$$\eta_1 = f(n_1, k_1), \quad (2)$$

где M_1 – крутящий момент ЭМ1; η_1 – КПД ЭМ1; n_1 – частота вращения ротора ЭМ1; k_1 – коэффициент использования мощности ЭМ1 (определяется величинами электрического тока I_1 и напряжения U_1): $M_1 < 0$ и $-1 \leq k_1 < 0$ – генераторный режим, $M_1 > 0$ и $0 > k_1 \geq 1$ – двигательный режим.

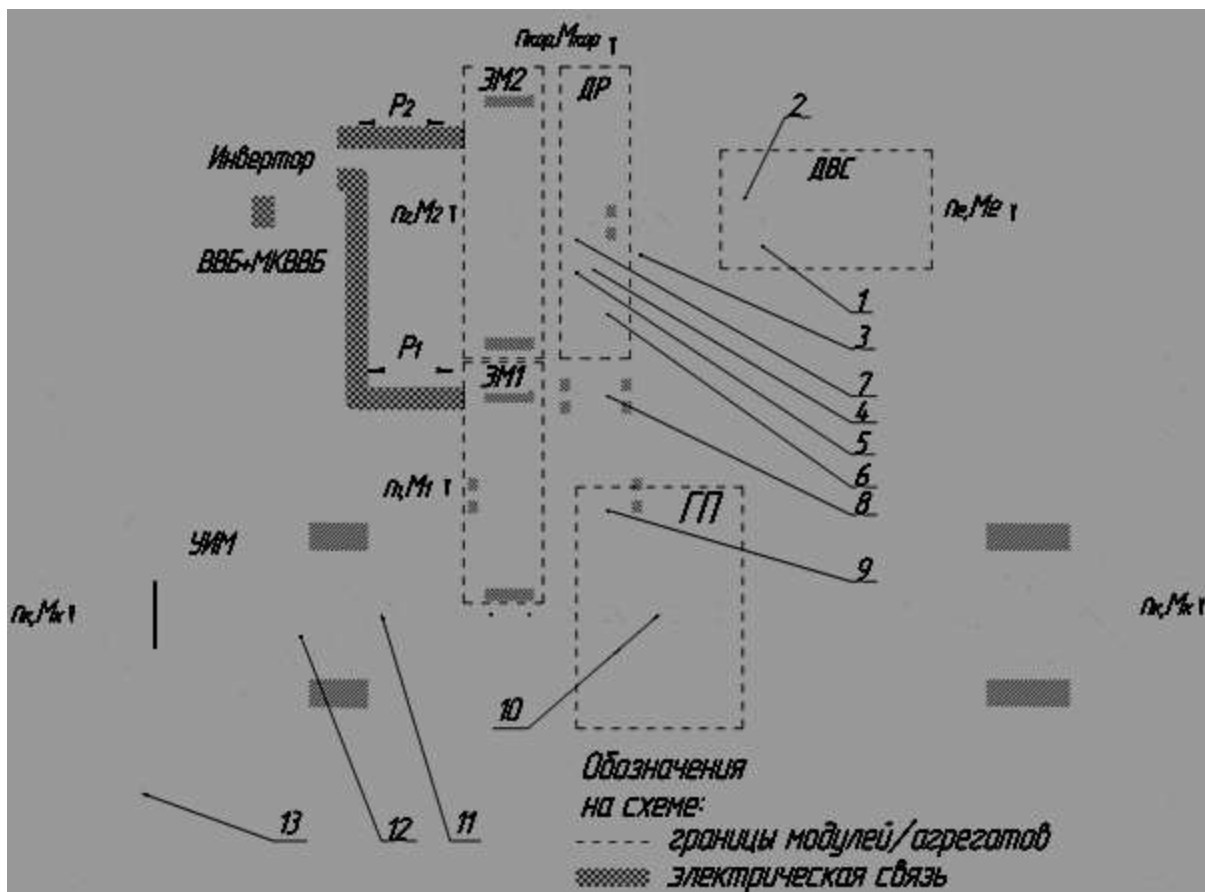


Рис. 1. Схема кинематическая гибридной силовой установки с размещением УИМ:
 1 – маховик ДВС; 2 – обгонная муфта; 3 – демпфер; 4, 5, 6, 7 – водило, сателлит, коронная шестерня и солнечная шестерня дифференциального распределителя (ДР) соответственно;
 8 – промежуточный вал ГСУ; 9 – шестерня привода ЭМ1; 10 – дифференциал; 11 – шарнир равных угловых скоростей (ШРУС); 12 – подшипник ступичный; 13 – колесо; ГП – главная передача; ЭМ1 и ЭМ2 – первая и вторая электрические машины, соответственно;
 M_1, M_2, M_k – крутящие моменты на ЭМ1, ЭМ2 и колесе автомобиля соответственно;
 P_1, P_2 – электрические мощности ЭМ1 и ЭМ2

Расчёт значений параметров и показателей функциональных зависимостей (1) и (2) осуществляется на основании зависимостей:

$$M_1 = \frac{M_k \cdot 2}{U_{ЭМ1-К} \cdot \eta_{ЭМ1-КД}}, \quad (3) \quad \eta_1 = \frac{M_1 \cdot \pi \cdot n_1}{30 \cdot P_1}, \quad (4) \quad n_1 = U_{ЭМ1-К} \cdot n_k, \quad (5)$$

где M_k – момент на колесе автомобиля; $U_{ЭМ1-К}$, $\eta_{ЭМ1-КД}$ – передаточное число и КПД привода ведущего колеса от ЭМ1 соответственно;
 n_k – частота вращения ведущего колеса; n_1 – частота вращения ротора ЭМ1.

Определение характеристик ЭМ1 в генераторном режиме:

$$M_1 = \frac{M_k \cdot 2 \cdot \eta_{ЭМ1-К}}{U_{ЭМ1-КГ}}, \quad (6) \quad \eta_1 = \frac{30 \cdot P_1}{M_1 \cdot \pi \cdot n_1}, \quad (7)$$

где $\eta_{ЭМ1-КГ}$ – КПД при передаче мощности от ведущего колеса к ЭМ1.

Частота вращения n_1 и нагрузка на электрическую машину определяется с помощью диагностического сканера (Launch X-431 и т.п.), который подключается к автомобилю через диагностический интерфейс.

Определять крутящий момент на ведущем колесе M_k предлагается с помощью устройства для измерения крутящего момента (УИМ), на время испытаний размещенного между ступицей ведущего колеса и колесным диском (рис. 1, 2). Устройство (рис. 2) состоит из ведущей и ведомой полумуфт, которые соединены между собой через чувствительный (упругий) элемент при помощи шарниров. Данный элемент нагружен только окружной силой от передаваемого колесу момента и испытывает при работе УИМ упругую деформацию. Остальные пять степеней свободы ведомой полумуфты относительно ведущей заблокированы с помощью установленного между ними двухрядного радиально-упорного шарикоподшипника. Это выполнено с целью компенсации влияния на величину упругой деформации чувствительного элемента радиальных и осевых сил со стороны поверхности дороги. Таким образом, значение передаваемого крутящего момента пропорционально величине этой деформации. Для её определения применяются тензорезисторы «А», «В», «С», «D» (рис. 2в). «А» расположен на упругом элементе. «В», «С» и «D» – термокомпенсаторы, установлены на противовесе, который изготовлен из такого же материала, как и чувствительный элемент.

В электронный измерительный комплекс (рис. 3), который установлен на полумуфте и вращается совместно с ней, входят: тензорезисторный мост, микроконтроллер (например, ATMEGA328P с программированием на языке Arduino C), батарея питания (АКБ), аналогово-цифровой преобразователь-усилитель (АЦП) и модуль-радиопередатчик для дистанционной передачи данных к аппаратно-программному комплексу сбора и обработки данных, размещенному в салоне автомобиля [10].

Тарирование УИМ может производиться различными способами. В настоящем исследовании для этой цели изготовлена оснастка (рис. 4), состоящая из жёсткой стальной станины, плеча (толщина 14 мм, изготовленного на плазменном станке с ЧПУ), гидравлического домкрата модели ДГ12.3193010-10 и манометра ЭКОМЕРА МД02 (класс точности 1.6 согласно EN 837, предел измерения до 6 МПа).

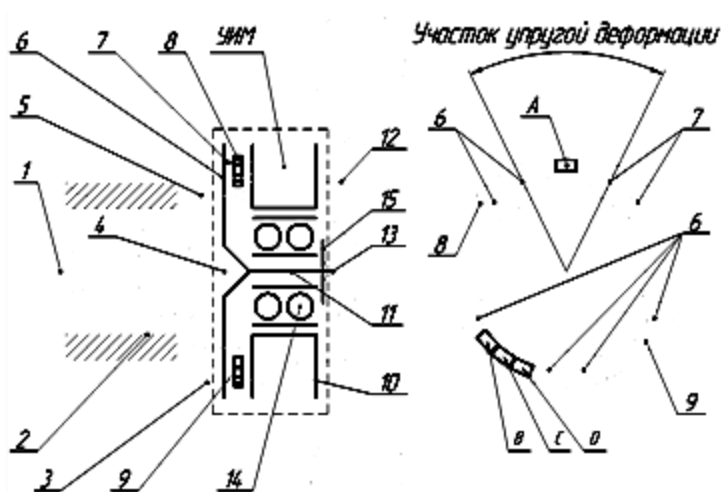


a₁)

a₂)



a₃)



б)

в)

Рис. 2. Устройство для измерения крутящего момента

*a₁, a₂, a₃ – вид общий в рабочем положении; б – схема кинематическая;
в – размещение тензорезисторов:*

- 1 – вал приводной; 2 – поворотный кулак; 3 – ступица; 4 – ступичная гайка;
5 – шпилька; 6 – болты крепления упругого элемента к ведущей полушумфте; 7 – болты
крепления упругого элемента к ведомой полушумфте; 8 – упругий элемент;
9 – противовес; 10 – полушумфта ведомая; 11 – полушумфта ведущая; 12 – болт колесного
диска; 13 – гайка центрующего подшипника; 14 – центрующий подшипник;
15 – центрующая шайба; А – основной тензорезистор;
В, С, D – термокомпенсационные тензорезисторы*

Расчетное максимальное давление в гидравлической системе – 4 МПа. При этом требуемый передаваемый крутящий момент – 1600 Нм (максимально возможный момент на колесе выбранного автомобиля при одновременной работе всех двигателей ГСУ) будет иметь место при длине плеча 250 мм.

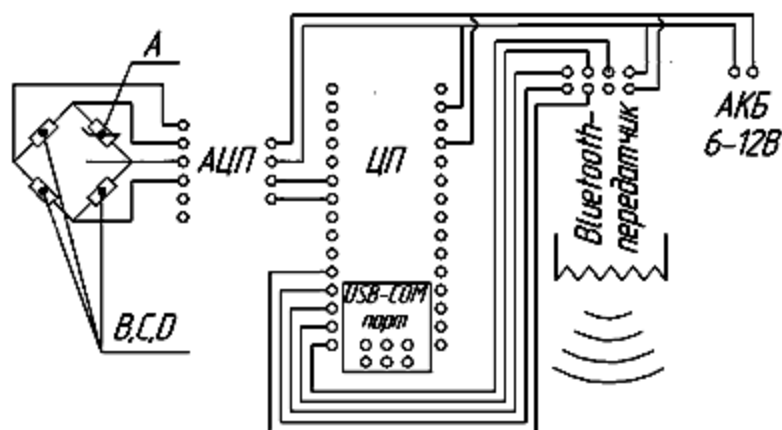


Рис. 3. Электронный измерительный комплекс

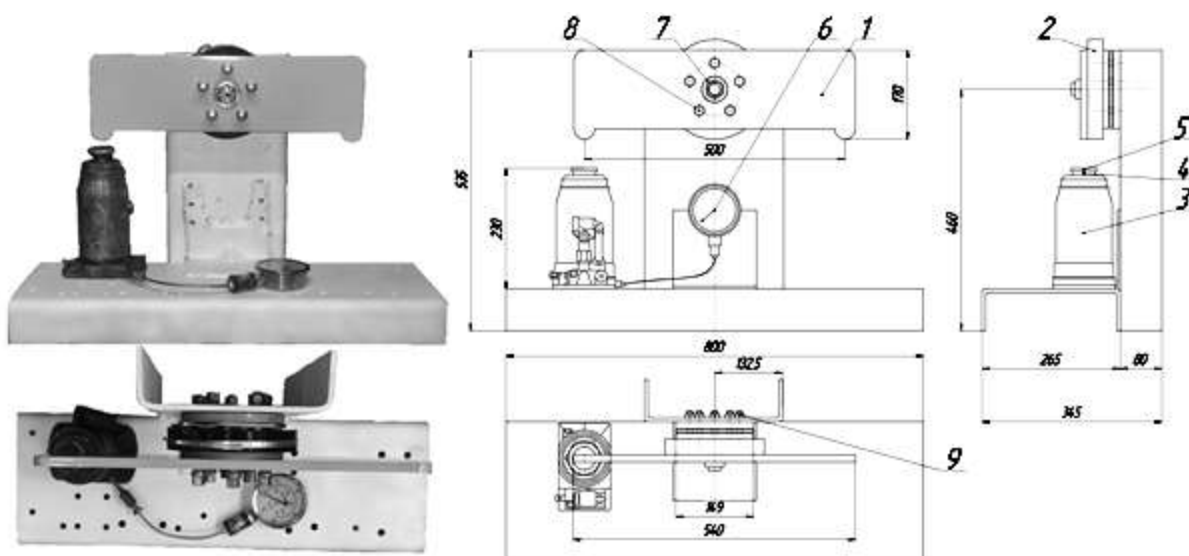


Рис. 4. Оснастка для тарирования:

1 – плечо; 2 – УИМ; 3, 4 – гидравлический домкрат и его шток; 5 – контактная площадка; 6 – манометр, 7 – центровочная шайба; 8, 9 – болтовой крепеж плеча к УИМ и УИМ к станине соответственно

На втором этапе испытаний силовая установка работает в гибридном режиме – задействованы все двигатели ГСУ. В ходе данного этапа определяется механическая характеристика ЭМ1 (8) и характеристика ее КПД

(9), а также эффективная мощность (10) и эффективный удельный расход топлива ДВС (11) в рамках частичной скоростной характеристики:

$$M_2 = f(n_2, k_2), \quad (8) \quad \eta_2 = f(n_2, k_2), \quad (9) \quad N_e = f(n_e, k_e), \quad (10) \quad g_e = f(n_e, k_e), \quad (11)$$

где M_2 – крутящий момент на роторе ЭМ2; η_2 – КПД ЭМ2; N_e, g_e – эффективная мощность и эффективный удельный расход топлива ДВС; n_e – частота вращения коленчатого вала; k_e – коэффициент использования мощности ДВС.

Расчёт значений параметров и показателей функциональных зависимостей (8-10) осуществляется на основании зависимостей:

$$M_{\text{кор}} = \frac{M_K - M_1 \cdot U_{\text{ЭМ1-К}}}{U_{\text{К-К}}}, \quad (12) \quad M_e = \frac{M_{\text{кор}}}{1 - \frac{1}{U_{\text{ДР}}}}, \quad (13) \quad M_2 = \frac{M_e}{U_{\text{ДР}}}, \quad (14)$$

$$\eta_2 = \frac{M_2 \cdot \pi \cdot n_2}{30 \cdot P_2}, \quad (15) \quad n_e = n_{\text{кор}} \cdot \left(1 - \frac{1}{U_{\text{ДР}}}\right) + \frac{n_2}{U_{\text{ДР}}}, \quad (16) \quad n_{\text{кор}} = U_{\text{К-К}} \cdot n_K, \quad (17)$$

где $M_{\text{кор}}$ – момент на коронной шестерне ДР; $U_{\text{К-К}}$ – передаточное число привода ведущего колеса от коронной шестерни ДР; M_e – эффективный крутящий момент ДВС; $U_{\text{ДР}}$ – передаточное число ДР; P_2 – электрическая мощность ЭМ2; $n_{\text{кор}}$ – частота вращения коронной шестерни ДР.

Формулы крутящих моментов (12-14) не содержат механического КПД, т.к. его расположение в них зависит от направления передачи, что должно быть учтено в расчетах и определяется текущим вариантом возможных сочетаний режимов работы агрегатов ГСУ: 1) тяговый режим движения автомобиля ($M_K > 0$), ЭМ1 в двигательном режиме, ЭМ2 и ДВС в двигательном режиме; 2) тяговый режим движения автомобиля, ЭМ1 в генераторном режиме, ЭМ2 и ДВС в двигательном режиме; 3) тяговый режим движения автомобиля, ЭМ1 и ЭМ2 в генераторном режиме, ДВС в двигательном режиме; 4) тяговый режим движения автомобиля, ЭМ1 в двигательном режиме, ЭМ2 в генераторном режиме, ДВС в двигательном режиме; 5) рекуперативный режим движения автомобиля ($M_K < 0$), ЭМ1 в генераторном режиме, ЭМ2 и ДВС в двигательном режиме.

M_1 вычисляется на основании зависимости (1) первого этапа по значениям n_1 и k_1 , определённым в каждой режимной точке второго этапа, n_e и k_e определяются с помощью диагностического сканера. P_2 определяется величинами электрического тока I_2 и напряжения U_2 . M_K определяется с помощью УИМ.

Расчёт g_e выполняется по формуле $g_e = G/N_e$, где G – текущий расход топлива ДВС. Для выбранного в качестве примера автомобиля Toyota Prius ZVW52, оснащенного двигателем модели 2ZR-FXE, для определения расхода топлива G , г/с, применена методика [11], основанная на объемном способе, которая требует предварительного исследования на проливочном стенде динамической производительности электромеханической форсунки Q_a , мл/с, в зависимости от длительности управляющего электрического импульса $\tau_{уп}$, мс, перепада давления, ΔP , бар, электрического напряжения, U , В, и температуры топлива. Далее путем аппроксимации разрабатывается функция $Q_a = f(\tau_{уп}, \Delta P, U, T)$ для её применения в (18), рис. 5.

Для вычисления расхода G ДВС в ходе второго этапа дорожных испытаний применяется формула [12]:

$$G = 10^{-3} Q_a n_e i \rho_T \tau_{уп} / 120, \text{ г/с}, \quad (18)$$

где i – количество цилиндров в ДВС; ρ_T – плотность топлива, г/мл.

При этом для определения значений параметров τ , ΔP , U , используется диагностический сканер. На рисунке 5а дробные обозначения зависимостей $Q_a = f(\tau_{уп})$ содержат значения перепада давления ΔP и напряжения U (например, «4/15» означает, что результаты получены при $\Delta P = 4$ бар и $U = 15$ В). Также на рисунке приведены значения производительности форсунки в режиме непрерывного впрыска («А», «Б» и «В» соответственно для $\Delta P = 4$ бар, $\Delta P = 3,5$ бар и $\Delta P = 3$ бар).

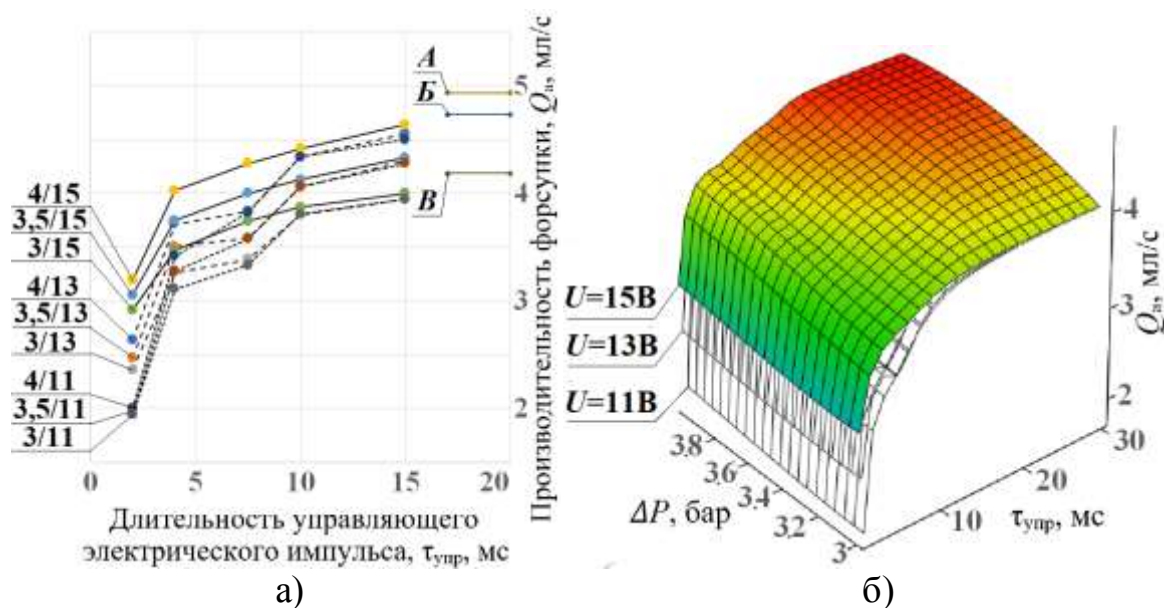


Рис. 5. Динамическая производительность форсунки Denso 23209-39295 двигателя 2ZR-FXE:

- а) результаты эксперимента на стенде Autool CT160;
- б) результаты аппроксимации экспериментальных данных

Выводы и рекомендации. Основной сферой применения разработанного метода являются исследования характеристик двигателей с целью их диагностики и совершенствования алгоритмов управления силовыми установками с учетом режимов движения автотранспортного средства на различных маршрутах, а также в условиях современных ездовых циклов. Кроме того, разработанное УИМ может применяться для исследования тормозных качеств и уточнения параметров уравнения силового баланса автотранспортного средства.

Достоинством разработанного метода определения характеристик двигателей автомобильной гибридной силовой установки является отсутствие необходимости в разборке ГСУ и последующих лабораторных испытаниях каждого агрегата на специализируемом нагрузочно-тормозном стенде. Также отсутствует необходимость в применении стендов с беговыми барабанами.

Ввиду того, что измерение момента осуществляется в одной точке силовой установки, применение предложенного метода является более предпочтительным для автотранспортных средств, оснащенных

механическими трансмиссиями, в основе которых находятся передачи зацепления. Это обусловлено тем, что такие передачи обладают в большей степени известными закономерностями изменения их КПД в зависимости от режима работы (по отношению к передачам другого типа – например, к фрикционным бесступенчатым). При этом повышается достоверность вычисления показателей агрегатов силовой установки с помощью предложенного метода.

Список источников

1. ГОСТ 14846-2020. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. Введ. 2021–06–01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 96 с.
2. ГОСТ Р 59890-2021. Автомобильные транспортные средства. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Технические требования и методы испытаний на базе всемирной согласованной процедуры испытания транспортных средств малой грузоподъемности и испытаний в реальных условиях эксплуатации. Введ. 2022–04–01. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 280с.
3. Анализ характеристик современного оборудования для определения тягово-скоростных свойств автомобилей в лабораторных условиях / Н. В. Савенков, В. В. Понякин, С. А. Чекулаев, В. В. Бутенко // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16, № 3(67). – С. 276-289. – EDN TICXPC.
4. Обзор конструкций современных динамометрических стендов для испытаний колесных транспортных средств / К. Е. Бяков, В. В. Иваненков, В. Б. Холоденко, О. И. Чудаков // Транспортные системы. – 2021. – № 4(22). – С. 4-15. – DOI 10.46960/62045_2021_4_4. – EDN FFCOUE.
5. ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Введ. 2011–12–13. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 23 с.
6. О диагностике автомобильных гибридных силовых установок на стендах с беговыми барабанами / А. И. Федотов, О. С. Яньков, П. А. Киселев, Д. О. Ухватов // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 42-61. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-42-61. – EDN OUDNVJ.
7. Коншин, В. М. Методы и средства диагностирования в системе сервиса строительных и дорожных машин : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Сервис трансп. и технол. машин и оборудования (строит., дорож. и коммун. машины) направления подгот. дипломир. специалистов "Эксплуатация назем. трансп. и трансп. оборудования" / В. М. Коншин ; В. М. Коншин ; Моск. автомобил.-дорож. ин-т (гос. техн. ун-т). – Москва : МАДИ (ГТУ), 2004. – 117 с. – EDN QNRAJJ.

8. Toyota-Tech Toyota Service Information — Официальный ресурс Toyota Motors Company. – URL: <http://www.toyota-tech.eu/> (дата обращения 12.12.2024).
9. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 287-298. – DOI 10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298. – EDN TODPUE.
10. Разработка модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino / А. С. Ереско, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско [и др.] // Механики XXI века. – 2017. – № 16. – С. 82-85. – EDN YTWCQV.
11. Васильев, А. В. Совершенствование диагностирования электромагнитных форсунок бензиновых двигателей на основе оценки их динамической производительности / А. В. Васильев, Д. С. Березюков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. – 2012. – № 6. – С. 11-15. – EDN PEUEKL.
12. Горожанкин, С.А. Определение расхода топлива бензинового ДВС с рампой тупикового типа при работе на переходных режимах / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков // Вестник Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля. – 2013. – № 15. – С. 268-273.

References

1. Dvigateli avtomobil'nye. Metody stendovyh ispytaniy, GOST 14846-2020 (Automotive engines. Bench test methods, State Standart 14846-2020), Moscow, Standartinform, 2020, 96 p.
2. Avtomobil'nye transportnye sredstva. Vybrosoy zagryaznyayushchih veshchestv s otrabotavshimi gazami. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy na baze vseмирnoj soglasovannoy procedury ispytaniya transportnyh sredstv maloj грузопод'емности i ispytaniy v real'nyh usloviyah ekspluatatsii, GOST R 59890-2021 (Automotive vehicles. Emissions of pollutants from exhaust gases. Specifications and test methods based on the worldwide harmonized light duty vehicle testing procedure and field-testing, State Standart 59890-2021), Moscow, Rossijskij institut standartizacii, 2022, 280 p.
3. Savenkov N.V., Ponyakin V.V., Chekulaev S.A., Butenko V.V. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta, 2019, vol. 16, no. 3(67), pp. 276-289.
4. Byakov K.E., Ivanenkov V.V., Holodenko V.B., Chudakov O.I. Transportnye sistemy, 2021, no. 4(22), pp. 4-15.
5. Avtomobil'nye transportnye sredstva. Toplivnaya ekonomichnost'. Metody ispytaniy, GOST R 54810-2011 (Automotive vehicles. Fuel efficiency. Test methods, State Standart 54810-2011), Moscow, Standartinform, 2012, 23 p.
6. Fedotov A.I., Yan'kov O.S., Kiselev P.A., Uhvatov D.O. International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 42-61, DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-42-61.

7. Konshin V.M. *Metody i sredstva diagnostirovaniya v sisteme servisa stroitel'nyh i dorozhnyh mashin: ucheb. posobie* (Methods and means of diagnostics in the service system of construction and road machines: textbook. allowance), Moscow, *MADI (GTU)*, 2004, 117 p.
8. Toyota-Tech Toyota Service Information — Official resource Toyota Motors Company. — available at: <http://www.toyota-tech.eu/> (12.12.2024).
9. Firago B.I., Aleksandrovskij S.V. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG*, vol. 61, no. 4 (2018), pp. 287–298, DOI 10.21122/1029-7448-2018-61-4-287-298.
10. Eresko A.S., Eresko S.P., Eresko T.T., Kukushkin Ye.V., Orlov A.A. *Mekhaniki XXI veku*, 2017, no. 16, pp. 82-85.
11. Vasil'ev A.V., Berezyukov D.S. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10: Innovacionnaya deyatel'nost'*, 2012, no. 6, pp. 11-15.
12. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V. *Vestnik Vostochnoukrainskogo nacional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya*, 2013, no. 15, pp. 268-273.

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

Информация об авторах

Золотарев Олег Олегович, ст. преподаватель, ДОННАСА.
Савенков Никита Владимирович, канд. техн. наук, доц., ДОННАСА.

Information about the authors

Zolotarev Oleg O., senior lecturer, DONNACEA.
Savenkov Nikita V., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, DONNACEA.

Статья поступила в редакцию 15.02.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 16.09.2025.

The article was submitted 15.02.2025; approved after reviewing 15.09.2025; accepted for publication 16.09.2025.