

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ПУСКУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ

© Немий С. В., Бритковський В. М., 2014

Розглянуто енергетичну ефективність сучасних систем електростартерного пуску автомобільних двигунів у аспектах коефіцієнта корисної дії системи щодо використання хімічної енергії пального та експлуатаційних витрат пального.

The energetic efficiency of modern systems of electric starter start-up vehicle engines in the aspects of the efficiency of the system for the use of the chemical energy of fuel consumption and maintenance costs is considered.

Постановка проблеми. Однією із важливих експлуатаційних властивостей автомобілів є їх паливна ощадливість. Крім витрат енергії двигуна на подолання автомобілем опору руху, значна частка енергії двигуна витрачається на функціонування допоміжних агрегатів, зокрема стартера під час пуску двигуна. Однак методики оцінювання споживання енергії та експлуатаційних витрат пального на пуск двигунів все ще практично відсутні.

Аналіз відомих досліджень та публікацій. У вже опублікованих роботах, наприклад, [1, 6–10], наведено основні теоретичні залежності, що характеризують (моделюють) робочі процеси в акумуляторних батареях і електростартерах у процесі пуску двигуна залежно від параметрів зовнішнього середовища і умов пуску. У цих роботах переважно розглядаються проблеми забезпечення надійного пуску двигунів за низьких температур довкілля. Енергетичні витрати та витрати пального на пуск двигунів та напрями їх оптимізації практично не висвітлені.

Формулювання мети дослідження. Метою роботи є обґрунтування теоретичних залежностей, які відображають енергетичні витрати у сучасних традиційних системах електростартерного пуску двигунів, придатних для оцінювання експлуатаційних витрат пального.

Основний матеріал. Критеріями ефективності системи електростартерного пуску двигунів є надійність функціонування їх складових елементів, забезпечення необхідної мінімальної пускової частоти обертів двигуна, надійний пуск двигуна за низьких температур (зокрема із застосуванням засобів передпускового підігріву), мінімальне споживання енергії для запобігання розряду акумуляторної батареї у разі повторних пусків. Деякі із наведених критеріїв розглянуто у роботах [1, 2, 6, 7, 8]. Однак у цих роботах, як уже зазначалося, практично не відображено енергетичної ефективності системи електростартерного пуску автомобільних двигунів.

Енергетичну ефективність систем електростартерного пуску двигунів автомобілів розглянемо у двох аспектах – оцінимо коефіцієнт корисної дії системи щодо використання хімічної енергії пального та витрати пального на одиницю пробігу.

Максимальна потужність, яку віддає акумуляторна батарея під час запуску, визначається за формулою [2, 5, 7]

$$P_{\delta} = \frac{U_{\delta}^2}{4(R_{\delta} + R_{cm})} = \frac{U_{\delta} I_{cm}}{4}, \quad (1)$$

де U_{δ} – напруга акумуляторної батареї; R_{δ} – внутрішній опір акумуляторної батареї; R_{cm} – опір електричного кола стартера; I_{cm} – струм у стартерному колі (якоря).

Під час проектування і експлуатації систем пуску намагаються забезпечити $R_{\delta} = R_{cm}$ [6, 7], оскільки в іншому разі втрати потужності будуть більші на ділянці електричного кола із вищим опором. Крім цього, у випадку збільшення опору стартера впаде його номінальна потужність.

Потужність витрат у вигляді теплоти, що виділяється на опорах R_{δ} і R_{cm} , визначається за формулою

$$P_m = I_a^2 (R_{\delta} + R_{cm}), \quad (2)$$

де I_a – струм у якорі стартера.

Цілком очевидно, що при $R_{\delta} = R_{cm}$, як випливає із формули (2), на внутрішній опір акумуляторної батареї припадає половина падіння напруги в електричному колі стартера, тобто щодо зовнішнього навантаження ККД акумуляторної батареї становить 0,5. Половина енергії батареї під час запуску витрачається на утворення (виділення) тепла.

ККД системи стартерного пуску “акумуляторна батарея – стартер” можна відобразити рівнянням

$$\eta_n = \eta_{\delta} \eta_{cm} \eta_{\kappa} \eta_m, \quad (3)$$

де η_{δ} , η_{cm} , η_{κ} , η_m – відповідно ККД, акумуляторної батареї, стартера, ділянки проводу стартерного кола, зубчатого зачеплення “стартер – вінець маховика”.

ККД стартерів сучасних конструкцій становить 0,4 – 0,6 [7, 8]. На ділянках проводу “акумуляторна батарея – стартер” падіння напруги досягає 15 % [9], тобто ККД стартерного кола становить 0,85. ККД зубчатого зачеплення “стартер – зубчатий вінець маховика” двигуна становить 0,9 [10].

Прийнявши, згідно з наведеними вище даними: $\eta_{\delta} = 0,5$; $\eta_{cm} = 0,5$; $\eta_{\kappa} = 0,85$; $\eta_m = 0,9$, за формулою (3) отримаємо:

$$\eta_n = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 0,19125,$$

тобто ККД сучасних традиційних систем електростартерного пуску двигунів автомобілів не перевищує 20 %.

Далі, для оцінювання ефективності використання енергії пального для забезпечення (відновлення) енергії акумуляторної батареї, ККД системи “двигун – зубчатий вінець маховика” визначається за формулою

$$\eta_{oc} = \eta_{\delta\delta} \eta_z \eta_{nz} \eta_n, \quad (4)$$

де $\eta_{\delta\delta}$ – ККД заряду акумуляторної батареї; η_z – ККД генераторної установки; η_{nz} – ККД пасового приводу генератора.

Фактично значення вказаних ККД у середньому становлять [6, 7]: $\eta_{\delta\delta} = 0,85$; $\eta_z = 0,55$; $\eta_{nz} = 0,95$.

Згідно з наведеними вище даними, за формулою (4) отримаємо:

$$\eta_{oc} = 0,85 \cdot 0,55 \cdot 0,95 \cdot 0,19125 = 0,085,$$

тобто лише 8,5 % витраченої на привід генератора енергії використовується для стартерного пуску.

Із урахуванням значення ефективного ККД двигуна $\eta_{ed} = 0,21 \dots 0,3$ – бензинового і $\eta_{ed} = 0,28 \dots 0,4$ – дизельного [3], ефективність використання енергії пального для електростартерного пуску становить:

$$\eta = 0,3 \eta_{oc} = 0,3 \cdot 0,085 = 0,0255,$$

тобто не більше ніж 2,6 % хімічної енергії пального перетворюється на корисну роботу, необхідну для електростартерного пуску двигуна.

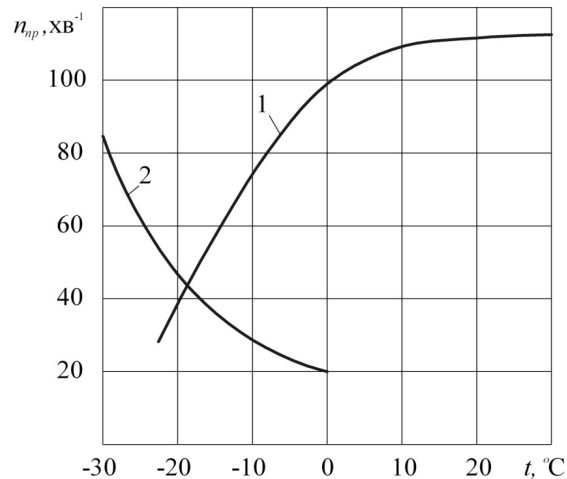
Момент опору двигуна при пуску (Нм) розраховують за емпіричною формулою [5]

$$M_o = 390V_h \left[\varepsilon + 6\sqrt{\delta} + k_m \left(1 + \frac{\delta^2}{8} \right) \sqrt{v \frac{\pi n_{np}}{30}} \right], \quad (5)$$

де V_h – робочий об’єм циліндрів двигуна, м³; ε – ступінь стиску; δ – коефіцієнт нерівномірності обертання колінчатого вала двигуна; k_m – коефіцієнт, що дорівнює 3,8 для бензинових двигунів і 2,8

для дизельних; ν – кінематична в'язкість оливи на момент пуску, $\text{мм}^2/\text{с}$; n_{np} – середня частота обертання колінчатого вала у режимі сталого провертання, хв^{-1} .

Значення кінематичної в'язкості оливи наведено у літературі [2, 8]. Для розрахунку за формулою (5) необхідно мати експериментальні значення середньої частоти обертання колінчатого вала стартером у режимі сталого провертання n_{np} залежно від температури двигуна. Приклад такої залежності для двигуна ЗІЛ-130 наведено на рисунку.



*Залежність середньої частоти обертання колінчатого вала стартером від температури двигуна:
1 – у режимі сталого провертання;
2 – мінімальна пускова частота обертання*

Відповідно до формули (5), витрати енергії стартера на 100 км пробігу, необхідної для пуску двигуна за заданої його температури, можна визначити за формулою

$$E_n = M_o \omega_{np} t_{n100}, \quad (6)$$

де $\omega_{np} = \pi n_{np} / 30$; t_{n100} – тривалість пуску двигуна за 100 км пробігу.

Частота вмикання стартера і тривалість пуску двигуна характеризуються певною статистичною закономірністю [5] і наведені у табл. 1, із якої випливає, що тривалість пуску за 100 км пробігу:

$$t_{n100} = n_{вм} t_{вм}. \quad (7)$$

де $n_{вм}$ – кількість вмикань стартера на 100 км пробігу; $t_{вм}$ – тривалість вмикання стартера, с.

Таблиця 1

Частота і тривалість пуску стартера

Режим експлуатації АТЗ	Кількість вмикань стартера на 100 км	Тривалість вмикання стартера, с
Автобус і легковий по місту	27	0,5 – 1,5 3 – 10
Вантажний по місту	22,5	
Шосе	4 – 12	

У табл. 2 в чисельнику наведено дані для літнього пуску і пуску прогрітого двигуна взимку, в знаменнику – тривалість пуску холодного двигуна взимку.

На основі наведеного, для прикладу, розрахуємо витрати енергії стартера вантажного автомобіля ЗІЛ-130 на 100 км пробігу, необхідної для пуску двигуна, за різних температур у

міських умовах експлуатації. Розрахункові дані приймаємо згідно з [2, 6, 7, 8]. Результати розрахунків зводимо у табл. 2.

Таблиця 2

Розрахунок витрат енергії стартера на 100 км пробігу

Параметр	Значення				
Температура двигуна t , °C	-15	-10	0	20	80
В'язкість моторної оливи ν , см ² /с [2, 8]	5500	3000	1200	200	15
Частота обертів вала двигуна, n_{np} , хв ⁻¹	55	73	92	110	110
Кутова швидкість вала двигуна ω_{np} , с ⁻¹	5,76	7,64	9,63	11,51	11,51
Коефіцієнт нерівномірності обертання колінчатого вала двигуна, δ [6].	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4
Момент опору двигуна M_o , Нм	1737,06	1434,12	1010,89	459,25	144,47
Тривалість вмикання стартера $t_{вм}$, с [5]	10	7	5	3	1
Витрати енергії стартера на 100 км пробігу E_n , Дж	2251227,15	1725677,6	1095171,5	356805,14	37414,19

У табл. 3 наведено значення витрат енергії стартера, яка забезпечується акумуляторною батареєю із її подальшою компенсацією (заряджанням) генератором, який, своєю чергою, приводиться двигуном. Цілком очевидно, що загальні витрати енергії системи “пальне – двигун – пасова передача – генератор – акумуляторна батарея – стартер – колінчатий вал двигуна” визначатимуться за формулою

$$E_{n\Sigma} = E_n / \eta \eta_{dc} = E_n / \eta_{ed} \eta_{n2} \eta_z \eta_{z6} \eta_6 \eta_{ct} \eta_k \eta_m \quad (8)$$

У нашому прикладі $E_{n\Sigma} = E_n / 0,3 \cdot 0,95 \cdot 0,55 \cdot 0,85 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = E_n / 0,0255$.

Витрати пального для пуску двигуна (л/100 км) можна визначити за формулою

$$Q_{n100} = E_{n\Sigma} / H\gamma, \quad (9)$$

де H – теплота згоряння (енергетична ефективність) пального, Дж/кг; γ – густина пального, кг/л.

Енергетична ефективність згоряння бензину становить 41 – 44 МДж/кг. Густина бензину за 20 °C становить 0,78 кг/л. З пониженням температури на кожні 10 °C вона збільшується на 1 % [4]. Розрахунок експлуатаційних витрат пального для пуску двигуна ЗІЛ-130 за формулою (9) на основі вказаних даних наводимо у табл. 3.

Таблиця 3

Розрахунок витрат енергії стартера на 100 км пробігу

Параметр	Значення				
Температура двигуна, °C	-15	-10	0	20	80
Витрати енергії пального на 100 км пробігу $E_{n\Sigma}$, Дж	88283417,65	67673631,4	42947902,85	13992358,3	1467223,14
Густина пального, кг/л	0,815	0,803	0,796	0,78	0,73
Витрати пального для пуску двигуна Q_{n100} , л/100 км	2,64	2,06	1,32	0,44	0,06

Порівняно із контрольною витратою пального автомобіля ЗІЛ-130 (29 л/100 км), наприклад, витрати пального для пуску за температур двигуна, нижчих за 0 °С, лежать у межах 4,5–9,1 %, а за температур двигуна понад 20 °С – 0,2–1,52 %.

Наведені у табл. 4 результати розрахунків не відображають супутніх витрат пального, яке у процесі пуску за низьких температур конденсується на стінках циліндрів і не утворює робочої суміші. Наведені дані підтверджують важливість для енергоощадного пуску двигунів за низьких температур застосування засобів їх передпускового підігріву.

Висновки. 1. Обґрунтовано теоретичні залежності, що відображають енергетичні витрати у сучасних традиційних системах електростартерного пуску двигунів, придатні для оцінювання експлуатаційних витрат пального.

2. Сучасні традиційні системи електростартерного пуску двигунів автомобілів є одними із найменш ефективних автомобільних систем в аспекті використання хімічної енергії пального.

3. Крім забезпечення надійного пуску за низьких температур та зменшення при цьому динамічних навантажень деталей стартера і двигуна, підтримання його теплового стану в плюсовому діапазоні температур сприяє зменшенню витрат пального у процесі пуску.

4. Для зменшення енерговитрат під час пуску двигунів важливе значення має технічний стан систем живлення, газорозподілу, запалювання (бензинові двигуни) і циліндро-поршневої групи, які впливають на тривалість пуску та надійність запалювання робочої суміші у циліндрах.

1. Немий С. В. Формування експлуатаційної ефективності системи електростартерного пуску двигунів автобусів / С. В. Немий, І. Р. Вайда // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – 2009. – № 641. – С. 56–61.
2. Автомобильный справочник / пер. с англ. [Первое русское изд.] – М.: ЗАО КЖИ “За рулем”, 2002. – 896 с.
3. Акимов А. В. Вторичный источник энергии для конденсаторной системы пуска / А. В. Акимов, Ю. П. Чишков. – М.: Автомобильная промышленность, 1994. – № 4. – С. 8–10.
4. Емельянов В. Е. Автомобильный бензин и другие виды топлива: свойства, ассортимент, применение / Емельянов В. Е., Крылов И. Ф. – М.: Астрель: АСТ: Профиздат, 2005. – 207 с.
5. Масич В. Н. Режим работы стартеров в эксплуатации / В. Н. Масич, Я. А. Менделевич // в сб.: Автотракторное электрооборудование. Вып. 3 – М.: НИИНавтопром, 1978. – С. 12–18.
6. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования. /Л. В. Копылова, В. И. Коротков, В. Е. Красильников и др.; под ред. М. Н. Фесенко.– М.: Машиностроение, 1979. – 355 с.
7. Чишков Ю. П. Электрооборудование автомобилей учебник для ВУЗов. / Ю. П. Чишков, А. В. Акимов. – М.: За рулем, 1999.– 384 с.
8. Чишков Ю. П. Электростартерный пуск автотракторных двигателей / Ю. П. Чишков, С. М. Квайт, Н. Н. Сметнев. – М.: Машиностроение, 1985. – 160 с.
9. Хортов В. П. Высоковольтные системы пуска ДВС // Автомобильная промышленность. – 1993. – № 6. – С. 20 – 22.
10. Ютт В. Е. Электрооборудование автомобилей: учебник для автодор. вузов. – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.