

УДК 621

В.О. Шевченко<sup>1</sup>, М.В. Краснокутський<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків<sup>2</sup> Південна залізниця, Харків**ПІДБІР ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ І ДОРОЖНІХ МАШИН З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НЕУСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ**

*Розглянуті способи завдання характеристик двигунів з урахуванням впливу несталого режиму навантаження і запропонована методика підбору двигунів дозволяють істотно підвищити техніко-економічні показники БДМ за рахунок поліпшення використання встановлених на них двигунів.*

**Ключові слова:** двигуни внутрішнього згорання, неусталені режими навантаження.

**Вступ**

Для аналізу роботи двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) на будівельних і дорожніх машинах (БДМ) з метою їх обґрунтованого підбору необхідно мати математичні залежності, які зв'язують зовнішнє навантаження, яке долає двигун, з його характеристикою. В даний час при підборі двигунів використовують їх стандартні, статичні характеристики (швидкісні, навантажувальні та інші), які знімають при встановленому, стаціонарному навантаженні. Та більшість двигунів БДМ в реальних умовах експлуатації працюють при змінному, неусталеному зовнішньому навантаженні [1]. При цьому їх ефективні (вихідні) показники двигунів по потужності та паливній економічності відрізняються від даних їх статичних характеристик.

**Основний матеріал**

Зміна зовнішнього навантаження спричиняє за собою зміну швидкості обертання колінчастого валу, що відбивається на протіканні робочого процесу двигуна і на роботі системи регулювання подачі палива. Розглянемо різні способи завдання характе-

ристики двигуна і способи обліку впливу на неї режиму навантаження.

Відомо, що швидкісна характеристика двигуна, обладнаного всережимним регулятором при постійній настройці, наприклад на максимальне число оборотів холостого ходу, має дві гілки: регуляторну і безрегуляторну (рис. 1).

Регуляторна гілка характеристики може бути з відомим допущенням представлена прямою:

$$M_e = p + s \cdot \omega, \quad (1)$$

а безрегуляторна гілка (зовнішня характеристика) – параболою

$$M_e = a + b \cdot \omega + c \cdot \omega^2, \quad (2)$$

де  $M_e$  – ефективний крутний момент двигуна;  $a, b, c, p, s$  – постійні коефіцієнти;  $\omega$  – кутова швидкість колінчастого валу.

Іноді з метою спрощення розрахунків безрегуляторну гілку лінеаризують: параболу замінюють прямою, яка описується рівнянням вигляду (1). При цьому пряму проводять з точки 2 або паралельно осі абсцис, або під деяким кутом до неї так, щоб з'єднати точки 2 і 3. Природно, що така лінеаризація, істо-

тно спрощуючи розрахункові формули, вносить певну погрішність в отримувані результати.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів  $\lambda$

Марка двигуна	$\lambda$ в $\text{кгм} \cdot \text{хв}^2$ для ділянок	
	регуляторного	безрегуляторного
СМД-31	0,17	0,04
ЗИЛ-130	0,17	+0,07

Примітка. Позитивні значення відповідають гальмуванню двигуна, негативні – розгону.

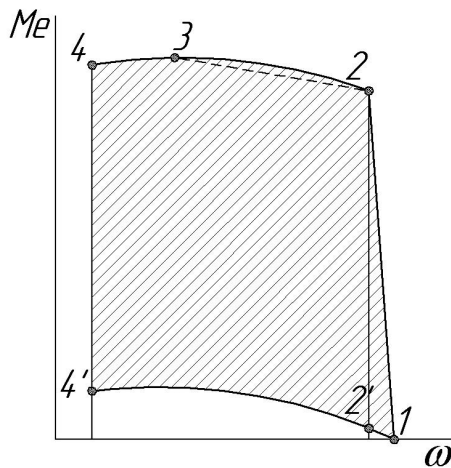


Рис. 1. Статистична швидкість двигуна:

1 – максимальне число обертів ходового колеса; 2 – номінальний режим; 3 – режим максимального крутного моменту; 1-2 – регуляторна гілка; 2-3-4 – зовнішня характеристика; 1-2'-4' – часткова характеристика при найменшій подачі пального

Проте спосіб завдання крутного моменту двигуна як функції лише кутової швидкості не є достатньо точним, оскільки встановлено [2], що при несталому навантаженні крутний момент є функцією прискорення колінчастого валу.

Якщо вважати крутний момент лінійною функцією кутового прискорення, то зміна потужнісних показників двигуна від несталого навантаження можна врахувати коефіцієнтом несталого режиму. Цей параметр характеризує порушення робочого процесу і роботи системи регулювання подачі палива і є постійним для даного двигуна і регулюючого механізму. При роботі двигуна по регуляторній гілці характеристики величини більш, чим при роботі по зовнішній характеристиці, зважаючи на істотний вплив порушення процесу регулювання на ефективну потужність.

Коефіцієнт може бути визначений при розгоні і гальмуванні двигуна на стенді.

Таким чином, ефективний крутний момент двигуна може бути представлений виразом:

$$M_e^\partial = M_e + \lambda \cdot \varepsilon,$$

де  $M_e$  – крутний момент по статичній характеристиці;  $\varepsilon$  – кутове прискорення колінчастого валу.

Як приклад в табл. 1 приведені значення коефіцієнтів  $\lambda$  для автогрейдерного дизеля СМД-31 і автомобільного карбюраторного двигуна ЗИЛ-130 на крановій установці, задросельованого до потужності 83 кВт при 1800 об/хв. і обладнаного всережимним регулятором з метою встановлення на будівельні і дорожні машини.

Найбільш повно вплив несталого навантаження на показники двигуна може бути врахований при заданні його динамічної характеристики, тобто залежності крутного моменту від кутової швидкості і кутового прискорення колінчастого валу. Динамічна характеристика двигуна може бути представлена у вигляді сімейства кривих  $M_e^\partial = f(\omega)$ , знятих при різних значеннях  $\varepsilon$ -кутового прискорення колінчастого валу (рис. 2), або у вигляді поверхні, побудованої в координатах  $M_e^\partial - \omega - \varepsilon$  (рис. 3). Очевидно, статична характеристика є окремим випадком динамічної характеристики при  $\varepsilon = 0$ .

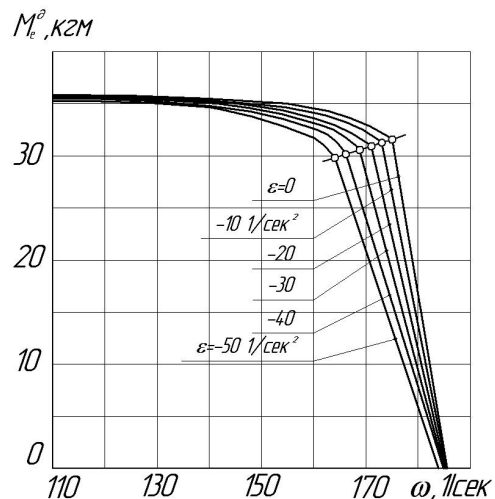


Рис. 2. Динамічна характеристика дизеля СМД-31 при гальмуванні

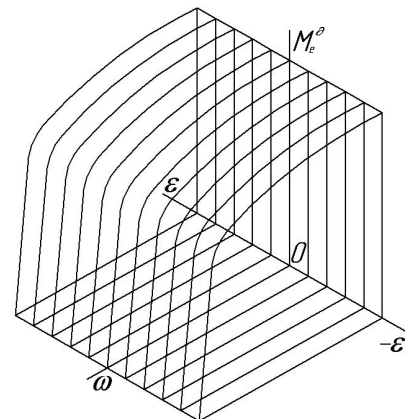


Рис. 3. Динамічна характеристика двигуна в координатах  $M_e^\partial - \omega - \varepsilon$

Як видно з рис. 2 і 3, динамічна характеристика складається з двох досить яскраво виражених областей: регуляторної, відповідній роботі двигуна на регуляторі, і безрегуляторної, відповідній роботі двигуна по зовнішній характеристиці.

Вона може бути визначена при розгоні і гальмуванні двигуна на стенді з різними прискореннями, а задана графічно, таблично або аналітичним рівнянням поверхні. У останньому випадку коефіцієнти  $p, s, a, b, c$  рівнянь (1) і (2) будуть не постійними,

а в залежності від величини  $\varepsilon$ -кутового прискорення, причому ця залежність може бути описана рівнянням вигляду

$$y = m + l \cdot \varepsilon + \alpha \cdot \varepsilon^\beta,$$

де  $y$  – значення вираженого коефіцієнта;  $m, l, \alpha, \beta$  – коефіцієнти, постійні для даного двигуна.

В табл. 2 приведені для прикладу значення коефіцієнтів  $p, s, a, b, c$  дизеля СМД-31 і карбюраторного задросьельованого двигуна ЗИЛ-130.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів  $p, s, a, b, c$ 

Коефіцієнт	СМД-31	
	Розгін	Гальмування
-s	$2,7 + 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon + 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^{3,4}$	$2,7 - 2,9 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon + 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^{3,4}$
p	$504,6 + 5,9 \cdot \varepsilon + 8,2 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^{3,8}$	$504,6 - 6 \cdot \varepsilon + 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^{2,2}$
a	$12,3 + 0,1 \cdot \varepsilon + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon^{5,2}$	$12,3 - 0,1 \cdot \varepsilon + 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon^{5,2}$
b	$0,38 - 0,22 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 3,2 \cdot 10^{-14} \cdot \varepsilon^{7,3}$	$0,38 - 0,2 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 2,5 \cdot 10^{-14} \cdot \varepsilon^{7,2}$
-c	$(1,5 - 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 10^{-9} \cdot \varepsilon^9) \cdot 10^{-3}$	$(1,5 - 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 2,8 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon^5) \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт	ЗИЛ-130	
	Розгін	Гальмування
-s	$2,75 - 3 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon$	$2,75 + 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 0,7 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon^{4,2}$
p	$555,5 - 8 \cdot \varepsilon$	$555,5 + 2,3 \cdot \varepsilon - 10^{-9} \cdot \varepsilon^{6,2}$
a	$24,2 - 2,5 \cdot \varepsilon$	$24,2 + 0,2 \cdot \varepsilon + 0,9 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon^5$
b	$0,3 - 3 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon$	$0,3 - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon + 1,9 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon^{5,5}$
-c	$(1,44 - 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon + 0,5 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon^{7,6}) \cdot 10^{-3}$	$(1,44 - 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon + 3,8 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon^{5,2}) \cdot 10^{-3}$

Форма характеристики залежить від конструкції двигуна, а також регулятора, тому характеристика різних двигунів при загальних закономірностях відрізняються одна від іншої в основному кривизною безрегуляторної гілки. Отже, рівняння динамічних характеристик різних двигунів розрізнятимуться між собою лише чисельними значеннями коефіцієнтів, методика ж виведення цих рівнянь є загальною.

Зміна ефективних потужностних показників дизелів БДМ під впливом несталого навантаження відбувається в основному із-за порушення роботи регулятора; значно менший вплив дають порушення робочого процесу. У зв'язку з цим представляє інтерес дослідження можливості ослаблення негативно впливу несталого навантаження на ефективні показники двигуна і регулятора. Задамо ефективний крутний момент системою двох рівнянь: власно двигуна і регулятора. Рівняння двигуна в цьому випадку буде функцією трьох змінних: кутової швидкості, кутового прискорення і положення рейки паливного насоса (муфти регулятора). Оскільки вплив порушень робочого процесу дизеля на його ефективні показники незначний, рівняння двигуна достатньо може бути представлено функцією лише кутової

швидкості і положення муфти регулятора у вигляді:

$$M_e^0(\omega z) = M_{e \min}(\omega) + M'_{ен} - K_p z, \quad (3)$$

де  $z$  – положення муфти регулятора;  $M_{e \min}(\omega)$  – часткова характеристика дизеля, знята за відсутності регулятора і найменшій подачі палива – мінімальному висуванню рейки паливного насоса (крива 1-2'-4' на рис. 1);  $M'_{ен}$  – приріст крутного моменту при найбільшій подачі палива – максимальному висуванню рейки паливного насоса під дією регулятора (різниця ординат крапок 2 і 2');  $K_p = \frac{M'_{ен}}{z_{\max}}$  – постійна, яка визначається конструктивними особливостями і настройкою регулятора (де  $K_p = \frac{M'_{ен}}{z_{\max}}$  – положення муфти регулятора при максимальних оборотах холостого ходу).

Дане рівняння визначає поле можливих режимів роботи двигуна (заштрихована площа на рис. 1). Рівняння регулятора (також відоме з теорії регулювання), якщо нехтувати силами сухого тертя, можна записати у вигляді:

$$m_{\partial} \frac{d^2 z}{dt^2} + \vartheta \frac{dz}{dt} + E(z) + F = A(z)\omega_p^2, \quad (4)$$

де  $m_{\partial}$  – приведена до муфти регулятора маса всіх рухомих частин регулятора і паливного насоса, пов'язаних в русі з муфтою;  $\vartheta$  – чинник гальмування регулятора і паливного насоса (коефіцієнт в'язкого тертя);  $E(z)$  – поновлююча сила регулятора (зусилля пружини, приведені до муфти);  $F$  – зусилля попереднього натягу пружин;  $A(z)$  – інерційний коефіцієнт регулятора;  $\omega_p$  – кутова швидкість обертання вантажів;  $A(z)\omega_p^2$  – підтримуюча сила регулятора, тобто відцентрова сила вантажів, приведена до муфти.

Є ще один спосіб обліку впливу несталого навантаження на потужнісні показники двигуна [3]. Шляхом сумісного розв'язання рівняння статичної характеристики двигуна і рівняння регулятора при прийнятті ряду допущень отриманий відносно простий вираз, придатний для виконання лише наближених розрахунків (на аналогових машинах):

$$\frac{\vartheta}{E(z)} \cdot \frac{dM_e^{\partial}}{dt} = M_e - M_e^{\partial}.$$

Розглянуті способи завдання характеристик двигунів з урахуванням впливу несталого навантаження дозволяють провести аналіз роботи двигунів і здійснити обґрунтований їх підбір для БДМ. Це можна виконати в результаті вирішення відомого рівняння динаміки:

$$M_e^{\partial} = M_c + J\varepsilon, \quad (5)$$

де  $M_c$  – момент опору обертанню колінчастого валу;  $J$  – приведений до колінчастого валу момент інерції всіх рухомих мас двигуна.

При цьому значення  $M_e^{\partial}$  ефективного крутного моменту в рівняння (5) може бути підставлене в будь-якій запропонованій вище формі. Значення  $M_c$  задається, як правило, на підставі статичних даних в графічній, табличній або аналітичній формі.

При вирішенні рівняння (5) зручно, а у ряді випадків (наприклад, при завданні ефективного крутного моменту динамічною характеристикою) необ-

хідно користуватися електронними обчислювальними машинами.

Згідно розробленої методики підбору двигунів в результаті вирішення рівняння визначається кутова швидкість обертання (число оборотів) колінчастого валу за час виконання машиною робочої операції (циклу навантаження)  $\omega(t)$ . Наявність такої залежності дозволяє перевірити можливість стійкої роботи двигуна, а також, використовуючи вибране рівняння крутного моменту визначити зміну ефективних потужнісних показників двигуна за цикл навантаження.

Таким чином, стає можливим перевірити відповідність характеристики двигуна характеру і величині подоланого зовнішнього навантаження. Варіюючи форму характеристики, можна визначити її оптимальні параметри для подолання заданого характеру навантаження виходячи з умови отримання найкращих показників ефективної потужності. Вирішуючи систему рівнянь (3) – (5) і використовуючи метод підбору, можна встановити оптимальні параметри регулятора, що також забезпечують найкращих показників ефективної потужності.

## Висновки

Розглянуті способи завдання характеристик двигунів з урахуванням впливу несталого режиму навантаження і запропонована методика підбору двигунів дозволяють істотно підвищити техніко-економічні показники БДМ за рахунок поліпшення використання встановлених на них двигунів.

## Список літератури

1. *Машины для земляных работ: навальный посібник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, В.В. Нічке, Л.В. Назаров, М.П. Скоблюк, В.Г. Нікітін. – Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 2010. – 560 с.*
2. *Златопольский А.В. Динамическая характеристика дизеля / А.В. Златопольский // Труды ВНИИ-Стройдормаша. – 1967. – XXXVIII.*
3. *Лысов А.М. Уравнение динамической характеристики тракторного двигателя / А.М. Лысов // Тракторы и сельхозмашины. – 1969. – № 2. – С. 37-41.*

Надійшла до редколегії 27.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.А. Подригало, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

## ПОДБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ

В.А. Шевченко, М.В. Краснокутский

*Рассмотрены способы задания характеристик двигателей с учетом влияния неустановившегося режима нагрузки и предложенная методика подбора двигателей позволяют существенно повысить технико-экономические показатели СДМ за счет улучшения использования установленных на них двигателей.*

**Ключевые слова:** двигатели внутреннего сгорания, неустановившиеся режимы нагрузки.

## SELECTION OF COMBUSTION ENGINES FOR BUILD AND TRAVELLING MACHINES TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCING OF THE UNSET MODES OF LOADING

V.A. Shevchenko, M.V. Krasnokutskiy

*The considered methods of task of descriptions of engines taking into account influencing of the unset mode of loading and offered method of selection of engines allow substantially to promote the techno-economic indexes of build and travelling machines due to the improvement of the use of the engines set on them.*

**Keywords:** combustion engines, unset modes of loading.