



ISSN 1993-3495 online

СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

2023, ТОМ 19, НОМЕР 1, 5–14

EDN: NHIWNR

УДК 629.3.01

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВС

Н. В. Савенков¹, Ф. Е. Матюхин², В. И. Гапонов³

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, Российская Федерация, 286123.

E-mail: ¹ n.v.savenkov@donnasa.ru, ² alex060703@mail.ru, ³ gaponovaiakovlieva81@mail.ru

Получена 20 февраля 2023; принята 24 марта 2023.

Аннотация. Приведенный материал относится к одному из циклов статей авторов, направленных на дополнение и совершенствование методик для математического описания (аппроксимации) зависимостей эффективных показателей автомобильных ДВС по внешней скоростной характеристике. В материале статьи предложена усовершенствованная методика математического моделирования внешней скоростной характеристики (ВСХ) эффективной мощности автомобильного ДВС. Представлены частные рекомендации для граничных участков как для предлагаемой, так и для традиционной методики С. Р. Лейдермана. Для определения коэффициентов полиномиальной зависимости авторами приняты соответствующие условия и ограничения, с учетом которых составлена система линейных алгебраических уравнений, необходимых для расчёта коэффициентов предложенной функции. Приведены примеры применения предложенной методики для описания ВСХ некоторых серийных автомобильных двигателей, выбранных в качестве примера, в том числе и роторно-поршневых. Результаты могут быть применены как в учебных целях, так и для решения отдельных инженерных задач.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, внешняя скоростная характеристика, эффективная мощность, функция Лейдермана, полиномиальная зависимость, форма кривых, рабочий процесс, функциональные зависимости, аппроксимация данных.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ШВИДКІСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВЗ

М. В. Савенков¹, П. Є. Матюхін², В. І. Гапонов³

ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, Російська Федерація, 286123.

E-mail: ¹ n.v.savenkov@donnasa.ru, ² alex060703@mail.ru, ³ gaponovaiakovlieva81@mail.ru

Отримана 20 лютого 2023; прийнята 24 березня 2023.

Анотація. Наведений матеріал відноситься до одного з циклів статей авторів, спрямованих на доповнення і вдосконалення методик для математичного опису (апроксимації) залежностей ефективних показників автомобільних ДВЗ за зовнішньою швидкісною характеристикою. У матеріалі статті запропоновано вдосконалену методику математичного моделювання зовнішньої швидкісної характеристики (ЗШХ) ефективної потужності автомобільного ДВЗ. Представлені окремі рекомендації для граничних ділянок як для запропонованої, так і для традиційної методики С. Р. Лейдермана. Для визначення коефіцієнтів поліноміальної залежності авторами прийняті відповідні умови і обмеження, з урахуванням яких складена система лінійних алгебраїчних рівнянь, необхідних для розрахунку коефіцієнтів запропонованої функції. Наведено приклади застосування запропонованої методики для опису ЗШХ деяких



серійних автомобільних двигунів, обраних як приклад, у тому числі і роторно-поршневих. Результати можуть бути застосовані як в навчальних цілях, так і для розв'язання окремих інженерних задач.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, зовнішня швидкісна характеристика, ефективна потужність, функція Лейдермана, поліноміальна залежність, форма кривих, робочий процес, функціональні залежності, апроксимація даних.

IMPROVEMENT OF METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF EXTERNAL HIGH-SPEED CHARACTERISTICS OF AN AUTOMOBILE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Nikita Savenkov¹, Philip Matyukhin², Vladislav Gaponov³

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,

2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, Russian Federation, 286123.

E-mail: ¹ n.v.savenkov@donnasa.ru, ² alex060703@mail.ru, ³ gaponovaiakovlieva81@mail.ru

Received 20 February 2023; accepted 24 March 2023.

Abstract. The given material refers to one of the cycles of the authors' articles aimed at supplementing and improving the methods for the mathematical description (approximation) of the dependencies of the effective indicators of automotive internal combustion engines on the external speed characteristic. In the material of the article, an improved method of mathematical modeling of the full-load curve (FLC) of the effective power of an automobile internal combustion engine is proposed. Particular recommendations for boundary sections are presented both for the proposed and for the traditional S. R. Leiderman methodology. To determine the coefficients of the polynomial dependence, the authors have adopted the appropriate conditions and restrictions, taking into account which a system of linear algebraic equations that are necessary for calculating the coefficients of the proposed function has been compiled. Examples of the application of the proposed methodology for the description of the full-load curve of some serial automobile engines selected as an example, including rotary piston engines, are given. The results can be applied both for educational purposes and for solving individual engineering problems.

Keywords: internal combustion engine, full-load curve, effective power, Leiderman function, polynomial dependence, curve shape, work process, functional dependencies, data fitting.

Постановка проблеми

Внешняя скоростная характеристика ДВС представляет собой зависимости его эффективных показателей (развиваемой мощности N_e , создаваемого крутящего момента M_e , соответствующих удельного g_e и часового G расходов топлива) от частоты вращения коленчатого вала при полной подаче топлива и на установившемся режиме работы [1–5].

Скоростные характеристики автомобильных ДВС различных моделей имеют между собой схожую форму кривых эффективных показателей, т. к. подчиняются одинаковым физическим

законам, однако, как правило, по относительным значениям в ощутимой степени отличаются друг от друга, что обусловлено конструкционными отличиями и индивидуальными настройками систем управления рабочими процессами [6].

Определение индикаторных, а затем и эффективных показателей ДВС расчётным способом [7,8], на основании выполнения серии термодинамических расчётов, протекающих в двигателе рабочих процессов, во-первых, является достаточно трудоёмким, а во-вторых, сопряжён с необходимостью принятия на начальных этапах множества параметров и характеристик ДВС либо приближённо, либо требует для более

точного их определения проведения комплекса экспериментальных исследований. Это главным образом обуславливает степень достоверности такого расчёта. А поэтому, в преимущественном большинстве случаев, такой расчёт применяется для определения эффективных показателей только на номинальном режиме работы ДВС. Дальнейший расчёт ВСХ выполняется уже по различным эмпирическим формулам. Для этого применяется множество методик и подходов математического описания внешних и частичных скоростных характеристик автомобильных ДВС, в т. ч. с дополнительным учётом влияния неустановившихся режимов работы; наиболее достоверным является применение кусочно-заданных функций, в т. ч. сплайн-функций (например, [9]), с помощью которых выполняется аппроксимация экспериментальных данных.

С определённой долей достоверности для каждого отдельного случая применения в отношении конкретной модели ДВС в настоящее время достаточно часто для описания функциональной зависимости эффективной мощности по ВСХ в образовательных и инженерных целях применяется упрощенная универсальная методика, представленная уравнением С. Р. Лейдермана (далее – функция Лейдермана) [1].

Как было ранее установлено авторами [10], физический смысл функция Лейдермана сохраняет только при определенных сочетаниях коэффициентов приспособляемости ДВС по крутящему моменту K_M и по частоте вращения K_W . Это показано на рисунке 1а.

В таблице 1 в качестве примера приведены основные показатели и параметры некоторых серийных автомобильных ДВС, которые имеют сочетания коэффициентов K_M и K_W , принадлежащие области рисунка 1а, для которой функция Лейдермана физического смысла не имеет.

Таким образом, очевидно, что функция Лейдермана была разработана главным образом для ДВС соответствующей эпохи, которые обладают преимущественно механическими системами управления рабочими процессами.

В табл. 1 использованы следующие обозначения:

N_{emax} – эффективная мощность ДВС, развиваемая на номинальном режиме;

M_{emax} – максимальный создаваемый эффективный крутящий момент;

n_N, n_M – соответственно, номинальная частота вращения коленчатого вала и частота вращения при максимальном крутящем моменте M_{emax} ;

M_N – крутящий момент ДВС на номинальном режиме работы ($M_N = 9550 \times N_{\text{emax}} / n_N$)

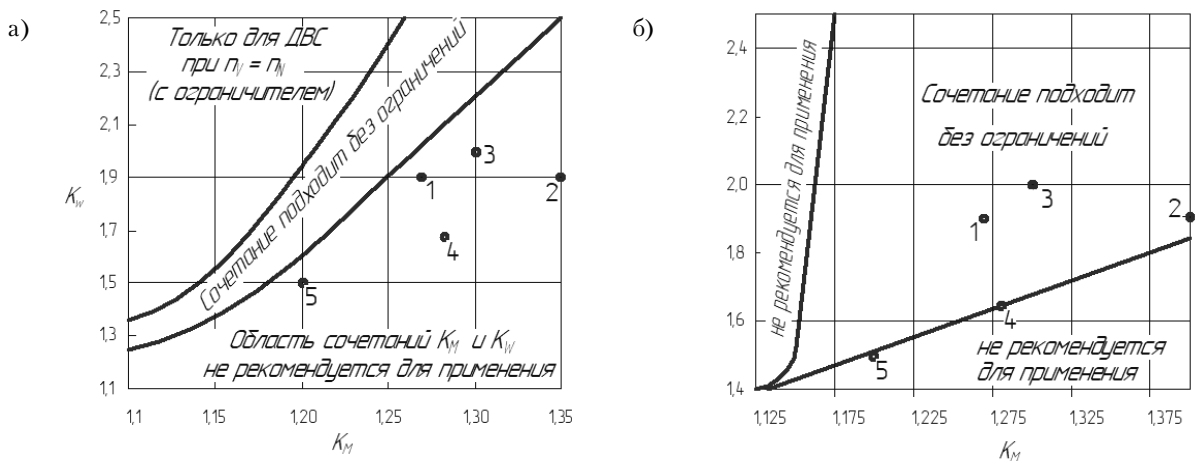


Рисунок 1. Области допустимых значений коэффициентов K_M и K_W для различных функций ВСХ эффективной мощности:

а) для полиномиальной функции ВСХ 3-й степени (зависимость Лейдермана);

б) для предлагаемой в настоящей статье полиномиальной функции 4-й степени.

Таблица 1. Основные показатели некоторых моделей серийных автомобильных ДВС, коэффициенты K_M и K_W , которых не позволяют применить функцию Лейдερмана

№	Модель ДВС	Модель АТС	$N_{\text{еmax}}$, кВт	$M_{\text{еmax}}$, Нм	n_N , мин ⁻¹	n_M , мин ⁻¹	M_N , Н·м	K_M	K_W
1	Mercedes OM 611 (413 CDI)	Sprinter 213 CDI	100	320	3100	1 800–2 280	251	1,27	1,9
2	Mercedes OM 611- (411 CDI)	Sprinter 211 CDI	80	280	3800	1 000–2 400	201	1,39	2,376–1,58
3	Opel A16XHT	Opel Insignia	125	280	6000	1 750–4 200	215	1,3	2
4	Mazda 12A	Mazda RX-7	120	226	6500	4 000	176	1,28	1,625
5	Mazda 12A Turbo	Mazda RX-8	121	231	6000	4 000	193	1,2	1,5

$N_{\text{еmax}}$ – эффективная мощность ДВС, развиваемая на номинальном режиме;
 $M_{\text{еmax}}$ – максимальный создаваемый эффективный крутящий момент;
 n_N, n_M – соответственно, номинальная частота вращения коленчатого вала и частота вращения при максимальном крутящем моменте $M_{\text{еmax}}$;
 M_N – крутящий момент ДВС на номинальном режиме работы ($M_N = 9\,550 \cdot N_{\text{еmax}} / n_N$)

Основная цель статьи

Предложить усовершенствованную методику математического моделирования внешней скоростной характеристики эффективной мощности для ДВС, применение для которых функции Лейдερмана невозможно в силу имеющихся ограничений; выполнить исследования на примере конкретных серийных автомобильных ДВС; предложить частные рекомендации для гранич-

ных участков традиционной методики и расширить область её применения.

Основной материал исследования

Пример ВСХ автомобильного ДВС без ограничителя максимальной частоты вращения коленчатого вала приведен на рисунке 2. В общем случае, при работе двигателя по ВСХ с ростом частоты вращения коленчатого вала крутящий

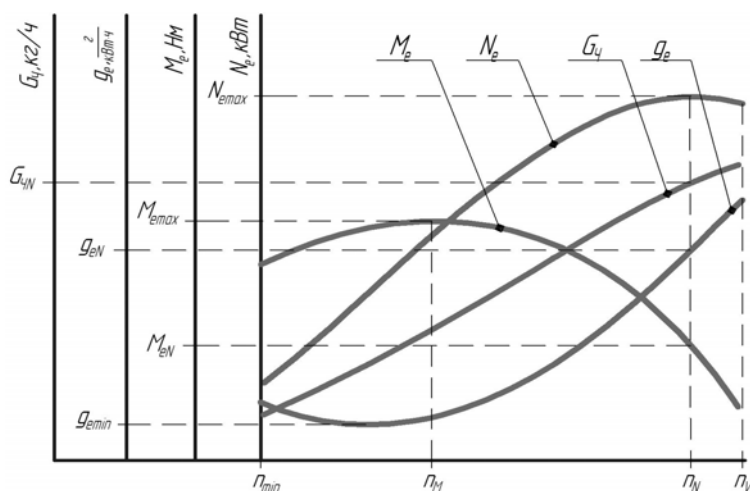


Рисунок 2. ВСХ автомобильного ДВС.

момент сначала увеличивается до максимального значения $M_{e\max}$, а затем начинает снижаться; дальнейший рост эффективной мощности после точки n_N (номинальный режим работы) уже не может быть компенсирован за счет увеличения частоты вращения, что в итоге приводит к уменьшению величины развиваемой эффективной мощности N_e . Данные закономерности главным образом обусловлены механическими потерями в ДВС, параметрами газораспределительного механизма, особенностями процессов смесеобразования и сгорания, а также инерционными явлениями в системах впуска и выпуска.

Эмпирическая функция Лейдермана, традиционно применяемая для математического описания ВСХ по эффективной мощности ДВС, имеет вид [1]:

$$N_e = f(n) = N_{e\max} \times \left[a \frac{n}{n_N} + b \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 + c \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right], \text{ кВт} \quad (1)$$

где $N_{e\max}$, N_e – номинальная и текущая эффективная мощность, развиваемая ДВС, кВт;
 n – текущее значение частоты вращения коленчатого вала, мин⁻¹;
 a, b, c – полиномиальные коэффициенты, которые для функции Лейдермана зависят от типа ДВС – упрощенный выбор рекомендован в соответствии с таблицей 2, [1], для более достоверного расчёта (при предварительно заданных коэффициентах приспособляемости ДВС по крутящему моменту K_M и по частоте вращения K_W) применяются формулы (2)–(4).

$$a = \frac{K_M \cdot K_W \cdot (2 - K_W) - 1}{K_W \cdot (2 - K_W) - 1}; \quad (2)$$

$$b = -\frac{2 \cdot K_W \cdot (K_M - 1)}{K_W \cdot (2 - K_W) - 1}; \quad (3)$$

$$c = \frac{K_W^2 \cdot (K_M - 1)}{K_W \cdot (2 - K_W) - 1}; \quad (4)$$

$$K_M = \frac{M_{e\max}}{M_{eN}}; \quad (6)$$

$$K_W = \frac{n_N}{n_M}. \quad (7)$$

С целью математического описания ВСХ эффективной мощности ДВС в более расширенной области возможных сочетаний параметров K_M и K_W (рисунок 1б), для которых не может быть применена функция Лейдермана, предлагается применение полиномиальной зависимости 4 степени:

$$N_e = f(n) = N_{e\max} \times \left[a \frac{n}{n_N} + b \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 + c \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 + d \left(\frac{n}{n_N} \right)^4 \right], \quad (8)$$

где a, b, c, d – полиномиальные коэффициенты (к коэффициентам функции (1) отношения не имеют).

Для определения коэффициентов рассматриваемой зависимости авторами предложены следующие условия (ограничения), направленные на сохранение физических закономерностей, определяющих форму кривых ВСХ:

1) при номинальной частоте вращения коленчатого вала ($n = n_N$) текущее значение развиваемой эффективной мощности равно её номинальному (максимальному) значению ($N_e = N_{e\max}$ и $dN_e(n_N)/dn = 0$);

2) при частоте вращения коленчатого вала ($n = n_M$) создаётся максимальный эффективный крутящий момент ($M_e = M_{e\max}$ и $dM_e(n_M)/dn = 0$);

перепишем зависимость (8) в относительных величинах (разделив на $N_{e\max}$) и заменив аргумент n/n_N на « x », а значение функции $N_e/N_{e\max}$ на « y »:

Таблица 2. Простейшие рекомендации по выбору коэффициентов функции Лейдермана

Тип ДВС	a	b	c
Карбюраторный	1	1	-1
Дизельный с неразделенной камерой сгорания	0,87	1,13	
Дизельный с предкамерой	0,6	1,4	
Дизельный с вихрекамерой	0,7	1,3	

$$y = ax + bx^2 + cx^3 + dx^4; \quad (9)$$

запишем для уравнения (9) принятые условия.

Условие № 1: ($y=1$ при $x=1$); при подстановке уравнение сводится к виду:

$$a + b + c + d = 1. \quad (10)$$

($dy/dx = 0$ при $x = 1$); при подстановке в (9)

уравнение сводится к виду:

$$dy/dx = a + 2bx + 3cx^2 + 4dx^3; \quad (11)$$

$$a + 2b + 3c + 4d = 0. \quad (12)$$

Условие № 2; для этого запишем уравнение крутящего момента по ВСХ:

$$M_e = 9550 \frac{N_e}{n}; \quad (13)$$

в относительных величинах:

$$m = \frac{M_e}{M_N} = 9550 \frac{N_e}{n \cdot M_N} = 9550 \frac{N_e \cdot n_N}{n \cdot 9550 \cdot N_{e\max}} = \frac{N_e \cdot n_N}{n \cdot N_{e\max}} = \frac{y}{x}; \quad (14)$$

$$m = \frac{y}{x} = \frac{ax + bx^2 + cx^3 + dx^4}{x} = a + bx + cx^2 + dx^3; \quad (15)$$

$$\frac{dm}{dx} = b + 2cx + 3dx^2, \quad (16)$$

где m – относительный (к номинальному) создаваемый крутящий момент ДВС;

таким образом, для условия $n = n_M$ при $M_e = M_{e\max}$ для уравнения (15) будут справедливы тождества $m = K_M$ при $x = 1/K_w$:

$$K_M = y \cdot K_w = a + b \cdot \frac{1}{K_w} + c \times \left(\frac{1}{K_w} \right)^2 + d \cdot \left(\frac{1}{K_w} \right)^3, \quad (17)$$

где коэффициент K_M в этом случае является относительным (к номинальному) значением крутящего момента по ВСХ, а параметр $1/K_w$ – относительной частотой вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте;

для условия $n = n_M$ при $dM_e(n_M)/dn = 0$ для уравнения (16) будут справедливы тождества $dm/dx = 0$ при $x = 1/K_w$:

$$b + 2c \cdot \frac{1}{K_w} + 3d \cdot \left(\frac{1}{K_w} \right)^2 = 0. \quad (18)$$

С учетом рассмотренных условий коэффициенты a, b, c, d определяются как результат совместного решения уравнений (10), (12), (17), (18). Для этого составлена система линейных уравнений (СЛАУ):

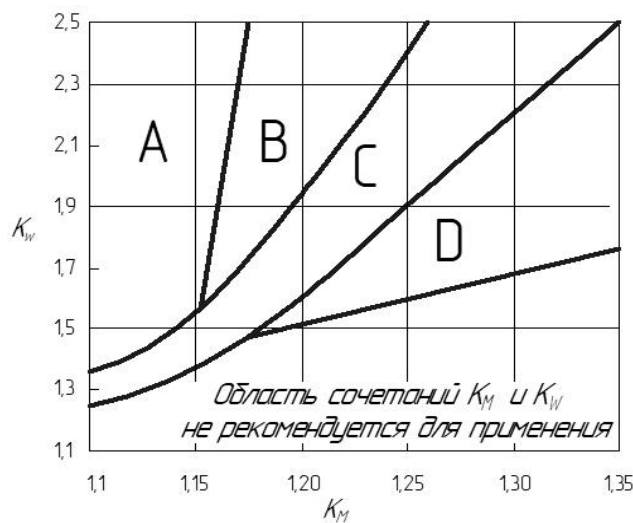


Рисунок 3. Рекомендации по выбору вида функции ВСХ для различных сочетаний коэффициентов K_M и K_w : А – функция Лейдермана для ДВС с ограничителем; В – функция Лейдермана для ДВС с ограничителем или полином 4-й степени; С – функция Лейдермана или полином 4-й степени; D – полином 4-й степени;

$$\left. \begin{aligned} a + b + c + d &= 1 \\ a + 2b + 3c + 4d &= 0 \\ a + \frac{b}{K_w} + \frac{c}{K_w^2} + \frac{d}{K_w^3} &= K_M \\ b + \frac{2c}{K_w} + \frac{3d}{K_w^2} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

После преобразования получаем матрицу коэффициентов (20) и матрицу значений (21):

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & \frac{1}{K_w} & \frac{1}{K_w^2} & \frac{1}{K_w^3} \\ 0 & 1 & \frac{2}{K_w} & \frac{3}{K_w^2} \end{pmatrix}; \quad (20)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ K_M \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Результаты решения СЛАУ (19) на предмет поиска корней (полиномиальных коэффициентов a, b, c, d) для различных сочетаний K_M и K_w приведены в таблице 3.

Соответствующие рекомендации по выбору вида функции для математического описания ВСХ при различных сочетаниях коэффициентов K_M и K_w приведены на рисунке 3.

При этом описать ВСХ эффективной мощности для областей рисунка 3 «А» и «В» с помощью функции Лейдермана возможно только в диапазоне $[n_{\min} \leq n \leq n_N]$, где n_{\min} , n_N – соответственно, минимальная и максимальная частоты вращения коленчатого вала. Таким образом, на режимах работы ДВС при $n > n_N$ должна применяться дополнительно заданная функция, моделирующая работу ограничителя или регулятора (т. е. работу в режиме регуляторной ветви).

В завершение стоит отметить, что авторами ранее была разработана универсальная методика [10], в которой предложена функция для аппроксимации ВСХ по эффективной мощности для автомобильных ДВС, функция эффективного крутящего момента по ВСХ которых имеет так называемую, «полку крутящего момента» – участок с относительно постоянным значением $M_{\text{емак}}$, что обеспечивается применением комплексных, в т. ч. мехатронных, систем управления рабочими процессами, систем изменения фаз газораспределения, комбинированных систем наддува и т. д. Для ДВС с такой формой характеристик по ВСХ применение рассматриваемых в настоящей статье функций не является рациональным [11, 12].

Вывод

В работе предложена усовершенствованная методика математического моделирования внешней скоростной характеристики автомобильного ДВС по эффективной мощности для таких сочетаний его коэффициентов приспособляемости по крутящему моменту и частоте вращения коленчатого вала, при которых применение традиционной функции Лейдермана сопряжено с нарушением допустимой формы кривых ВСХ, т. е. с нарушениям физического смысла характеристики. В статье выполнен сравнительный анализ ограничений применения предлагаемой функции в виде полинома 4-й степени, а также приведены примеры его практического применения для описания ВСХ некоторых серийных автомобильных двигателей, выбранных в качестве примера. Полученные результаты могут быть полезны научным сотрудникам, студентам, а также широкому кругу читателей. Рассматриваемая тема также будет интересна специалистам в сфере инженерии.

Литература

1. Литвинов, А. С. Автомобиль: теория эксплуатационных свойств. Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – Москва : Машиностроения, 1989. – 210 с. – Текст : непосредственный.
2. Development of test bench and characterization of performance in small internal combustion engines / J. Ausserer, P. Litke, A. Rowton [et. al.]. – Текст : электронный // SAE Technical Paper. – 2013. – URL: <http://papers.sae.org/2013-32-9036/> (дата обращения: 28.12.2022).
3. Durković, R. Regression models of specific fuel consumption curves and characteristics of economic operation of internal combustion engines / R. Durković, M. Damjanović. – Текст : непосредственный // Mechanical Engineering. – 2006. – № 4(1). – С. 17–26. (дата обращения: 28.12.2022).
4. Jiang, F. Software design of engine characteristic simulation / F. Jiang, M. Wang, L. Li. – Текст : непосредственный // Journal of Software. – 2012. – № 7(2). – С. 316–321. (дата обращения: 28.12.2022).
5. Горожанкин, С. А. Расчет тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобилей в современных эксплуатационных условиях : учебное пособие по дисциплине «Теория эксплуатационных свойств» для студентов направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» / С. А. Горожанкин, А. Д. Бумага, Н. В. Савенков. – Донецк : РА ДОН, 2019. – 244 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний = Automobile engines. Methods of bench tests : межгосударственный стандарт : издание официальное : утверждено и введено в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24.06.81 №3117 : взамен ГОСТ 14846-69 : дата введения 1982-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1990. – 42 с. – Текст : непосредственный.
7. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учебное пособие для вузов : 3-е издание переработано и дополнено / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – Москва : Высшая школа, 2002. – 496 с. – Текст : непосредственный.
8. Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК : официальный сайт. – URL: <https://diesel-rk.com/Rus/index.php?page=Main> (дата обращения: 19.01.2023). – Текст : электронный.
9. 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 СПС ГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2016. – № 3(217). – С. 35–47.

Reference

1. Litvinov, A. S.; Farobin, Ya. E. Automobile: theory of operational properties. Textbook for universities in the specialty «Automobiles and automotive economy». – Moscow : Mechanical engineering, 1989. – 210 p. – Text : direct. (in Russian)
2. Ausserer, J.; Litke, P.; Rowton, A. [et. al.]. Development of test bench and characterization of performance in small internal combustion engines. – Text : direct. – In: *SAE Technical Paper*. – 2013. – URL: <http://papers.sae.org/2013-32-9036/> (date of the application: 28.12.2022). (in English)
3. Durković, R; Damjanović, M. Regression models of specific fuel consumption curves and characteristics of economic operation of internal combustion engines. – Text : direct. – In: *Mechanical Engineering*. – 2006. – № 4(1). – P. 17–26. (date of the application: 28.12.2022). (in English)
4. Jiang, F.; Li, L. Software design of engine-characteristic simulation. – Text : direct. – In: *Journal of Software*. – 2012. – № 7(2). – P. 316–321. (date of the application: 28.12.2022). (in English)
5. Gorozhankin, S. A.; Bumaga, A. D.; Savenkov, N. V. Calculation of traction-speed and fuel-economic properties of automobiles in modern operating conditions : Thesis of D. Sc. in Engineering ; – Donetsk : RA DON, 2019. – 244 p. – Text : direct. (in Russian)
6. ГОСТ 14846-81. Automobile engines. Methods of bench tests. – Moscow : Standards Publishing House, 1990 – Text : direct. (in Russian)
7. Kolchin, A. I.; Demidov, V. P. Calculation of automobile and tractor engines : a textbook for universities : 3rd edition revised and supplemented. – Moscow : Vysshiaia shkola, 2002. – 496 p. – Text : direct. (in Russian)
8. DIESEL-RK software package: official site. – Text : electronic. – URL: <https://diesel-rk.com/Rus/index.php?page=Main> (date of the application: 19.01.2023). (in Russian)
9. Gorozhankin, S. A.; Shitov, A. A.; Savenkov, N. V. Techniques for approximation of dependences of several variables in the MS Excel and Mathcad software environment. – Text: direct. – In: *Scientific and technical statements of the SPS GPU. Computer science. Telecommunications. Control*. – 2016. – № 3 (217). – P. 35–47. (in Russian)
10. Savenkov, N. V.; Ponyakin V. V.; Bibikov V. V. A universal method for describing the full-load curve of automobile internal combustion engines with a torque shelf. – Text: direct. – In: *Journal of Automotive Engineers*. – 2018. № 3 (110). – P. 24–28. (in Russian)
11. Shatrov, M. G.; Golubkov, L. N.; Dunin, A. U. [et. al.]. Influence of high injection pressure on fuel injection performances and diesel engine working process – Text: direct. – In: *Thermal Science*. – 2015. – Volume 19, № 6. – P. 2245–2253. (in English)
12. Gillespie, T. D. Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale : SAE, 1992. – 495 p. (in English)

10. Савенков, Н. В. Универсальный способ описания внешних скоростных характеристик автомобильных ДВС, обладающих полкой крутящего момента / Н. В. Савенков, В. В. Понякин, В. В. Бибииков. – Текст : непосредственный // Журнал автомобильных инженеров. – 2018. – № 3(110). – С. 24–28.
11. Influence of high injection pressure on fuel injection performances and diesel engine working process / M. G. Shatrov, L. N. Golubkov, A. U. Dunin [et. al.]. – Текст : непосредственный // Thermal Science. – 2015. – Volume 19, – № 6. – P. 2245–2253.
12. Gillespie, T. D. Fundamentals of vehicle dynamics / T. D. Gillespie. – Warrendale : SAE, 1992. – 495 p. – Текст : непосредственный.

Савенков Никита Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: топливная экономичность автомобилей на неустановившихся режимах движения.

Матюхин Филипп Евгеньевич – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: рабочие процессы роторно-поршневых автомобильных ДВС.

Гапонов Владислав Игоревич – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: характеристики двигателя внутреннего сгорания.

Савенков Микита Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобільного транспорту, сервісу та експлуатації ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: паливна економічність автомобілів на несталіх режимах руху.

Матюхін Пилип Євгенович – магістрант кафедри автомобільного транспорту, сервісу та експлуатації ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: робочі процеси роторно-поршневих автомобільних ДВЗ.

Гапонов Владислав Ігорович – магістрант кафедри автомобільного транспорту, сервісу та експлуатації ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: характеристики двигунів внутрішнього згорання.

Savenkov Nikita – Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Head of the Automobile Transport, Service and Operation Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: fuel efficiency of automobiles on a transient regime of a machine.

Matyukhin Philip – master's student of the Automobile Transport, Service and Operation Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: working processes of rotary-piston automotive internal combustion engines.

Gaponov Vladislav – master student of the Automobile Transport, Service and Operation Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: characteristics of the internal combustion engine.