

УДК 621.822. 43

І.М. Хоменко, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ПРО ПОБУДОВУ ЗОВНІШНЬОЇ ШВИДКІСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА РОЗРАХУНКОВИМ МЕТОДОМ

І.М. Хоменко, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

О ПОСТРОЕНИЕ ВНЕШНЕЙ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ РАСЧЕТНЫМ МЕТОДОМ

Ivan Khomenko, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

ON THE CONSTRUCTION OF EXTERNAL SPEED CHARACTERISTIC OF A CAR ENGINE BY CALCULATION METHOD

Наведено метод розрахунку коефіцієнтів С.Р. Лейдермана з використанням коефіцієнтів пристосованості двигуна по крутному моменту й кутовій швидкості колінчастого вала.

Ключові слова: зовнішня швидкісна характеристика, коефіцієнти С.Р. Лейдермана, пристосованості двигуна по крутному моменту й кутовій швидкості колінчастого вала.

Приведен метод расчета коэффициентов С.Р. Лейдермана с использованием коэффициентов приспособленности двигателя по крутящему моменту и угловой скорости коленчатого вала.

Ключевые слова: внешняя скоростная характеристика, коэффициенты С.Р. Лейдермана, приспособленности двигателя по крутящему моменту и угловой скорости коленчатого вала.

In this paper the method of calculation of S.R. Leiderman using the coefficients in adaptation engine torque and angular speed of the crankshaft.

Key words: external speed characteristic, ratios S.R. Leiderman, fitness for engine torque and angular speed of the.

Вступ. Для виконання тягового розрахунку автомобіля перш за все необхідно побудувати зовнішню швидкісну характеристику автомобільного двигуна. Дані для характеристики отримують при проведенні випробувань на спеціальному стенді. При проектних розрахунках двигуна, а також з навчальною метою при побудові зовнішньої швидкісної характеристики використовують розрахунковий метод, запропонований С.Р. Лейдерманом.

До основних показників швидкісної характеристики відносяться: потужність двигуна й крутний момент на його колінчастому валу.

Потужність двигуна впливає на швидкісні якості автомобіля. Чим більша потужність, тим більшу швидкість може розвинути автомобіль.

Крутний момент характеризує здатність автомобіля рухатись по бездоріжжю, долати підйоми, перепони, прискорюватись, набирати необхідну швидкість.

Максимальна потужність і максимальний крутний момент мають місце при різних обертах колінчастого вала. У бензинових двигунів максимальна потужність досягається при 5000...6500 хв⁻¹, а у дизелів – 3000...4000 хв⁻¹ обертів колінчастого вала. Максимум крутного моменту знаходиться в межах 2500–4500 обертів колінчастого вала за хвилину. Стандартна діаграма потужності й крутного моменту має три шкали: шкалу потужності в кіловатах (кВт) або кінських силах, крутного моменту в ньютонметрах (Н·м), кутової швидкості ($\omega, \text{с}^{-1}$) або частоти обертання колінчастого вала за хвилину ($n, \text{хв}^{-1}$).

У технічній літературі часто використовується несистемна одиниця потужності – кінська сила. Для переходу від кінської сили до кіловатів необхідно розділити значення першої на 1,36.

Потужність і крутний момент мають складну залежність від кількості обертів колінчастого вала, яка здебільшого виражається графіками, подібними наведеним на рис. 1.

При зростанні частоти обертання колінчастого вала потужність двигуна збільшується з можливим деяким зменшенням після конструктивно встановлених для двигуна номінальних обертів. Крутний момент на колінчастому валу двигуна спочатку зростає до

максимальної величини, а потім зменшується, незважаючи на зростання потужності двигуна.

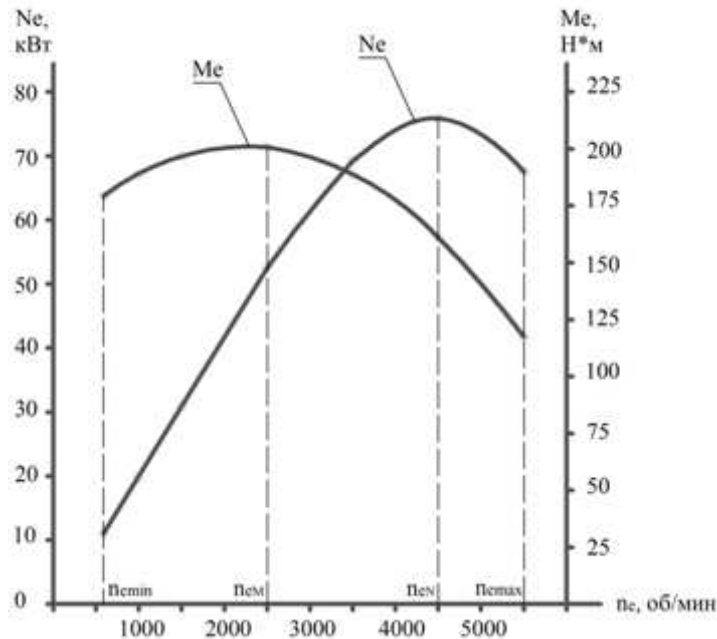


Рис. 1. Зовнішня швидкісна характеристика двигуна

Залежно від конструкції та регулювання двигуна положення максимуму крутного моменту на діаграмі може бути різним.

Якщо максимум крутного моменту має місце при низьких обертах колінчастого вала, то з таким двигуном зручно їздити по бездоріжжю, долати підйоми, перепони тощо, на середніх обертах – зручно їздити по місту або на трасі. Привертає увагу двигун, графік крутного моменту у якого має максимум у вигляді «полиці» (рис. 2) [1].

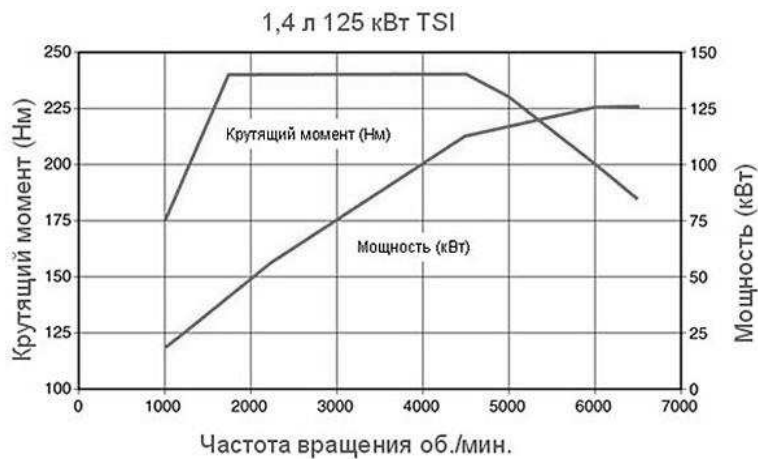


Рис. 2. Зовнішня швидкісна характеристика двигуна TSI

Двигун, графік крутного моменту якого має «полицю», придатний для їзди автомобіля по бездоріжжю, при доланні крутих підйомів, їзді по місту, автотрасі тощо.

Тобто він може розглядатись як універсальний двигун для автомобілів.

Розглянуті особливості крутного моменту двигуна характеризуються так званими коефіцієнтами пристосованості двигуна по крутному моменту і кутовій швидкості колінчастого вала.

Значення потужності й крутного моменту в поточних розрахункових точках визначаються за формулами С. Р. Лейдермана. Значення потужності:

$$N_{\omega} = N_e \cdot \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \left[a + b \cdot \frac{\omega}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \right], \text{ кВт}, \quad (1)$$

де N_{ω} – поточна потужність двигуна;

N_e – максимальна потужність двигуна;

ω – розрахункова кутова швидкість колінчастого вала;

ω_e – кутова швидкість колінчастого вала при максимальній потужності;

a, b, c – коефіцієнти.

У табл. 1 наведено значення коефіцієнтів a, b, c , залежно від типів двигунів і автомобілів, а в табл. 2 – залежно від типу двигуна.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів a, b, c для двигунів і автомобілів за рекомендаціями [2]

Коефіцієнт	Тип двигуна			
	бензиновий		дизель	
	легкового автомобіля та автобуса	вантажного автомобіля	легкового автомобіля	вантажного автомобіля та автобуса
a	0,9	1,0	0,8	0,7
b	1,1	1,0	1,2	1,3
c	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів a, b, c за рекомендаціями [3]

Двигуни	a	b	c	a1	b1	c1
Бензинові	1	1	1	1,2	1	0,8
Дизелі						
безпосереднє впорскування	0,87	1,4	1	1,55	1,55	1
передкамерні	0,6	1,4	1	1,2	1,2	1
форкамерні	0,7	1,3	1	1,35	1,35	1

Значення крутного моменту:

$$M_{\omega} = M_{Ne} \cdot \left[a + b \cdot \frac{\omega}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \right], \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2)$$

де M_{ω}, M_{Ne} – значення крутного моменту при поточній кутовій швидкості і при максимальній потужності відповідно;

$$M_{\omega} = \frac{N_{\omega}}{\omega}; \quad M_{Ne} = \frac{N_e}{\omega_e}.$$

Максимальний крутний момент визначається за формулою:

$$M_{\max} = M_{Ne} \cdot \left[a + b \cdot \frac{\omega_M}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega_M}{\omega_e} \right)^2 \right], \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (3)$$

де ω_M – кутова швидкість колінчастого вала при максимальному крутному моменту.

Як видно з табл. 1 і 2, значення коефіцієнтів a, b, c суттєво відрізняються і не мають фізичного обґрунтування. Вибираючи значення коефіцієнтів Лейдермана, доцільно встановити зв'язок між коефіцієнтами пристосованості двигуна і вказаними коефіцієнтами.

Методи і результати. Позначимо в (2) $k_M = \frac{M_{\max}}{M_{Ne}} = \left[a + b \cdot \frac{\omega_M}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega_M}{\omega_e} \right)^2 \right]$ і

$k_\omega = \frac{\omega_M}{\omega_e}$ – відповідно коефіцієнти пристосованості двигуна по моменту і кутовій швидкості обертання колінчастого вала. Тоді з (2) отримаємо:

$$k_M = \left[a + \frac{b}{k_\omega} - \frac{c}{k_\omega^2} \right]. \quad (4)$$

Із (2), враховуючи, що при $\omega = \omega_M$ $\frac{dM}{d\omega} = M_{Ne} \cdot \left(\frac{b}{\omega_e} - \frac{c \cdot 2\omega_M}{\omega_e^2} \right) = 0$, отримаємо:

$$b \cdot \omega_e - 2c \cdot \omega_M = 0. \quad (5)$$

Із останнього рівняння знаходимо:

$$k_\omega = \frac{2c}{b}. \quad (6)$$

При $\omega = \omega_e$ із рівняння (1) отримаємо:

$$a + b - c = 1. \quad (7)$$

Розрахункові значення $k_{np} = k_M \cdot k_\omega$ для бензинових двигунів знаходяться в межах $k_{np} = 1,25 \dots 1,35$; для карбюраторних – коефіцієнт пристосованості дорівнює $1,2 \dots 1,4$; для дизелів – $1,05 \dots 1,15$.

У табл. 3 наведено значення коефіцієнтів пристосованості для сучасних автомобільних двигунів.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів пристосованості для автомобільних двигунів

Двигун	N_e при ω_e (кВт, с ⁻¹)	M_{Ne} , Н·м	M_{\max} при ω_M ,	$N_{M\max}$, кВт	k_M	k_ω
K20A (Honda)	113 / 680	167 / 680	186 / 419	78 / 419	1,11	1,62
BMW523i	130 / 607	79 / 607	230 / 366	84 / 366	2,91	1,66
Mercedes E 200	120 / 576	69 / 576	240 / 314	76 / 314	3,48	1,83
1G-FE VVTI	118 / 649	77 / 649	200 / 353	57 / 353	2,60	1,84

Розв'язуючи систему рівнянь (4), (6), (7), знаходимо значення коефіцієнтів Лейдермана, виражених через коефіцієнти пристосованості:

$$a = \frac{1 + k_M \cdot k_\omega \cdot (k_\omega - 2)}{(1 - k_\omega)^2}; \quad (8)$$

$$b = \frac{2 \cdot k_\omega \cdot (k_M - 1)}{(1 - k_\omega)^2}; \quad (9)$$

$$c = \frac{k_\omega^2 \cdot (k_M - 1)}{(1 - k_\omega)^2}. \quad (10)$$

На рис. 3 наведено алгоритм визначення коефіцієнтів, а в табл. 4 значення коефіцієнтів з урахуванням умови $a + b - c = 1$.

$$N := 8 \quad i := 0..N \quad j := 0..N \quad km_i := 1.1 + 0.1 \cdot i \quad k\omega_j := 1.1 + 0.1 \cdot j$$

$$a(km, k\omega) := \frac{1 + km \cdot k\omega \cdot (k\omega - 2)}{(1 - k\omega)^2} \quad b(k\omega, km) := \frac{2 \cdot k\omega \cdot (km - 1)}{(1 - k\omega)^2} \quad c(k\omega, km) := \frac{k\omega^2 \cdot (km - 1)}{(1 - k\omega)^2}$$

$$f_{1,i,j} := b(k\omega_i, km_j) \quad f_{2,i,j} := c(k\omega_i, km_j) \quad f_{i,j} := a(km_i, k\omega_j)$$

Рис. 3. Алгоритм визначення коефіцієнтів a, b, c

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів a, b, c згідно з формулами (8), (9), (10)

a	-8,9	-3,8	-2,033	-1,1	-0,5	-0,067	0,271	0,55	0,789
b	22	12	8,6677	7	6	5,333	4,857	4,5	4,222
c	12,1	7,2	5,633	4,9	4,5	4,267	4,129	4,05	4,011

На рис. 4 наведено алгоритм розрахунку, а на рис. 5 – чисельні значення потужності (N) і моменту (M), а також їх графіки для a = -0,5; b = 6; c = 4,5.

$$Ne := 10 \cdot 10^4 \quad \omega_e := 600 \quad i := 0..8 \quad \omega_i := 100 + 70 \cdot i$$

$$a := -0.5 \quad b := 6 \quad c := 4.5$$

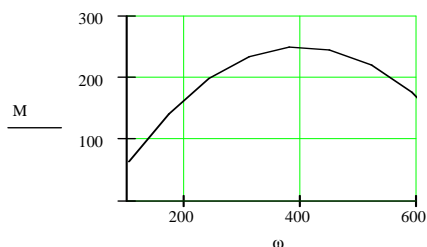
$$N(\omega) := Ne \cdot \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \left[a + b \cdot \frac{\omega}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \right] \quad N_i := N(\omega_i)$$

$$M(\omega) := \frac{Ne}{\omega_e} \cdot \left[a + b \cdot \frac{\omega}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \right] \quad M1(\omega) := 10^2 \cdot M(\omega) \quad M_i := M(\omega_i)$$

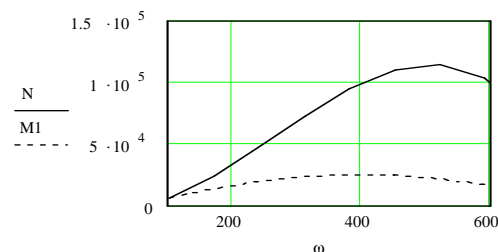
$$M1_i := M1(\omega_i)$$

Рис. 4. Алгоритм визначення потужності й крутного моменту двигуна при значеннях коефіцієнтів a = -0,5; b = 6; c = 4,5

$$N = \begin{pmatrix} 6.25 \times 10^3 \\ 2.376 \times 10^4 \\ 4.72 \times 10^4 \\ 7.227 \times 10^4 \\ 9.468 \times 10^4 \\ 1.102 \times 10^5 \\ 1.144 \times 10^5 \\ 1.031 \times 10^5 \\ 7.205 \times 10^4 \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} 62.5 \\ 139.792 \\ 196.667 \\ 233.125 \\ 249.167 \\ 244.792 \\ 220 \\ 174.792 \\ 109.167 \end{pmatrix} \quad M1 = \begin{pmatrix} 6.25 \times 10^3 \\ 1.398 \times 10^4 \\ 1.967 \times 10^4 \\ 2.331 \times 10^4 \\ 2.492 \times 10^4 \\ 2.448 \times 10^4 \\ 2.2 \times 10^4 \\ 1.748 \times 10^4 \\ 1.092 \times 10^4 \end{pmatrix}$$



a



б

Рис. 5. Залежності крутного моменту (а) і потужності й крутного моменту (б) від кутової швидкості колінчастого вала двигуна (на рис. 5, б по осі ординат використано одну шкалу, тому значення крутного моменту збільшено в 100 разів – нанесено пунктиром)

На рис. 6 наведено алгоритм розрахунку, а на рис. 7 – чисельні значення потужності (N) і моменту (M), а також їх графіки для $a = -3,8$; $b = 12$; $c = 7,2$.

$$Ne := 10 \cdot 10^4 \quad \omega_e := 600 \quad i := 0..8 \quad \omega_i := 100 + 70 \cdot i \quad a := -3,8 \quad b := 12 \quad c := 7,2$$

$$N(\omega) := Ne \cdot \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \left[a + b \cdot \frac{\omega}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \right] \quad M(\omega) := \frac{Ne}{\omega_e} \cdot \left[a + b \cdot \frac{\omega}{\omega_e} - c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \right]$$

$$N_i := N(\omega_i) \quad M1(\omega) := 10^2 \cdot M(\omega) \quad M_i := M(\omega_i) \quad M1_i := M1(\omega_i)$$

Рис. 6. Алгоритм визначення потужності й крутного моменту двигуна при значеннях коефіцієнтів $a = -3,8$; $b = 12$; $c = 7,2$

$$N = \begin{pmatrix} -3.333 \times 10^4 \\ -2.771 \times 10^4 \\ -6.08 \times 10^3 \\ 2.47 \times 10^4 \\ 5.776 \times 10^4 \\ 8.625 \times 10^4 \\ 1.033 \times 10^5 \\ 1.021 \times 10^5 \\ 7.568 \times 10^4 \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} -333.333 \\ -163 \\ -25.333 \\ 79.667 \\ 152 \\ 191.667 \\ 198.667 \\ 173 \\ 114.667 \end{pmatrix} \quad M1 = \begin{pmatrix} -3.333 \times 10^4 \\ -1.63 \times 10^4 \\ -2.533 \times 10^3 \\ 7.967 \times 10^3 \\ 1.52 \times 10^4 \\ 1.917 \times 10^4 \\ 1.987 \times 10^4 \\ 1.73 \times 10^4 \\ 1.147 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

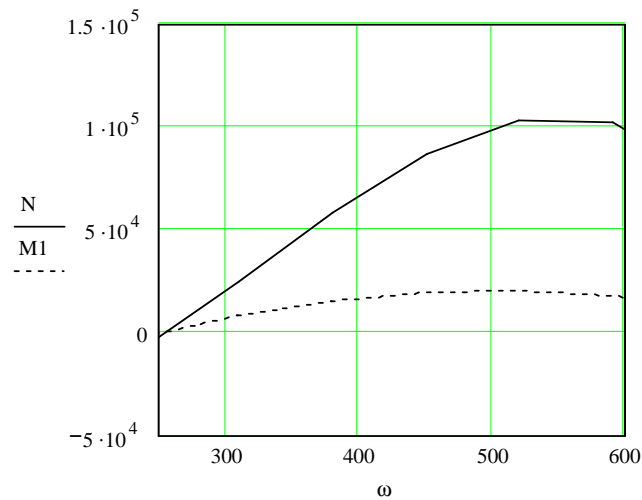


Рис. 7. Залежності крутного моменту (пунктирна лінія) й потужності (суцільна лінія) від кутової швидкості колінчастого вала двигуна

Із чисельних значень і графіків, наведених на рис. 5, встановлюємо, що максимальна потужність двигуна становить 114 кВт при $\omega_e = 520 \text{ с}^{-1}$ і максимальний крутний момент – 250 Н·м при $\omega_M = 380 \text{ с}^{-1}$. Коефіцієнти пристосованості: по крутному моменту $k_M = 1,14$; по частоті обертання колінчастого вала $k_\omega = 1,37$; загальний коефіцієнт пристосованості $k_{np} = 1,56$, що відповідає наведеним вище чисельним і графічним (рис. 1) даним для бензинових двигунів.

Аналогічні чисельні і графічні дані, наведені на рис. 7, наступні:

максимальна потужність двигуна становить 103 кВт при $\omega_e = 590 \text{ с}^{-1}$ і максимальний крутний момент – 199 Н·м при $\omega_M = 520 \text{ с}^{-1}$. Коефіцієнти пристосованості: по крутному моменту $k_M = 1,15$; по частоті обертання колінчастого вала $k_\omega = 1,13$; загальний коефіцієнт пристосованості $k_{np} = 1,3$, що також відповідає наведеним вище чисельним і графічним (рис. 1) даним для автомобільних двигунів. У діапазоні кутової швидкості.

$\omega = 520 \dots 590 \text{ с}^{-1}$ максимальна потужність двигуна становить 102...103 кВт, а при $\omega = 450 \dots 520 \text{ с}^{-1}$ максимальний крутний момент – 192...199 Н·м, що свідчить у цьому випадку про наявність «полиці» на зовнішній швидкісній характеристиці у наведених діапазонах кутової швидкості.

На графіку, наведеному на рис. 2, «полицю» отримано в реальній конструкції завдяки використанню турбонаддуву. Якоюсь мірою подібного ефекту можна досягти, змінюючи робочий об'єм циліндра, регулюванням фаз газорозподілу тощо.

Висновки. При побудові розрахункових зовнішніх швидкісних характеристик двигунів внутрішнього згоряння використовують метод С.Р. Лейдермана. При цьому у формулах для визначення потужності двигуна й крутного моменту залежно від кутової швидкості колінчастого вала рекомендується використовувати коефіцієнти, які не мають фізичного обґрунтування.

Показана доцільність розрахунку значень коефіцієнтів Лейдермана через коефіцієнти пристосованості двигуна по моменту і кутовій швидкості обертання колінчастого вала.

Список використаних джерел

1. *Режим* доступу : <https://www.google.com.ua/search?q=TSI&espv>.
2. *Сирота В. І.* Автомобілі. Основи конструкції, теорія : навчальний посібник / В. І. Сирота, В. П. Сахно. – К. : Арістей, 2007. – 288 с.
3. *Режим* доступу : forest.petrus.ru/courses/pump/.../_Pump1.htm.