

УДК 621.833.67

Р.О. Кайдалов

Національна академія Національної гвардії України, Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ АВТОМОБІЛЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГІБРИДНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ ВЕДУЧИХ КОЛІС

Показано вплив нерівномірності крутного моменту двигунів внутрішнього згорання на тягову силу автомобіля. Встановлено, що ця нерівномірність призводить до непродуктивних додаткових витрат енергії автомобіля. Проведено оцінку зниження непродуктивних витрат енергії двигуна на рух автомобіля при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс. Запропоновано метод оцінки непродуктивних витрат енергії на рух автомобіля та критерій для їх оцінювання, що представляє собою співвідношення додаткової витрати енергії до роботи сил зовнішнього опору руху автомобіля. Отримано аналітичний вираз для визначення коефіцієнта непродуктивних витрат енергії автомобіля з гібридним електромеханічним приводом ведучих коліс.

Ключові слова: енергетичні втрати, тягова сила, витрати енергії, гібридний електромеханічний привід ведучих коліс.

Вступ

Постановка проблеми. Автомобілі та бойові (АБМ) машини залишаються основними засобами рухомості практично усіх об'єктів озброєння та військової техніки, що забезпечує тактичну і оперативну маневреність військ при виконанні ними службово-бойових завдань. На сьогоднішній день існуючий парк АБМ Національної гвардії (НГ) та інших силових структур України характеризується різномарочністю і великою кількістю модифікацій, при цьому в значній мірі він представлений застарілими зразками.

Проведений аналіз зміни кількісного та якісного складу парку автомобілів та бойових машин за 2014-2016 роки показав збільшення відсотку нових зразків техніки, здебільшого вітчизняного виробництва. Введення в експлуатацію наступних зразків: лінійки вітчизняних вантажних автомобілів КрАЗ різної колісної формули (4x2, 4x4, 6x6) різного функціонального призначення; нових броньованих автомобілів КрАЗ «Cougar-APC», КрАЗ «Spartan-APC», КрАЗ «Shrek-APC», «Козак»; бронетранспортерів БТР-3Е та лінійки бронетранспортерів, що створені на базі БТР-4Е, свідчить про модернізацію парку машин за рахунок нової вітчизняної техніки [1].

Специфіка використання військової колісної техніки, полягає у русі: в різних дорожніх умовах (бездоріжжя, дороги з різним дорожнім покриттям), що вимагає підвищення запасу тягової сили; у складі автомобільних колон на значні відстані з максимально можливою середньою швидкістю руху, що вимагає підвищення показників динамічності, маневреності та зниження енергетичних витрат.

Але існуючи зразки АБМ обладнанні двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ), які створюють високу

нерівномірність крутного моменту, що призводить до непродуктивних додаткових витрат енергії на рух автомобілів. Величина вказаних витрат пропорційна амплітудам коливань крутного моменту ДВЗ та тягової сили на ведучих колесах. Застосування гібридного приводу ведучих коліс автомобіля дозволяє зменшити амплітуду коливань тягової сили.

У статті проведено оцінку зниження непродуктивних витрат енергії двигуна на рух автомобіля при дослідженні електромеханічного приводу ведучих коліс.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі зниження витрати палива і токсичності відпрацьованих газів автомобілів присвячено значна кількість наукових досліджень. Значний вклад у рішення вказаної проблеми внесли М.Я. Говорущенко [2]. Одним з перших енергетичних підходів до оцінки ефективності автомобіля запропонував П.М. Гашук [3]. Цей підхід отримав свій розвиток у роботах П.П. Євсєєва [4]. Слід відмітити також із закордонних джерел роботу Ю. Мацкерле [5]. Поява нових, альтернативних ДВЗ енергоустановок (електричні двигуни, водневі ДВЗ, гібридні енергоустановки і т.п.), джерел енергії (акумуляторів, маховиків) [6–8] призвела до необхідності розширення поняття (експлуатаційної властивості) «паливна економічність», включенням до нього витрати не тільки теплової енергії палива, а й енергії інших видів (електричної та механічної). У роботі [9] запропоновано ввести поняття «енергетична економічність автомобіля» та розглянуті можливі критерії для її оцінки.

Дослідженню впливу нерівномірності крутного моменту ДВЗ тягової сили на ведучих колесах присвячені роботи [10, 11]. У роботі [10] з використанням гармонійного закону зміни сумарної тягової сили на ведучих колесах

$$P_k = \bar{P}_k + A_{pk} \sin(\Omega t) \quad (1)$$

визначено, що додаткові втрати енергії, які обумовлені нерівномірністю тягової сили можуть бути знайдені із такої залежності:

$$\Delta W = \frac{A_{pk}}{\pi} \cdot S, \quad (2)$$

де \bar{P}_k – середнє значення тягової сили;
 A_{pk} – амплітуда коливань тягової сили;
 Ω – колова частота коливань крутного моменту ДВЗ і тягової сили на колесах;
 t – час; S – пробіг автомобіля.

Однак зазначені результати відносяться до оцінки додаткових втрат енергії на рух автомобіля тільки при механічному приводі від ДВЗ ведучих коліс. Викликає інтерес оцінка додаткових витрат енергії при реалізації запропонованого нами [12] гібридного електромеханічного приводу ведучого колеса автомобіля (рис. 1).

Мета та постановка завдань дослідження.

Метою дослідження є розроблення методу оцінки зниження енергетичних втрат, які викликані нерівномірністю крутного моменту ДВЗ (тягової сили), при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступне завдання щодо визначення додаткових витрат енергії на рух автомобіля при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс.

Виклад основного матеріалу

При використанні механічного приводу від двигуна внутрішнього згоряння крутний момент на ведучих колесах визначається такою залежністю:

$$M_k = \frac{r_d}{n} \left(\sum P_o + m_a \dot{V}_a \right) = \frac{r_d}{n} \times \left[\bar{P}_k + A_{pk} \sin(\Omega t) \right], \quad (3)$$

де r_d – динамічний радіус ведучих коліс;
 n – число ведучих коліс автомобіля;
 $\sum P_o$ – сума сил зовнішнього опору руху автомобіля;
 m_a – маса автомобіля;
 \dot{V}_a – лінійне прискорення автомобіля.

При сталому русі автомобіля середній крутний момент на колесі, що підведений від ДВЗ, дорівнює моменту опору руху [10, 11]. У цьому випадку рівняння (3) прийме вигляд

$$M_k = \frac{r_d}{n} \cdot \sum P_o = \frac{r_d}{n} \bar{P}_k = \bar{M}_k, \quad (4)$$

де \bar{M}_k – середній крутний момент на колесі,

$$\bar{M}_k = \frac{\bar{M}_i \cdot U_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{мдв}}{n}; \quad (5)$$

U_{tr} – передаточне число трансмісії;

η_{tr} – ККД трансмісії;

$\eta_{мдв}$ – механічний ККД ДВЗ;

\bar{M}_i – середній індикаторний момент ДВЗ.

Індикаторний крутний момент ДВЗ [9, 10]

$$M_i = \bar{M}_i + 0,5\bar{M}_i \cdot K_1 \cdot \sin\left(\frac{\omega_e}{2} \cdot i_{ц} \cdot t\right), \quad (6)$$

де K_1 – коефіцієнт нерівномірності крутного моменту ДВЗ [9, 10],

$$K_1 = 0,08 + \frac{14,44}{i_{ц}}; \quad (7)$$

$i_{ц}$ – кількість циліндрів ДВЗ;

$\bar{\omega}_e$ – середнє значення кутової швидкості колінчастого валу ДВЗ.

Тоді крутний момент на колесі може бути визначено як

$$M_k = \frac{M_i \cdot U_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{мдв}}{n} = \frac{U_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{мдв}}{n} \times \left[\bar{M}_i + 0,5\bar{M}_i \cdot K_1 \cdot \sin\left(\bar{\omega}_e/2 \cdot i_{ц} \cdot t\right) \right]. \quad (8)$$

Зіставляючи рівняння (3) та (8) можна визначити

$$\frac{\bar{P}_k}{n} = \frac{U_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{мдв}}{n \cdot r_d} \bar{M}_i \quad (9)$$

або

$$\bar{P}_k = \frac{\bar{M}_i \cdot U_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{мдв}}{r_d}. \quad (10)$$

Тоді амплітуда коливань сумарної тягової сили буде дорівнювати

$$A_{pk} = \frac{A_{mk} \cdot n}{r_d} = \frac{U_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{мдв} \cdot K_1}{2 \cdot r_d} \cdot \bar{M}_i. \quad (11)$$

Підставляючи (11) у (2), отримаємо

$$\Delta W = \frac{U_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{мдв} \cdot K_1}{2\pi \cdot r_d} \cdot \bar{M}_i \cdot S. \quad (12)$$

При використанні гібридного електромеханічного приводу ведучого колеса (рис. 1) крутний момент на колесі дорівнює

$$M_k = M_H = M_1 + M_3, \quad (13)$$

де M_H – крутний момент на валу водила H (який дорівнює крутному моменту на колесі);

M_1 – крутний момент на сонячній шестерні 1 (який підводиться від ДВЗ);

M_3 – крутний момент на епіциклі 3 (який підводиться від електродвигуна).

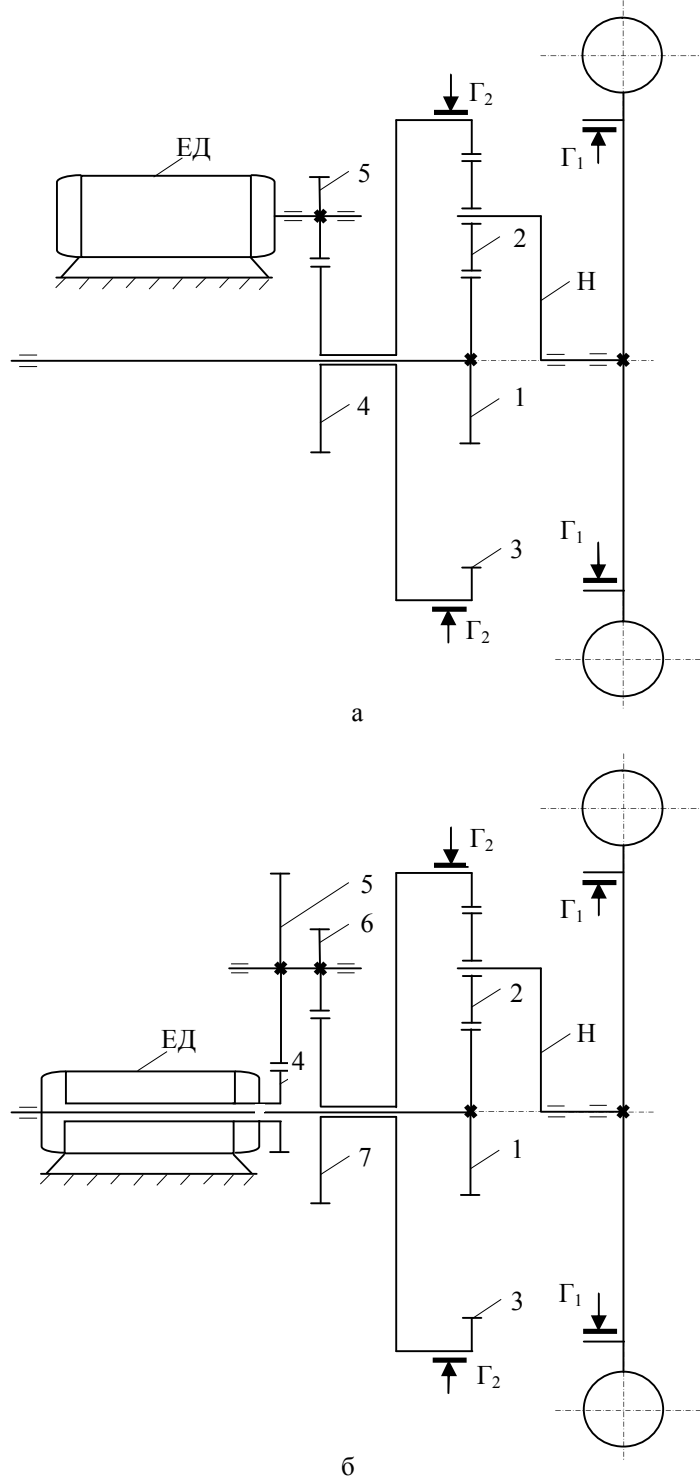


Рис. 1. Схема гібридного електромеханічного приводу ведучого колеса автомобіля:
 а – з асиметричним встановленням електродвигуна;
 б – з співвісним встановленням електродвигуна

У цьому випадку вираз (3) прийме вигляд

$$M_k = \frac{\Gamma_D}{n} \left(\sum P_o + m_a \dot{V}_a \right) = \frac{U_{тр} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{мдв}}{n} \times \left[\overline{M}_i' + 0,5 \overline{M}_i' \cdot K_1 \cdot \sin \left(\frac{\omega_e}{2} \cdot i_{ц} \cdot t \right) \right] + M_{ед}, \quad (14)$$

де $M_{ед}$ – момент, що підведений від електродвигуна $M_{ед} = M_H$;
 \overline{M}_i' – індикаторний крутний момент ДВЗ, що реалізується при гібридному приводі ведучих коліс, $\overline{M}_i' < \overline{M}_i$.

У сталому режимі руху

$$M_k = \frac{r_d}{n} \sum P_o = \frac{U_{тр} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{мдв}}{n} \cdot \bar{M}_i' + M_{ед}. \quad (15)$$

Прирівнюючи праві частини (5) та (15), визначимо

$$\bar{M}_i' = \bar{M}_i - M_{ед} \frac{n}{U_{тр} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{мдв}}. \quad (16)$$

Підставляючи у рівняння (11) замість \bar{M}_i із рівняння (16), отримуємо

$$A_{рк} = \frac{K_1}{2r_d} \left(\bar{M}_i' \cdot U_{тр} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{мдв} - M_{ед} \cdot n \right). \quad (17)$$

З урахуванням співвідношень (5) та (4) вираз (17) прийме вигляд

$$\begin{aligned} A_{рк} &= \frac{K_1}{2} \left(\sum P_o - M_{ед} \frac{n}{r_d} \right) = \\ &= \frac{K_1}{2} \sum P_o \left(1 - \frac{M_{ед} \cdot n}{\sum P_o \cdot r_d} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Підставляючи співвідношення (18) у вираз (2), отримуємо для гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс

$$\Delta W = \frac{K_1}{2\pi} \sum P_o \cdot S \left(1 - \frac{M_{ед} \cdot n}{r_d \cdot \sum P_o} \right). \quad (19)$$

У виразі (19) виділимо долю крутного моменту на ведучих колесах, яка створюється електродвигуном

$$K_{ед} = \frac{M_{ед} \cdot n}{r_d \cdot \sum P_o}. \quad (20)$$

У рівнянні (19) робота сил зовнішнього опору руху автомобіля

$$A_o = S \cdot \sum P_o \quad (21)$$

є об'єктивна характеристика завжди існуючих втрат енергії, зменшити яку неможливо. Skorистуємося у якості критерію додаткових втрат енергії відносним показником

$$\eta_{\Delta W} = \frac{\Delta W}{A_o} = \frac{K_1}{2\pi} (1 - K_{ед}). \quad (22)$$

Назвемо запропонований показник коефіцієнтом непродуктивних втрат, що враховує вплив нерівномірності крутного моменту ДВЗ. Після підстановки співвідношення (7) у рівняння (22) остаточно отримуємо

$$\eta_{\Delta W} = \frac{0,04 + \frac{7,22}{i_{ц}}}{\pi} (1 - K_{ед}). \quad (23)$$

У табл. 1 наведено результати розрахунку показника $\eta_{\Delta W}$ для гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс автомобіля з різним числом $i_{ц}$ циліндрів ДВЗ і коефіцієнті $K_{ед}$.

Таблиця 1

Результати розрахунку коефіцієнту додаткових втрат

$i_{ц}$	$\eta_{\Delta W}$					
	$K_{ед} = 0$	$K_{ед} = 0,2$	$K_{ед} = 0,4$	$K_{ед} = 0,6$	$K_{ед} = 0,8$	$K_{ед} = 1,0$
1	2,310	1,849	1,386	0,924	0,462	0
2	1,162	0,929	0,697	0,464	0,232	0
4	0,587	0,470	0,352	0,235	0,117	0
6	0,396	0,317	0,237	0,158	0,079	0
8	0,300	0,240	0,180	0,120	0,060	0
10	0,242	0,194	0,145	0,097	0,048	0
12	0,204	0,163	0,123	0,082	0,040	0

Висновки

1. У результаті проведеного дослідження запропоновано метод оцінки непродуктивних втрат енергії на рух автомобіля, які обумовлені нерівномірністю крутного моменту двигуна внутрішнього згоряння.

Запропоновано критерій – коефіцієнт непродуктивних втрат енергії, що представляє собою співвідношення додаткової витрати енергії до роботи сил зовнішнього опору руху автомобіля.

2. Отриманий аналітичний вираз для коефіцієнта непродуктивних втрат енергії автомобіля з гібридним електромеханічним приводом ведучих коліс дозволив визначити наступне:

– найбільше значення коефіцієнт непродуктивних втрат енергії має для одноциліндрового двигуна при відсутності електричного приводу ($K_{ед} = 0$); це значення дорівнює $\eta_{\Delta W} = 2,31$;

– при числі циліндрів ДВЗ $i_{ц} = 12$ коефіцієнт $\eta_{\Delta W}$ складає 0,204 при $K_{ед} = 0$;

– застосування гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс дозволяє знизити $\eta_{\Delta W}$, наприклад, для шестициліндрового двигуна від 0,396 при $K_{ед} = 0$ до 0,158 при $K_{ед} = 0,6$, що складає зниження коефіцієнта непродуктивних втрат енергії майже на 40 %.

3. Отримані результати дозволяють дати рекомендації щодо створення вимог до гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс автомобіля при його проектуванні.

Потребують подальшого дослідження визначення параметрів розгону автомобіля при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс.

Список літератури

1. Кайдалов Р.О. Оцінка зміни складу парку автомобілів та бойових машин Національної гвардії України та шляхи його удосконалення / Р.О. Кайдалов // *Одинадцята наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: тези доповідей*, 08 – 09 квітня 2015 року. – Х.: ХУПС, 2015. – С. 260-261.
2. Говорущенко Н.Я. Экономика топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте / Н.Я. Говорущенко. – М.: Транспорт, 1990. – 135 с.
3. Гацук П.Н. Энергетическая эффективность автомобиля / П.Н. Гацук. – Львов: Свет, 1992. – 208 с.
4. Евсеев П.П. Некоторые вопросы энергетики автомобиля / П.П. Евсеев. – К.: Вектор, 2006. – 236 с.
5. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль / Ю. Мацкерле: пер. с чешск. В.Б. Иванова: под ред. А.Р. Бендикова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
6. Бажин О.В. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / О. В. Бажин, О. П. Смирнов, С. А. Серіков, та ін. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.

7. Гібридні автомобілі / О.В. Бажин, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, та ін. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327 с.

8. *Электромобиль: техника и экономика* / В.А. Щетина, Ю.Я. Морговский, Б.И. Центр, В.А. Богомазов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 236 с.

9. Подригало М.А. Энергетическая экономичность автомобиля и критерии её оценки / М.А. Подригало, Д.В. Абрамов, Ю.В. Тарасов, В.М. Ефимчук // *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування.* – №40 (1119), 2015. – С. 28-37.

10. Подригало М.А. Оценка дополнительных энергетических потер при установившемся режиме движения транспортно-тяговых машин / М.А. Подригало, Н.П. Артёмов, Д.В. Абрамов, М.Л. Шуляк // *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування.* – №9 (1118), 2015. – С. 98-107.

11. Влияние неравномерности крутящего момента двигателя внутреннего сгорания на энергетическую экономичность колёсных транспортных средств / М.А. Подригало, А.С. Полянский, Н.М. Подригало, Д.В. Абрамов // *Залізничний транспорт України. Науково-практичний журнал.* – №6, 2015. – К.: ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України». – С.40-46.

12. Кайдалов Р.О. Дослідження кінематики і динаміки гібридного електромеханічного приводу ведучого колеса автомобіля / Р.О. Кайдалов // *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми механічного приводу.* – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 36.

Надійшла до редколегії 21.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.С. Поляньський, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ВЕДУЩИХ КОЛЕС

Р.О. Кайдалов

Показано влияние неравномерности крутящего момента двигателей внутреннего сгорания на тяговую силу автомобиля. Установлено, что эта неравномерность приводит к непроизводительным дополнительным затратам энергии автомобиля. Проведена оценка снижения непроизводительных потерь энергии двигателя на движение автомобиля при использовании гибридного электромеханического привода ведущих колес. Предложен метод оценки непроизводительных затрат энергии на движение автомобиля и критерий для их оценки, представляющий собой отношение дополнительного расхода энергии к работе сил внешнего сопротивления движению автомобиля. Получено аналитическое выражение для определения коэффициента непроизводительных потерь энергии автомобиля с гибридным электромеханическим приводом ведущих колес.

Ключевые слова: энергетические потери, тяговая сила, затраты энергии, гибридный электромеханический привод ведущих колес.

STUDY THE POSSIBILITY OF REDUCING THE ENERGY LOSS OF THE CAR USING A HYBRID ELECTROMECHANICAL DRIVE OF DRIVING WHEELS

R.O. Kaidalov

The influence of non-uniformity of the torque of internal combustion engines on the car's pulling power. It is found that this irregularity leads to unproductive vehicle additional energy costs. The estimation of reducing unnecessary loss of engine power to move the car using a hybrid electromechanical actuator drive wheels. A method for estimating the overhead power car traffic and the criterion for their assessment, which is an additional energy consumption related to the work of the external resistance movement forces the car. An analytical expression for the ratio of unproductive energy losses car with a hybrid electromechanical drive the drive wheels.

Keywords: power losses, traction power, energy consumption, hybrid electromechanical drive the drive wheels.