

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ "СТОП-СТАРТ" АВТОМОБІЛІВ

С.В. Немий¹

Розглянуто енергетичну ефективність систем "стоп-старт" сучасних автомобілів у аспекті експлуатаційних витрат палива. Обґрунтовано теоретичні залежності, які моделюють особливості витрат палива в разі застосування системи "стоп-старт" у сучасних системах управління пуском двигунів. Доведено, що під час короткочасних зупинень автомобілів застосування системи "стоп-старт" сприяє зменшенню витрат палива. Економічна доцільність застосування системи "стоп-старт" визначається співвідношенням витрат на інсталяцію (із врахуванням відповідного збільшення вартості двигуна), технічне обслуговування і ремонт системи та економії коштів за рахунок зменшення витрат палива.

Ключові слова: електростартерний пуск, стоп-старт, температурний стан двигунів, стартер, енергія для пуску двигуна, витрати палива двигуном на марному ході, витрати палива для пуску, економія палива.

Постановка проблеми. Важливою експлуатаційною властивістю автомобілів чи автобусів (далі за текстом автомобільні транспортні засоби – АТЗ) є їх паливна ощадливість. Значна частка енергії двигуна витрачається на функціонування допоміжних агрегатів, зокрема стартера при пуску двигуна. Часті пуски двигуна характерні для міських умов експлуатації після зупинок автомобілів, спричинених обстановкою руху та засобами його регулювання. Крім цього, для комунального пасажирського транспорту часті зупинення додатково спричинені режимом руху – на службових зупинках для виходу і входу пасажирів. З метою зменшення витрат палива внаслідок вмикання двигуна на зупинках у сучасних автомобілях застосовують систему "стоп-старт". Однак детальний аналіз її ефективності щодо зменшення витрат палива у наявних публікаціях практично відсутній.

Аналіз відомих досліджень та публікацій. В опублікованих на цей час роботах, наприклад [1, 2, 6-9], наведено основні теоретичні залежності, що характеризують (моделюють) робочі процеси в акумуляторних батареях і електростартерах у процесі пуску двигуна залежно від параметрів зовнішнього середовища й умов пуску. У цих роботах, переважно, розглядають проблеми забезпечення надійного пуску двигунів за низьких температур довкілля. У роботі [6] наведено опис та функціональну схему конструкції системи "стоп-старт". У роботі [8] наголошено на безперспективності застосування системи "стоп-старт" із традиційною електростартерною системою пуску двигунів. Енергетичні витрати та витрати палива на пуск двигунів і напрямки їх оптимізації частково висвітлено у роботах [2, 8]. Однак теоретичні залежності, які моделюють особливості витрат палива в разі застосування системи "стоп-старт" у сучасних системах управління пуском двигунів, у відкритих публікаціях відсутні.

Формулювання мети дослідження. Метою роботи є обґрунтування теоретичних залежностей, які моделюють особливості витрат палива в разі застосування системи "стоп-старт" у сучасних системах управління пуском двигунів.

¹ доц. С.В. Немий, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

Зазначені теоретичні залежності становитимуть аналітичну основу обґрунтування доцільності застосування системи "стоп-старт" на автомобілях, залежно від умов експлуатації.

Основний матеріал. Система "стоп-старт" виконує функції автоматичного керування зупиненням і пуском двигуна, забезпечуючи додаткову економію палива за рахунок зменшення тривалості роботи двигуна на марному ході під час зупинень автомобіля та під час повільного його руху із нейтральним положенням коробки передач [6]. Система починає автоматично функціонувати, якщо попередній пуск двигуна було здійснено стартером і двигун прогрітий до температури охолоджуючої рідини не менше ніж 65 °С. Стартер і коло запалювання вмикається системою "стоп-старт", якщо двигун зупинено і з моменту його зупинення пройшло не менше 0,6 с та педаль зчеплення витиснута.

Методика розрахунку витрат палива, потрібного для одного пуску двигуна за заданої його температури, наведено у роботі [2]. За результатами попередніх досліджень [2], розраховані витрати палива для одного пуску, наприклад двигуна ЗІЛ-130, залежно від його температурного стану наведено у табл.

Витрати палива (Q_n) під час роботи двигуна на марному ході за час зупинення можна визначити за формулою

$$Q_n = \frac{G_m t_o}{3600\gamma}, \quad (1)$$

де: G_m – годинна витрата палива під час роботи двигуна на марному ході (рис. 1), кг/год; t_o – тривалість зупинки для виходу і входу пасажирів або очікування при заборонному сигналі світлофора, с; γ – густина палива, кг/л.

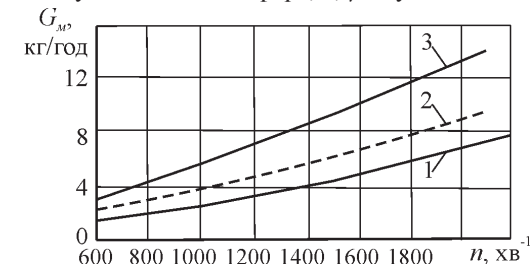


Рис. 1. Залежність годинної витрати палива під час роботи двигунів на марному ході: 1) ЗІЛ-130 [5]; 2) ЯМЗ-236Н; 3) ЯМЗ-236 HE (дані заводу-виготовлювача)

За результатами проведених досліджень щодо автобусів [3] у міському режимі руху середня тривалість очікування при заборонному сигналі світлофора $t_{cc} = 27,98$ с, а тривалість зупинки автобуса на міському маршруті для виходу і входу пасажирів $t_s = 19,14$ с. Результати розрахунку за формулою (1), наприклад для двигуна ЗІЛ-130, за вказаних значень $t_o = 27,98$ і $19,14$ с, наведено у табл.

За наведеними вище розрахунками показано графіки залежності витрат палива на один пуск двигуна Q_n та під час роботи двигуна на марному ході за час очікування при заборонному сигналі світлофора і впродовж зупинки автобуса для виходу і входу пасажирів Q_m (рис. 2). Як бачимо на графіках, систему "стоп-старт" для економії палива вигідно використовувати за температури двигуна, значення якої знаходиться справа від точки перетину кривої 1 із кривими 2 і 3.

Табл. Розрахунок витрат палива на марному ході двигуна за час зупинення

Параметр	Значення			
Температура двигуна T_{δ} , °C	0	20	60	80
Густина палива, кг/л	0,796	0,78	0,75	0,73
Витрати палива для одного пуску двигуна Q_n , л	0,057	0,019	0,0026	0,00213
Витрати палива двигуном на марному ході під час службової зупинки автобуса Q_{M1} , л	0,01	0,0102	0,0106	0,0110
Витрати палива двигуном на марному ході під час заборонного сигналу світлофора Q_{M2} , л	0,01465	0,0150	0,0155	0,0160

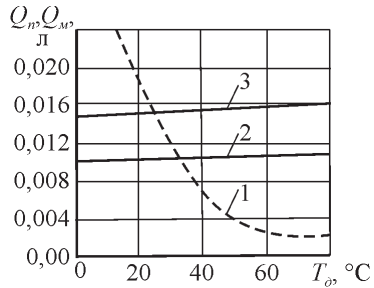


Рис. 2. Витрати палива залежно від температурного стану двигуна: 1) на один пуск двигуна Q_n ; 2) на марному ході впродовж зупинки автобуса для виходу і входу пасажирів Q_{M1} ; 3) на марному ході впродовж заборонного сигналу світлофора Q_{M2}

Однак на практиці, в русі АТЗ та під час короточасних зупинок, спричинених регулюванням руху та посадкою і висадкою пасажирів, температура справного двигуна навіть у холодну пору року не повинна бути нижчою ніж 80 °C. У цьому випадку перевага застосування системи "стоп-старт", порівняно із роботою двигунів на марному ході під час короточасних зупинень АТЗ, щодо економії палива є очевидною.

Економію палива від функціонування системи "стоп-старт" за розглядуваний пробіг пропонуємо визначати за формулою

$$\Delta Q = T_3 G_m \gamma - Q_n n L, \quad (2)$$

де: T_3 – сумарна тривалість зупинок у процесі руху за розглядуваний пробіг, год; n – кількість пусків двигуна (кількість зупинок) на 1 км пробігу; L – розглядуваний пробіг АТЗ, км.

На основі даних роботи [3] кількість зупинок на 1 км пробігу пропонуємо визначати за формулою

$$n = n_3 + n_p(1 - p) + n_{mn} + n_{mz}, \quad (3)$$

де: n_3 – кількість штатних зупинок АТЗ на 1 км пробігу; n_p – кількість регульованих перехресть на 1 км пробігу; p – ймовірність проїзду регульованих перехресть без зупинення; n_{mn} – ймовірнісна величина, що визначає кількість зупинок АТЗ на нерегульованих пішохідних переходах на 1 км пробігу; n_{mz} – ймовірнісна величина, що визначає кількість зупинень АТЗ через транспортні затори на 1 км пробігу.

Сумарну тривалість зупинок у процесі руху за розглядуваний пробіг можна визначити за формулою

$$T_3 = \alpha_n T_p, \quad (4)$$

де: α_n – відношення часу простою до часу руху АТЗ; T_p – час руху автомобіля;

$$\alpha_n = \Delta t_c / (1 - \Delta t_c), \quad (5)$$

де Δt_c – відносний час зупинок у процесі руху АТЗ на маршруті.

Час руху автобуса визначаємо за формулою

$$T_p = L / V_c, \quad (6)$$

де V_c – середня швидкість руху АТЗ, км/год.

На основі формул (2), (4)-(6) остаточно отримаємо:

$$\Delta Q = \frac{G_m \Delta t_c L}{V_c \gamma (1 - \Delta t_c)} - Q_n n L = L \left[\frac{G_m \Delta t_c}{V_c \gamma (1 - \Delta t_c)} - Q_n n \right]. \quad (7)$$

Економію коштів визначають за формулою

$$E = \Delta Q C_{\delta}, \quad (8)$$

де C_{δ} – вартість палива, грн/л. На основі наведеного вище оцінимо, наприклад, ефективність від функціонування системи "стоп-старт" середнього міського автобуса під час нормативного пробігу (до капітального ремонту) $L = 500000$ км.

Згідно зі статистичними дослідженнями кількість зупинок автобуса на 1 км пробігу $n_3 = 1,68$; кількість регульованих перехресть на 1 км пробігу $n_p = 0,44$ [4]; ймовірність проїзду регульованих перехресть без зупинення $p = 0,532$; відносний час зупинок у процесі руху автобуса на маршруті $\Delta t_c = 0,23$; середня швидкість руху автобуса $V_c = 21,5$ км/год. [3]. Годинна витрата палива під час роботи двигуна ЗІЛ-130 на марному ході $G_m = 1,5$ л/год (див. рис. 1).

Без врахування зупинок автобуса на нерегульованих пішохідних переходах і зупинень автомобіля через транспортні затори за формулою (3) отримаємо: $n = 1,68 + 0,44(1 - 0,532) = 1,9$ зупинок на 1 км. Виходячи із наведених вище даних, за температури двигуна 80 °C (див. табл.), за формулою (7) отримаємо: $\Delta Q = 500000 \{ 1,5 \cdot 0,23 / [(1 - 0,23) 21,5 \cdot 0,73] - 0,00213 \cdot 1,9 \} = 12250,2$ л.

Цілком очевидно, що економічна доцільність застосування системи "стоп-старт" буде визначатися залежністю

$$B + B_{\text{тор}} < E, \quad (9)$$

де: B – початкова вартість системи "стоп-старт" (із врахуванням відповідного збільшення вартості двигуна); $B_{\text{тор}}$ – витрати на технічне обслуговування і ремонт системи "стоп-старт" упродовж заданого (нормативного) пробігу.

Значення витрат на технічне обслуговування і ремонт системи "стоп-старт", залежно від пробігу, встановлюють за результатами відповідних статистичних досліджень. Маючи статистичні дані за питомими витратами на технічне обслуговування і ремонт системи "стоп-старт" (грн/км пробігу) на основі рівнянь (8) і (9) можна записати

$$B + B_{\text{тор}} L \leq \left(\frac{G_m \Delta t_c}{V_c \gamma (1 - \Delta t_c)} - Q_n n \right) L C_{\delta}, \quad (10)$$

де $B_{\text{тор}}$ – питомі витрати на технічне обслуговування і ремонт системи "стоп-старт", грн/км. Тоді, виходячи із рівняння (10), орієнтовний термін окупності системи (км пробігу), без врахування можливих перспективних змін вартості палива, можна розрахувати за формулою

$$L_{ок} = \frac{B}{\left[\frac{G_m \Delta t_c}{(1 - \Delta t_c) V_c \gamma} - Q_n n \right] \left[\zeta_{\delta} - \Pi_{тор} \right]} \quad (11)$$

За наявності відповідних статистичних даних щодо тривалості зупинок АТЗ на маршруті на один км пробігу ефективність функціонування системи "стоп-старт" можна визначити за аналогічною методикою. Зокрема, економію палива від функціонування системи "стоп-старт" за певний пробіг можна визначити за формулою

$$\Delta Q = L[(Q_{M1} - Q_n) n_3 + (Q_{M2} - Q_n) n_p(1 - p) + (Q_{M3} - Q_n) n_{mm} + (Q_{M4} - Q_n) n_{m3}], \quad (12)$$

де Q_{M3} і Q_{M4} – витрати палива двигуном на марному ході під час зупинці АТЗ, відповідно, на нерегульованому пішохідному переході і через транспортний застр. Економічна доцільність застосування системи "стоп-старт" буде визначатися залежністю (9).

За статистичними даними щодо питомих витрат на технічне обслуговування і ремонт системи "стоп-старт" (грн на 1 км пробігу) на основі рівнянь (9) і (12) можна записати аналогічно рівнянню (10)

$$B + \Pi_{тор} L \leq [(Q_{M1} - Q_n) n_3 + (Q_{M2} - Q_n) n_p(1 - p) + (Q_{M3} - Q_n) n_{mm} + (Q_{M4} - Q_n) n_{m3}] L \zeta_{\delta} \quad (13)$$

Тоді, виходячи із рівняння (13), орієнтовний термін окупності системи (км пробігу), без врахування можливих перспективних змін вартості палива, можна розрахувати за формулою

$$L_{ок} = \frac{B}{\left[(Q_{M1} - Q_n) n_3 - (Q_{M2} - Q_n) n_p(1 - p) + (Q_{M3} - Q_n) n_{mm} + (Q_{M4} - Q_n) n_{m3} \right] \left[\zeta_{\delta} - \Pi_{тор} \right]} \quad (14)$$

Рівняння (7), (10), (11) і (12)-(14) є відповідно тотожними.

Напрямки подальших досліджень. Наведені вище теоретичні залежності враховують значення витрат палива для одного пуску двигуна Q_n , отримані розрахунковим методом [2], виходячи із енергетичних витрат на подолання моменту опору повертання двигуна. На практиці у процесі пуску витрати палива можуть бути більшими, виходячи із фактичної подачі палива у циліндри двигуна. Через це актуальними є експериментальні дослідження для визначення фактичних витрат палива у процесі пуску. Це дасть змогу провести об'єктивне оцінювання доцільності використання системи "стоп-старт" на АТЗ.

Висновки:

1. Обґрунтовано теоретичні залежності, які моделюють особливості витрат палива в разі застосування системи "стоп-старт" у сучасних системах управління пуском двигунів.
2. На прикладі розрахунку доведено, що під час короткочасних зупинок автомобілів застосування системи "стоп-старт" сприяє зменшенню витрат палива, порівняно із роботою двигунів на марному ході впродовж зупинок.
3. Економічна доцільність застосування системи "стоп-старт" визначається співвідношенням витрат на інсталяцію (із врахуванням відповідного збільшення вартості двигуна), технічне обслуговування і ремонт системи та економії коштів за рахунок зменшення витрат палива.

Література

1. Немий С.В. Формування експлуатаційної ефективності системи електростартерного пуску двигунів автобусів / С.В. Немий, І.Р. Вайда // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2009. – № 641. – С. 56-61.
2. Немий С.В. Енергетична ефективність системи електростартерного пуску автомобільних двигунів / С.В. Немий, В.М. Бритковський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2014. – № 788. – С. 37-42.
3. Немий С.В. Статистичне дослідження тривалості зупинок автобусів в русі на міських маршрутах / С.В. Немий // Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні: тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. до 50-річчя ін-ту Укравтобуспром / ВКЕІАвтобуспром, Львів 24-25 вересня 2015 р. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2015. – С. 86-88.
4. Немий С.В. Енергетичні витрати у фрикційному зчепленні трансмісії автомобіля / С.В. Немий // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів та поїздів : щорічний наук.-виробн. журнал. – Львів. – 2012. – № 20. – С. 231-241.
5. Белов П.М. Двигатели армейских машин / П.М. Белов, В.Р. Бурячко, Е.И. Акатов. – Ч. первая. Теория. – М. : Изд-во "Воениздат", 1971. – 512 с.
6. Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей : учебник [для студ. ВУЗов] / Ю.П. Чижков, А.В. Акимов. – М. : Изд-во "За рулем", 1999. – 384 с.
7. Чижков Ю.П. Электростартерный пуск автотракторных двигателей / Ю.П. Чижков, С.М. Квайт, Н.Н. Сметнев. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1985. – 160 с.
8. Хортов В.П. Высоковольтные системы пуска ДВС / В.П. Хортов. – М. : Изд-во "Автомобильная пром-сть", 1993. – № 6. – С. 20-22.
9. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей : учебн. [для студ. автодор. ВУЗов] / В.Е. Ютт. – М. : Изд-во "Транспорт", 1989. – 287 с.

Надіслано до редакції 23.02.2016 р.

Немий С.В. Эксплуатационная эффективность системы "стоп-старт" автомобилей

Рассмотрена энергетическая эффективность системы "стоп-старт" современных автомобилей в аспекте эксплуатационного расхода топлива. Обоснованы теоретические зависимости, моделирующие особенности расхода топлива при применении системы "стоп-старт" в современных системах управления пуском двигателей. Доведено, что при кратковременных остановках автомобилей применение системы "стоп-старт" способствует снижению расхода топлива. Экономическая целесообразность применения системы "стоп-старт" определяется соотношением затрат на установку (с учетом соответствующего увеличения стоимости двигателя), техническое обслуживание и ремонт системы и экономии средств за счет уменьшения расхода топлива.

Ключевые слова: электростартерный пуск, стоп-старт, температурное состояние двигателей, стартер, энергия для пуска двигателя, расход топлива двигателем на холостом ходу, расход топлива для пуска, экономия топлива.

Niemyj S.V. Operating Efficiency of the Stop-Start Car System

Power efficiency of the stop-start systems of modern cars in the aspect of running expenses of fuel is considered. Theoretical dependencies on modelling of special features of expenses of the fuel at application of the stop-start system in modern control system starting of engines are substantiated. The economic feasibility of the stop-start system is defined by the installation costs (taking into account the corresponding increase in the value of the engine), maintenance and repair of the system, and also on saving money by reducing fuel consumption.

Keywords: electric starter start-up, stop-start, temperature condition of the engine, the starter, the energy to start the engine, expenses of the fuel consumption in the idle engine run, fuel for start-up, saving fuel.