

УДК 656.135

Сопин Павел Константинович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и транспорт», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: pavel.sopin@gmail.com

Огрызков Сергей Витальевич, старший преподаватель кафедры «Приборостроение и транспорт», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: ogrizkov@mail.sevsu.ru

Мешков Владимир Викторович, канд. техн. наук, проректор по развитию, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: meshkov@mail.sevsu.ru

Ветрогон Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и транспорт», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

e-mail: vetrogon@mail.sevsu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИЙ С.Р. ЛЕЙДЕРМАНА

Аннотация. Статья посвящена идентификации параметров математической модели внешней скоростной характеристики ДВС на основе функций Лейдермана. Предложена методика уточнения коэффициентов Лейдермана и экстремальных параметров. Разработан алгоритм аппроксимации методом наименьших квадратов с пакетом Maple. Выполнен анализ функций в безразмерной форме, найдены выражения для экстремумов. Приведены результаты имитационного моделирования, подтверждающие высокую точность метода. Предложенный подход позволяет учитывать дрейф

эксплуатационных параметров двигателя.

Ключевые слова: метод наименьших квадратов, двигатель внутреннего сгорания, внешняя скоростная характеристика, функции Лейдермана, аппроксимация.

Pavel Konstantinovich Sopin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Instrument Engineering and Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: pavel.sopin@gmail.com

Ogryzkov Sergey Vitalievich, Senior Lecturer, Department of Information Technologies and Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: ogrizkov@mail.sevsu.ru

Meshkov Vladimir Viktorovich, Ph.D. (Eng.), Vice-Rector for Development, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: meshkov@mail.sevsu.ru

Vetrogon Aleksandr Anatol'evich, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Instrument Engineering and Transport, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

e-mail: vetrogon@mail.sevsu.ru

DETERMINATION OF THE ENGINE EXTERNAL SPEED CHARACTERISTICS PARAMETERS USING S.R. LEYDERMAN FUNCTIONS

Abstract. The article is devoted to the identification of parameters of a mathematical model of the external speed characteristic of an internal combustion engine based on Leyderman functions. A method for refining the Leyderman coefficients and extreme parameters is proposed. An approximation algorithm using the least squares method with the Maple package is developed. The analysis of functions in dimensionless form is performed, and expressions for extrema are found. The results of simulation modeling confirming the high accuracy of the method are

presented. The proposed approach allows taking into account the drift of operational parameters of the engine.

Keywords: least squares method, internal combustion engine, external speed characteristic, Leyderman functions, approximation.

1. Введение. Скоростные характеристики поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) могут быть построены аналитически по функциям С.Р. Лейдермана [1–4]. Аналитическая модель Лейдермана не учитывает конструктивных особенностей конкретной модификации двигателя (число и расположение цилиндров в блоке, конструктивные особенности коленчатого вала, особенности газораспределения), влияния воздействия окружающей среды (температура, влажность воздуха, атмосферное давление) и ряда других факторов, являющихся следствием эксплуатации транспортного средства (пробег, качество топлива, настройка топливной аппаратуры и прочих).

Таким образом, для практического применения требуется уточнение параметров модели по результатам стендовых испытаний.

2. Основная часть. По результатам стендовых испытаний необходимо уточнить параметры функций Лейдермана, позволяющих построить внешнюю скоростную характеристику поршневого двигателя внутреннего сгорания на основе следующих аналитических зависимостей.

Эффективная мощность:

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

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.

Характеристика эффективного крутящего момента:

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

где M_e – текущее значение крутящего момента, Н·м;

$M_k = K_m \cdot N_m$ – значение крутящего момента и значение частоты вращения коленчатого вала двигателя, соответствующее максимальной мощности двигателя N_m , Н·м;

K_m – масштабный коэффициент, $K_m = 3 \cdot 10^4 / n_e \pi$.

Характеристика эффективного расхода топлива:

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

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:

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

Кривая среднего эффективного давления:

$$P_e = 30 N_e T / V_c n, \quad (5)$$

где V_c – объем двигателя, л; T – тактность двигателя.

Для представления экспериментальных данных в форме функций Лейдермана необходима процедура уточнения параметров функций Лейдермана по результатам испытаний ДВС.

2.1 Решение задачи. Параметрами, которые необходимо оценить при обработке результатов испытаний, являются: коэффициенты функций Лейдермана и экстремальные значения характеристик – эффективной мощности N_m , крутящего момента M_m , коэффициент приспособляемости двигателя $K_z = M_m / M_n$, где M_n – крутящий момент при частоте вращения, соответствующей максимальной мощности, и расхода топлива $G_{\min}$.

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

$$F_n = N_e / N_m; F_m = M_e / M_k; F_g = G_e / G_m; x = n/n_e \quad (6)$$

Функции (6) имеют экстремумы [5, 10–13]. Взяв производные и

приравняв их нулю, получим:

$$A + 2Bx - 3Cx^2 = 0; B - 2Cx = 0; B_1 - 2C_1x = 0 \quad (7)$$

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

$$x_n = B + \sqrt{B^2 + 3AC} / 3C - \text{абсцисса максимума функции } F_n;$$

$$F_{n\max} = x_n(2A + x_n B) / 3 - \text{значение максимума функции } F_n;$$

$$x_m = B / 2C - \text{абсцисса максимума функции } F_m;$$

$$F_{m\max} = A + x_m B / 2 - \text{значение максимума функции } F_m;$$

$$x_g = B_1 / 2C_1 - \text{абсцисса минимума функции } F_g;$$

$$F_{g\min} = A_1 + x_m B_1 / 2 - \text{значение минимума функции } F_g.$$

В качестве примера на рисунке 1 изображены функции (6) для ДВС с непосредственным впрыском, где масштабным коэффициентом по оси абсцисс является n_e . По оси ординат $-G_m$, N_m , M_k .

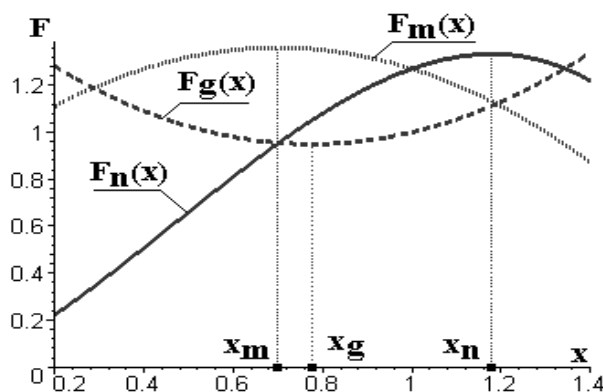


Рисунок 1 – Графики нормированной внешней скоростной характеристики

Данные стендовых испытаний содержат случайную погрешность, величина которой зависит от класса точности измерительного средства. Для снижения влияния случайной погрешности применяется аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК). Суть метода — нахождение минимума квадрата отклонения аппроксимирующей функции для всех точек измерения [4–6].

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

$$\begin{aligned} D_n &= F_{n\max} - F_n; \\ D_m &= F_{m\max} - F_m; \\ D_g &= F_g - F_{g\min}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рисунке 2 изображены графики изменения функций множества F составляющих внешней скоростной характеристики ДВС в окрестности точки экстремума характеристики эффективного расхода топлива D_g для эффективной мощности D_n и эффективного крутящего момента D_m при изменениях режима работы двигателя. На рисунке нанесена линия $q = 0,1$, соответствующая 10%-ному изменению. Точечной штриховкой выделена область, ограниченная допустимым изменением расхода топлива, что позволяет оценить изменение силовых параметров двигателя при наложенных ограничениях.

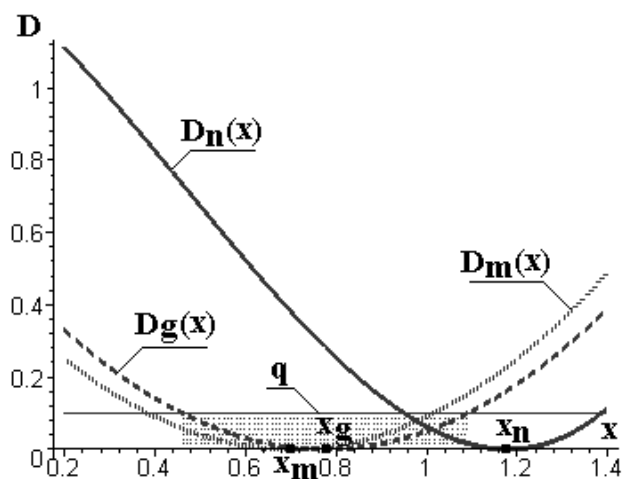


Рисунок 2 – Относительное превышение расхода топлива

Проведенный анализ позволяет предложить процедуру идентификации функций Лейдермана.

2.3 Реализация методики. По результатам испытаний требуется найти

параметры внешней скоростной характеристики $G_{\min}$, G_m , M_m , N_m и коэффициенты Лейдермана. Ввиду их функциональной взаимосвязи получение искомых параметров удобно производить в следующем порядке:

- с помощью метода наименьших квадратов (МНК) найти приближающую функцию эффективного крутящего момента,
- исследовать ее на экстремум и получить значения M_m ; N_m и G_m ,
- вычислить коэффициенты A, B, C .

Коэффициенты функции расхода топлива A_1, B_1, C_1 могут быть найдены в аналогичной последовательности.

1. Процедура метода МНК приближения. По таблице измерений значений характеристики эффективного крутящего момента $Y(x) = M_e(x)$ сформируем множество ординат и абсцисс, и применим пакет Maple – программу *fit* для приближающей полиномиальной функции $y(x)$ n -го порядка $y(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$, обозначив её через $W = y(x)$ и приняв $n=2$, для заданного числа измерений m .

```
W:=sum('a[j]*x^j','j'=0..n): # Приближающий полином
Sy:=[seq(Y[i],i=1..m)]: # Множество ординат
Sx:=[seq(X[i],i=1..m)]: # Множество абсцисс
MNK:=fit[leastsquare]([x,y],y=W) ([Sx,Sy]);
Rez:=evalf[3](MNK); # Результат приближения
assign(Rez): # Присвоение значений
```

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

2. Определение максимального крутящего момента. Эффективный крутящий момент M_m , который является максимумом приближающей функции

$y(x)$, может быть определен с помощью оператора `maximize` в формате $Mm:=maximize(y, x=0..x_0)$; где $x_0 = n_0/n_e$, n_0 – максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя.

Положение точки максимума x_m можно найти в результате решения уравнения $y(x) = M_m$ относительно переменной x `max(solve(y=Mm, x))`; либо вычислить по формуле $x_m = B/2C$, полученной в результате предыдущего анализа.

3. Вычисление коэффициентов Лейдермана. Зная значения коэффициентов a_0, a_1, a_2 приближающей функции $y(x)$, можно определить коэффициенты Лейдермана:

$$A = a_0/a_2; B = a_1/a_2; C = a_2/a_2 = 1.$$

2.4 Имитационная модель. Проверка корректности изложенной методики реализована с помощью процедуры имитационного моделирования. Для ДВС с непосредственным впрыском при значении $M_k = 10^3$ сформирована таблица измерений $Y(x_j)$ с учетом случайной погрешности $\xi_j (j = [1..m])$ равномерно распределенной в интервале $\pm E$; погрешности измерений $E = 10^{-2}$, при $m = 20$; в заданном диапазоне относительных частот вращения $x = [x_j...x_0]$, x_j – относительная частота вращения режима холостого хода, x_0 – максимальная относительная частота вращения коленчатого вала двигателя. Среди основных параметров вычислен коэффициент приспособляемости двигателя $K_z = M_m/M_n$.

В результате имитационного моделирования получены основные параметры модели (в указанных значениях параметров через косую черту приведены ожидаемые (теоретические) значения):

$$\begin{aligned} M_m &= 1359.9 \setminus 1360; M_n = 1129.95 \setminus 1130.31; M_k = 983.81 \setminus 1000; \\ K_z &= 1.2035 \setminus 1.2032; x_m = 0.703 \setminus 0.7; x_n = 1.1869 \setminus 1.1793; \\ A &= 0.617 \setminus 0.6; B = 1.412 \setminus 1.40; C = 1.0 \setminus 1.0; A1 = 1.18 \setminus 1.2; \end{aligned}$$

$$B1=1,193 \setminus 1,2 ; C1=1,0 \setminus 1,0$$

На рисунке 3 изображена приближаемая $Y(x)$ и приближающая $y(x)$ функции, нанесено значение максимального вращающего момента M_m и момента при максимальной мощности M_n .

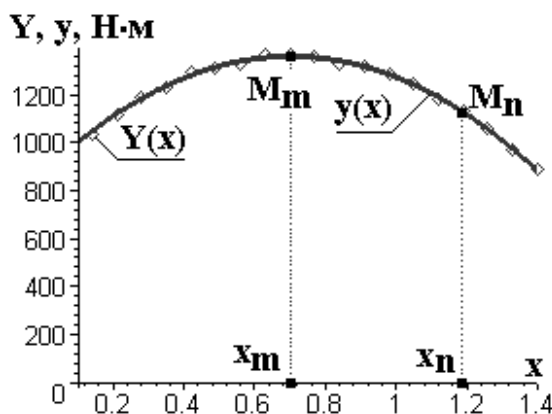


Рисунок 3 – Результат приближения

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

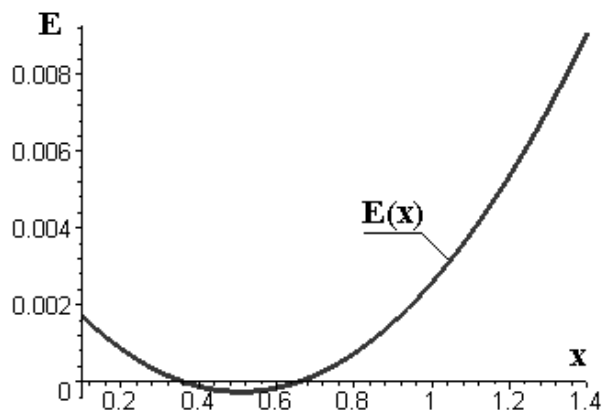


Рисунок 4 – График погрешности МНК аппроксимации

Замечание. Существует возможность повышения качества модели, так как с увеличением числа измерений погрешность приближения и результаты вычисления параметров снижаются [9–11].

Закключение. Приведенными исследованиями показано, что применение

аналитической модели на основе функций С.Р. Лейдермана позволяет с достаточной точностью строить графики внешней скоростной характеристики ДВС. Предложенная методика идентификации параметров с использованием метода наименьших квадратов и пакета Maple обеспечивает высокую точность аппроксимации даже при наличии случайной погрешности измерений (погрешность аппроксимации 1,1% при погрешности измерений 1%).

Библиографический список

1. Лейдерман С. Р. Эксплуатация грузовых автомобилей: Техно-экономические основы. М.: Транспорт, 1966.
2. Колчин А.И., В.П. Демидов Расчет автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высш. шк., 2002. 496 с.
3. Кузьмин Н.А. Техническая эксплуатация автомобилей: закономерности изменения работоспособности: учебное пособие. М: ФОРУМ, 2011. 208 с.
4. Долгин И.В. Моделирование процессов поршневых двигателей внутреннего сгорания. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013.
5. Долгин В.П., Богомольный Б.С. Процедура локализации максимума функции эффективной мощности поршневых ДВС // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. науч. -техн. конф., Севастополь, 17–19 апреля 2012 г. – Севастополь, 2012. – С. 63 – 64.
6. Долгин В.П., Гавран Е.И. Процедура поиска минимума функции удельного расхода топлива поршневых ДВС // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. науч. -техн. конф., Севастополь, 17–19 апреля 2012 г. Севастополь, 2012. С. 64–67.
7. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.И. Орлина, М.Т. Круглова. М: Машиностроение, 2003. 372 с.

8. Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV-I4 / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др.; под общ. ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.
9. Костоглотов А.А., Дерюшев В.В., Костоглотов А.И. Идентификация параметров динамических систем на основе объединенного принципа максимума // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2004. № 2. С. 13–18.
10. Дерюшев В.В., Бобыльченко В.Ю. Аппроксимация скоростных характеристик двигателей внутреннего сгорания // Научное обозрение. 2014. №11-3. С. 773–774.
11. Сидоров В.Н., Царёв О.А., Голубина С.А. Расчет внешней скоростной характеристики двигателя внутреннего сгорания [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2015. №1-1. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/viewid=18652> (дата обращения: 30.04.2018).
12. Яхьяев Н.Я., Магомедов М.М. Основы теории надёжности автомобилей и техническая диагностика: учебное пособие. - Махачкала: МАДИ, 2006. 134 с.
13. Долгин В.П., Харченко А.О. Надежность технических систем: Учеб. пособие. М: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017.
14. Долгин И.В. Динамическое моделирование и оптимизация. Монография / И.В. Долгин; под ред. В.П. Долгина – Palmarium Academic Publishing, 2019. 402 с.
15. Долгин И.В. Методы оптимизации процессов и систем. Монография / И.В. Долгин; под ред. В.П. Долгина – Palmarium Academic Publishing, 2018. 223 с.