

УДК 517.272:621.431

В.Н. Торлин, профессор, д-р техн. наук,

И.В. Долгин, инженер

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

autosev@ukr.net

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФУНКЦИИ ЛЕЙДЕРМАНА УДЕЛЬНОГО ЭФФЕКТИВНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА

Изложен метод оценки параметров функции Лейдермана удельного эффективного расхода топлива по результатам стендовых испытаний поршневых ДВС. Приведены результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: *оценка, метод наименьших квадратов, дисперсия, погрешность, критерий.*

Постановка проблемы. На автотранспорте в настоящее время в качестве двигателей предпочтение отдается поршневым двигателям внутреннего сгорания (ДВС) множества модификаций, работающих на разнообразных видах углеводородного топлива [1]. Идентичность процессов преобразования химической энергии топлива в тепловую, а затем в механическую, происходящих внутри рабочего цилиндра, позволяет комплекс физико-химических, газодинамических и термодинамических процессов представить в единообразной форме полиномиальных моделей. Отличие моделей описания процессов в зависимости от особенностей конструктивной реализации выражается различием полиномиальных коэффициентов. Одной из основных моделей описания внешних скоростных характеристик является система функций Лейдермана. Для наиболее распространенных конструктивных модификаций поршневых ДВС используются полиномиальные коэффициенты Лейдермана, которые не учитывают состояние двигателя, его пробег, качество топлива и другие факторы, влияющие на экономичность, коэффициент приспособляемости, крутящий момент, эффективную мощность и другие технико-экономические показатели. Актуальной является задача коррекции коэффициентов функций Лейдермана на основании тестирования режимов работы ДВС.

Анализ последних публикаций и исследований. Одним из основных показателей экономичности двигателя является удельный эффективный расход топлива, который зависит от качества регулировки, условий эксплуатации и ряда других факторов, от воздействия которых он меняется, что влияет на величину коэффициентов Лейдермана. Аналитическая модель Лейдермана [1] представляет собой систему полиномиальных функций с постоянными коэффициентами, стандартные значения которых приведены в таблице 1. Изменение величины коэффициентов приводит к перемещению положения точки минимума характеристики расхода топлива.

Таблица 1 – Коэффициенты функций Лейдермана

Двигатели	A	B	C	A ₁	B ₁	C ₁
Карбюраторные	1	1	1	1,2	1	0,8
Дизельные						
с непосредственным впрыском	0,87	1,4	1	1,55	1,55	1
предкамерные	0,6	1,4	1	1,2	1,2	1
форкамерные	0,7	1,3	1	1,35	1,35	1

По результатам стендовых испытаний [3 – 4] можно уточнить параметры функций Лейдермана.

Цель статьи – оценка оптимального динамического диапазона внешней скоростной характеристики ДВС.

Изложение основного материала.

Внешняя скоростная характеристика поршневого двигателя состоит из [1] характеристики эффективной мощности

$$N_e = N_m \left(A \frac{n}{n_e} + B \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 - C \left(\frac{n}{n_e} \right)^3 \right), \quad (1)$$

где n – текущее значение частоты вращения коленчатого вала, об/мин; n_e – частота вращения, соответствующая максимальной мощности, об/мин; N_e – текущее значение эффективной мощности двигателя, кВт; N_m – максимальное значение эффективной мощности двигателя, кВт;

характеристики эффективного крутящего момента

$$M_e = M_k \left(A + B \frac{n}{n_e} - C \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где M_e – текущее значение крутящего момента, Н·м; $M_k = K_m N_m$ – значение крутящего момента при значении частоты вращения коленчатого вала двигателя, соответствующего максимальной мощности двигателя N_m , Н·м; K_m – масштабный коэффициент; $K_m = 3 \cdot 10^4 / n_e \pi$;

характеристики эффективного расхода топлива

$$G_e = G_m \left(A_1 - B_1 \frac{n}{n_e} + C_1 \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 \right) \quad (3)$$

где G_e - текущий удельный расход топлива, г/кВт·ч; G_m - удельный расход топлива при максимальной мощности, г/кВт·ч;

характеристики часового расхода топлива

$$G_t = 10^{-3} G_e N_e, \quad (4)$$

кривой среднего эффективного давления

$$P_e = \frac{k_e N_e T}{V_c n}, \quad (5)$$

где V_c – объем двигателя, л; T – тактность двигателя, k_e – масштабный коэффициент.

Помимо указанных есть и другие характеристики, получаемые расчетным путем.

Таким образом, значение функции удельного эффективного расхода топлива (3) и её производные функции помимо коэффициентов A_1, B_1 и C_1 зависят от значений коэффициентов A, B, C и параметров M_k и N_m , определяющих эффективную мощность и момент двигателя, так как влияют на выбор величины G_m , что осложняет анализ характеристики удельного эффективного расхода топлива ДВС.

Рассмотрим методику получения параметров функций Лейдермана по результатам стендовых испытаний поршневых ДВС для идентификации функции удельного эффективного расхода топлива.

Для упрощения анализа преобразуем характеристики (1)-(3), сведя их к безразмерной форме

$$\begin{aligned} F_n &= x(A + Bx - Cx^2); \\ F_m &= A + Bx - Cx^2; \\ F_g &= A_1 - B_1x + C_1x^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где $F_n = N_e / N_m$; $F_m = M_e / K_m N_m$; $F_g = G_e / G_m$; $x = n / n_e$.

Каждая из функций (6) испытывает экстремум, значение которого можно определить в результате аналитического исследования. Взяв производные этих функций и приравняв их нулю, получим

$$\begin{aligned} A + 2B - 3Cx^2 &= 0; \\ B - 2Cx &= 0; \\ B_1 - 2C_1x &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Решив каждое из уравнений (7), найдем абсциссу и ординату положения экстремума функций:

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{B + \sqrt{B^2 + 3AC}}{3C} - \text{абсцисса максимума функции } F_n; \\ F_{n \max} &= \frac{x_n(2A + x_n B)}{3} - \text{значение максимума функции } F_n; \\ x_m &= \frac{B}{2C} - \text{абсцисса максимума функции } F_m; \\ F_{m \max} &= A + \frac{x_m B}{2} - \text{значение максимума функции } F_m; \\ x_g &= \frac{B_1}{2C_1} - \text{абсцисса минимума функции } F_g; \\ F_{g \min} &= A_1 - \frac{x_g B_1}{2} - \text{значение минимума функции } F_g. \end{aligned}$$

Для получения рассматриваемых характеристик необходимо вычислить коэффициенты Лейдермана, минимальный эффективный расход топлива G_{\min} , максимальный эффективный вращающий момент M_m и максимальную эффективную мощность N_m , которые связаны соотношением

$$M_m = k_m N_m / n_m, \quad (8)$$

где k_m – коэффициент пропорциональности

В качестве примера на рисунке 1 изображены функции (6) для предкамерного ДВС, где масштабным коэффициентом является n_e по оси абсцисс x . По оси ординат F масштабными коэффициентами служат G_m – для характеристики эффективного расхода топлива, N_m – для характеристики эффективной мощности, M_m – для характеристики эффективного крутящего момента.

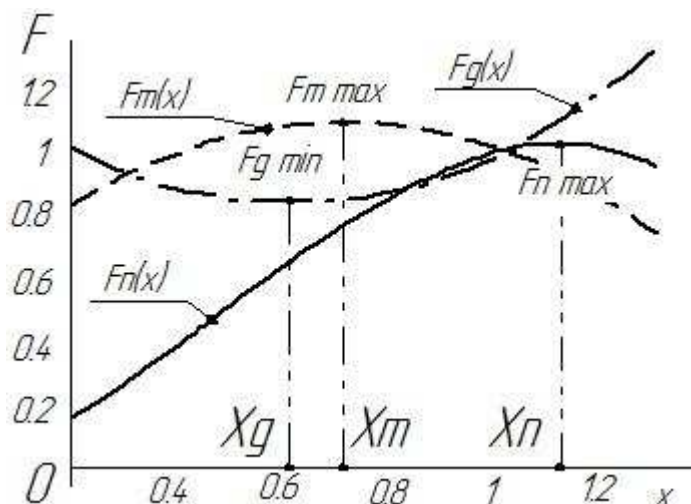


Рисунок 1 – Графики нормированной внешней скоростной характеристики

Получаемые в процессе стендовых испытаний данные содержат случайную погрешность, величина которой зависит от класса точности измерительного средства. Для снижения влияния случайной погрешности можно применить процедуру аппроксимации. Одной из наиболее удобных является аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК), суть которой состоит в том, что по каждому из параметров находится разность производных приближаемой и приближающей функций и вычисляется минимум ее квадрата для всех точек измерения [2]. Решение полученной таким образом системы уравнений, число которых равно числу искомых параметров, позволяет найти их значения. Применяя метод наименьших квадратов [3 – 4], можно найти G_{\min} , G_m , M_m и N_m .

Описание изменения множества функций $F = \{F_n(x), F_m(x), F_g(x)\}$ вблизи точек экстремума получим для каждой составляющей внешней скоростной характеристики ДВС

$$D_n = F_{n \max} - F_n;$$

$$D_m = F_{m \max} - F_m;$$

$$D_g = F_g - F_{g \min}.$$

На рисунке 2 изображены графики изменения функций множества F составляющих внешней скоростной характеристики ДВС в окрестности точки экстремума характеристики удельного эффективного расхода топлива D_g для эффективной мощности D_n и эффективного крутящего момента D_m при изменениях режима работы двигателя.

На рисунке 2 нанесена линия $q = 0,1$ соответствующая 10% изменения. Точечной штриховкой выделена область, ограниченная допустимым изменением расхода топлива, что позволяет оценить изменение силовых параметров двигателя при наложенных ограничениях по допустимому уровню q расхода топлива.

Проведенный анализ позволяет предложить версию процедуры идентификации функций Лейдермана.

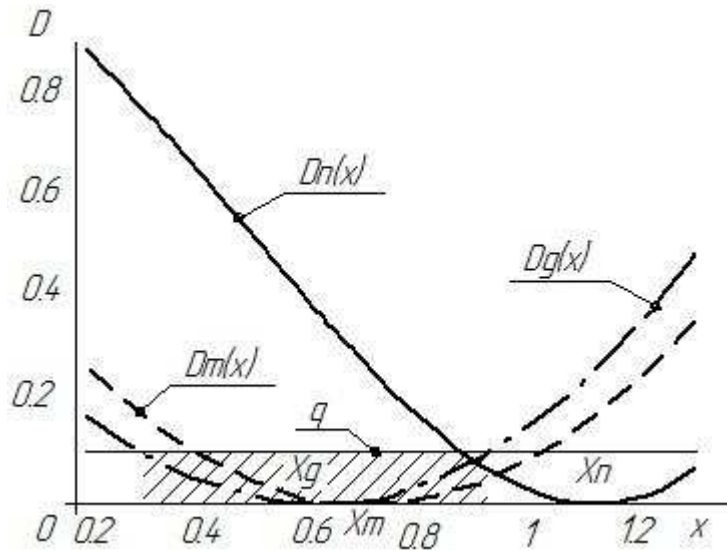


Рисунок 2 – Относительное превышение расхода топлива

Версия реализации методики.

По результатам испытаний требуется найти параметры характеристики удельного эффективного расхода топлива G_{min}, G_m и коэффициенты Лейдермана $A_1; B_1; C_1$. В виду их функциональной взаимосвязи получение искомым параметров удобно производить в следующем порядке:

- методом наименьших квадратов найти приближающую функцию эффективного расхода топлива $y(x)$,
- исследовать ее на экстремум и получить значение G_{min} ,
- вычислить коэффициенты $A_1; B_1; C_1$,
- для произвольного значения x в пределах допустимых значений, ограниченных режимом холостого хода и предельно допустимым режимом, вычислить $G_m = y(x)/F_g(x)$.

При таком подходе отпадает необходимость вычисления параметров остальных функций Лейдермана, что упрощает решение задачи.

Процедура МНК приближения.

Рассмотрим методику МНК приближения функции удельного эффективного расхода топлива G_e с помощью математического пакета прикладных программ Maple. По таблице 2 измерений значений функции удельного эффективного расхода топлива $Y(x) = G_e(x)$

Таблица 2 – Таблица значений функции $Y(x)$

Результаты измерений	$Y(x)$	$Y(x_1)$	$Y(x_2) \dots$	$Y(x_m)$
	x	x_1	$x_2 \dots$	x_m
Приближающая функция	$y(x)$	$y(x_1)$	$y(x_2) \dots$	$y(x_1)$

Сформируем множество ординат $Y_i = Y(x_i)$, множество абсцисс $X_i = x_i$ и применим пакет программ решения системы линейных уравнений **solve(.)** для приближающей полиномиальной функции $y(x)$ n -го порядка

$$y(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i,$$

приняв $n = 2$, для заданного числа измерений m .

В результате решения будут получены значения коэффициентов $a_0; a_1; a_2$ приближающей функции $y(x)$, которая определена в диапазоне допустимых значений $x = [x_1, x_m]$.

Определение минимального значения удельного эффективного расхода топлива.

Следующий этап состоит в определении минимального значения удельного эффективного расхода топлива G_{\min} , которое является минимумом приближающей функции $y(x)$ и может быть определено с помощью Maple – оператора **minimize** в формате

$$G_{\min} := \text{minimize}(y, x=0..x_0);$$

где $x_0 = n_0/n_e$, n_0 – максимально допустимая относительная частота вращения коленчатого вала двигателя.

Положение точки минимума удельного эффективного расхода x_g можно найти в результате решения уравнения $y(x) = G_{\min}$ относительно переменной x

$$x_g := \text{max}(\text{solve}(y=G_{\min}, x));$$

либо вычислить по формуле $x_g = \frac{B_1}{2C_1}$, полученной в результате предыдущего анализа.

Вычисление коэффициентов функции Лейдермана.

Зная значения коэффициентов $a_0; a_1; a_2$ приближающей функции $y(x)$, можно определить коэффициенты Лейдермана

$$A_1 = a_0/a_2; B_1 = a_1/a_2; C_1 = a_2/a_2 = 1.$$

Имитационная модель.

Проверка корректности изложенной методики реализована с помощью процедуры имитационного моделирования. Для предкамерного ДВС (таблица 1) при значении $G_m = 300$ сформирована таблица 2, где $Y(x_j) = G_k(F_g(x_j) + \xi_j)$, ξ_j – случайная погрешность ($j = [1 \dots m]$) равномерно распределенная в интервале $\pm E$, $E = 10^{-2}$ – погрешность измерений, $m = 20$, в заданном диапазоне относительных частот вращения $x = [x_j \dots x_0]$, x_j – относительная частота вращения режима холостого хода, x_0 – максимальная относительная частота вращения коленчатого вала двигателя.

На рисунке 3 изображена приближаемая $Y(x)$ и приближающая $y(x)$ функции, нанесено значение минимального удельного эффективного расхода топлива G_{\min} и удельного эффективного расхода топлива при максимальной мощности G_m .

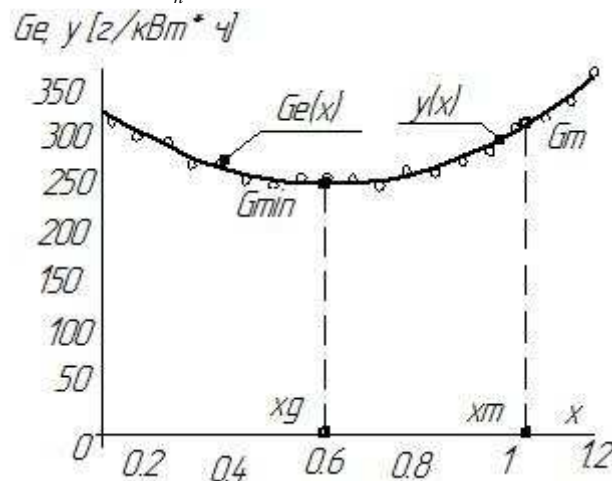


Рисунок 3 – Результат приближения

На рисунке 4 изображена кривая погрешности приближения в заданном диапазоне относительных частот вращения $[x_j \dots x_0]$ коленчатого вала двигателя.

Величина максимальной относительной погрешности приближения составила 1,1% при погрешности измерений удельного эффективного расхода топлива двигателя 1%. Рассчитаны основные параметры модели: $G_m = 305,54 \setminus 300$; $G_{\min} = 252,01 \setminus 252$; $x_m = 1,04 \setminus 1$; $x_g = 0,597 \setminus 0,6$; $A_1 = 1,1781 \setminus 1,2$; $B_1 = 1,193 \setminus 1,2$; $C = 1,0 \setminus 1,0$.

В указанных значениях параметров через косую черту приведены ожидаемые (теоретические) значения.

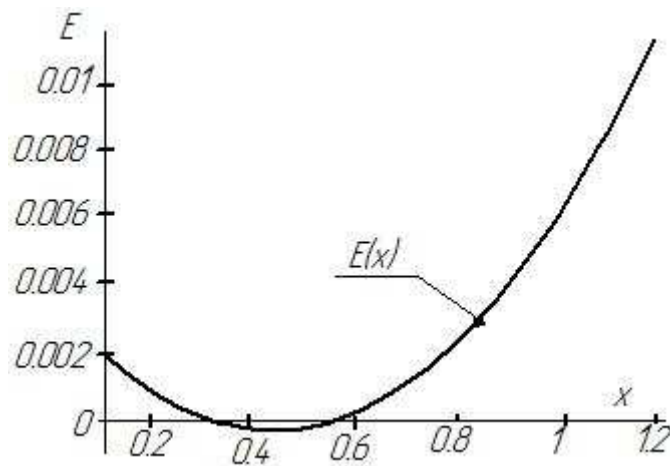


Рисунок 4 – График погрешности МНК аппроксимации

Необходимо отметить, что существует возможность повышения качества модели, так как с увеличением числа измерений погрешность приближения и результатов вычисления параметров снижается.

Вывод

В результате проведенного анализа предложена методика идентификации функции удельного эффективного расхода топлива и ее производных, которая может быть использована для коррекции рабочего режима ДВС при изменении его параметров в процессе эксплуатации, качества топлива и других изменениях внешних и внутренних факторов.

Дальнейшие перспективы исследований.

В качестве задач для дальнейших исследований следует считать разработку методик идентификации функций мощности и момента двигателя.

Библиографический список использованной литературы

1. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов. — М.: Высш. шк., 2002. — 496 с.
2. Хемминг Р.В. Численные методы / Р.В. Хемминг. — М.: Наука, 1972. — 400 с.
3. Купач Р.С. Модель оценки коэффициентов Лейдермана по результатам стендовых испытаний / Р.С. Купач, И.В. Долгин, В.А. Ксенофонтова // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: матер. междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Севастополь, 17–19 апреля 2012 г. — Севастополь, 2012. — С. 80–82.
4. Богомольный Б.С. Процедура локализации максимума функции эффективной мощности поршневых ДВС / Б.С. Богомольный, В.П. Долгин // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: матер. междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Севастополь, 17–19 апреля 2012 г. — Севастополь, 2012. — С. 63–64.

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.

Торлін В.М., Долгін І.В. Ідентифікація функції Лейдермана питомої ефективної витрати палива

Висловлений метод оцінки параметрів функції Лейдермана питомої ефективної витрати палива за наслідками стендових випробувань поршневих ДВС. Приведені результати імітаційного моделювання.

Ключові слова: оцінка, метод найменших квадратів, дисперсія, погрішність, критерій.

Torlin V.N., Dolgin I. Authentication of the Leyderman function specific effective expense of fuel

The method of estimation of parameters of the Leyderman function of specific effective expense of fuel on results stand tests of ICE pistons is expounded. The results of imitation design are given.

Keywords: estimation, least-squares method, dispersion, defect, criterion.