

ОЦІНКА ЕКОНОМІЇ ЕНЕРГІЇ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ ПРИ СТАЛОМУ РУСІ

Вступ. Вимоги до енергетичної ефективності автотранспортних засобів у світі постійно зростають. Використання гібридних автомобілів (автомобілів з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс) розширюється, що дає значний економічний ефект й покращення екологічної обстановки.

В статті запропонований метод оцінювання економії енергії автомобілів при сталому русі у разі використання комбінованого електромеханічного приводу ведучих коліс.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вимоги щодо підвищення показників енергетичної ефективності автотранспортних засобів у світі постійно зростає [1 - 8], що призвело до необхідності розробки й впровадження електромобілів та автомобілів з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс (гібридних автомобілів) [9 - 11]. За результатами проведених досліджень визначено, що в режимі розгону автомобіля й його руху в сталому русі при використанні тільки електричного приводу забезпечується економія енергії ц палива. Однак у відомих дослідженнях не розкрита фізична сутність й не проведено кількісної оцінки економії енергії й палива при русі автомобіля у сталому русі з одночасним використанням електричного й механічного (від ДВЗ) приводів ведучих коліс.

В роботі [12] показано, що резервом зниження непродуктивних витрат енергії й палива є зниження нерівномірності тягової сили, що обумовлено нерівномірністю індикаторного крутного моменту ДВЗ. У разі сумісної роботи електричної й механічної (від ДВЗ) частин приводу ведучих коліс автомобіля відбувається зменшення амплітуди коливань тягової сили [13]. У роботі [13] проведено дослідження впливу співвідношень крутних моментів, які створюються електродвигунами й ДВЗ на ведучих колесах на зниження витрат енергії при сталому русі автомобіля. Однак у роботі [13] не проведено оцінювання економії енергії й палива гібридного автомобіля при сталому русі.

Мета й завдання дослідження. Метою дослідження є удосконалення методів оцінювання економії енергії й палива гібридних автомобілів при сталому русі. Для досягнення поставленої мети необхідно провести оцінку економії енергії ДВЗ автомобіля з комбінованим електромеханічним приводом при сталому русі.

Виклад основного матеріалу. Оцінка економії енергії двигуна автомобіля з комбінованим електромеханічним приводом при сталому русі.

Розглянемо рух автомобіля на ділянці шляху, яка вимірюється з постійною швидкістю $\overline{V}_a = const$. Сумарний шлях S , який пройдений автомобілем можна розділити на три ділянки

$$S = S_1 + S_2 + S_3, \quad (1)$$

де S_1 ; S_2 ; S_3 – ділянки шляху, який пройдений автомобілем при роботі тільки механічного, механічного й електричного та тільки електричного приводів ведучих коліс.

© Р.О. Кайдалов, 2017

Витрата енергії на подолання сил дорожнього опору

$$W_{\text{д.о.}} = \left(m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^2 \right) S, \quad (2)$$

де m_a – маса автомобіля; g – прискорення вільного падіння; ψ – сумарний коефіцієнт дорожнього опору; C_x – коефіцієнт лобового аеродинамічного опору; ρ – густина повітря; F – площа лобового перерізу (мідель) автомобіля.

У разі нерівномірності дії крутного моменту ДВЗ [13] додаткові втрати енергії двигуна дорівнюють

$$\Delta W_e = \frac{K_1}{2\pi} \left(m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^2 \right) S_{\text{двз}} (1 - K_{\text{ед}}), \quad (3)$$

де $K_{\text{ед}}$ – коефіцієнт використання електричного приводу;

$$K_{\text{ед}} = \frac{\sum M_{\text{ед}}}{\sum M_{\text{двз}}}; \quad (4)$$

де $\sum M_{\text{ед}}$; $\sum M_{\text{двз}}$ – сумарні моменти на ведучих колесах, що створюються механічною трансмісією від ДВЗ й електричним приводом, відповідно; K_1 – коефіцієнт нерівномірності крутного моменту ДВЗ;

$$K_1 = 0,08 + \frac{14,44}{i_u}; \quad (5)$$

де i_u – число циліндрів ДВЗ; $S_{\text{двз}}$ – шлях, який пройдений автомобілем при використанні енергії ДВЗ.

При русі автомобіля з використанням тільки ДВЗ ($S_{\text{двз}} = S_1$)

$$W_{e1} = \frac{W_{\text{д.о.}}}{\eta_{\text{мп}}} + \frac{\Delta W_{\text{к}}}{\eta_{\text{мп}}} = \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^2}{\eta_{\text{мп}}} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi} \right) S_1. \quad (6)$$

При русі автомобіля з використанням комбінованого електромеханічного приводу ($S_{\text{двз}} = S_2$)

$$W_{e2} = \frac{W_{\text{д.о.}}}{\eta_{\text{мп}}} (1 - K_{\text{ед}}) + \frac{\Delta W_{\text{к}}}{\eta_{\text{мп}}} = \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^2}{\eta_{\text{мп}}} (1 - K_{\text{ед}}) \left(1 + \frac{K_1}{2\pi} \right) S_2. \quad (7)$$

Енергія, що витрачається електричним приводом

$$W_{ел.н2} = \frac{W_{д.о.}}{\eta_{ел.н}} K_{ед} = \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{ел.н}} K_{ед} \cdot S_2, \quad (8)$$

де $\eta_{ел.н}$ – коефіцієнт корисної дії електричного приводу.

При русі автомобіля з використанням лише електричного приводу ($S = S_3$)

$$W_{ел.н3} = \frac{W_{д.о.}}{\eta_{ел.н}} = \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{ел.н}} \cdot S_2. \quad (9)$$

На зарядку акумуляторів також витрачається енергія ДВЗ

$$\Delta W_e = \frac{W_{ел.н2} + W_{ел.н3}}{\eta_{зар}} = \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар}} \cdot (K_{ед} \cdot S_2 + S_3). \quad (10)$$

Сумарна витрата енергії двигуна

$$\begin{aligned} W_e = W_{e1} + W_{e2} + \Delta W = & \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{мп}} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi}\right) S_1 + \\ & + \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{мп}} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi}\right) (1 - K_{ед}) \times \\ & \times S_2 + \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар}} \cdot (K_{ед} \cdot S_2 + S_3) \end{aligned} \quad (11)$$

Після перетворень отримаємо

$$\begin{aligned} W_e = & \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{мп}} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi}\right) S \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\eta_{мп}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi}\right)} \right] \times \right. \\ & \left. \times \left(\frac{S_2}{S} K_{ед} + \frac{S_3}{S} \right) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

При використанні тільки механічного приводу рівняння (6) при ($S_1 = S$ й $W_{e1} = W_e$) прийме вигляд:

$$W_e^l = \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{mp}} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi} \right) S. \quad (13)$$

Економія енергії при використанні комбінованого електромеханічного приводу

$$E_w = W_e - W_e^l = \frac{m_a g \psi + \frac{C_x}{2} \rho F \bar{V}_a^{-2}}{\eta_{mp}} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi} \right) S \times$$

$$\times \left[1 - \frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi} \right)} \right] \cdot \left(\frac{S_2}{S} K_{e\partial} + \frac{S_3}{S} \right). \quad (14)$$

Відносна економія енергії

$$\delta_w = \frac{E_w}{W_e^l} = \left[1 - \frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi} \right)} \right] \cdot (\alpha_2 \cdot K_{e\partial} + \alpha_3), \quad (15)$$

де α_2 ; α_3 – відносні частини шляху, які пройдені автомобілем при використанні комбінованого електромеханічного й електричного приводів ведучих коліс, відповідно;

$$\alpha_2 = \frac{S_2}{S}; \quad (16)$$

$$\alpha_3 = \frac{S_3}{S}. \quad (17)$$

У рівнянні (15) виділимо функцію

$$F = \alpha_2 K_{e\partial} + \alpha_3, \quad (18)$$

максимальне значення якої може приймати значення, що дорівнює одиниці. У цьому випадку рівняння (15) прийме вигляд

$$\delta_{ew} = F \left[1 - \frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi} \right)} \right]. \quad (19)$$

Економія енергії, як видно із рівняння (19), можлива при виконанні умови

$$1 - \frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар} \left(1 + \frac{K_1}{2\pi}\right)} > 0. \quad (20)$$

Звідки визначимо:

$$K_1 > 2\pi \left(\frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар}} - 1 \right). \quad (21)$$

Після підстановки виразу (5) у нерівність (21) отримаємо

$$i_y < \frac{7,22}{\pi \left(\frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар}} - 1 \right) - 0,04}. \quad (22)$$

Нерівність (22) виражає умову отримання економії енергії (палива) автомобіля при русі у сталому режимі з використанням комбінованого електромеханічного приводу ведучих коліс.

Із рівняння (18) визначимо умову отримання $\delta_{ew} = (\delta_{ew})_{max}$, що забезпечується при $F = 1$.

$$K_{ed} = \frac{1 - \alpha_3}{\alpha_2}. \quad (23)$$

Після підстановки виразу (5) у рівняння (19)

$$\delta_{ew} = \left\{ 1 - \frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар} \left[1 + \frac{1}{\pi} \left(0,04 + \frac{7,22}{i_y} \right) \right]} \right\} F. \quad (24)$$

В таблиці наведено результати розрахунку показника δ_{ew} при: $F = 1$; $\eta_{mp} = 0,8$; $\eta_{зар} = 0,9$ й $\eta_{ел.н} = 0,9$.

Таблиця

Результати розрахунку $(\delta_{ew})_{max}$

i_y	1	2	3	4	6	8	10	12
$(\delta_{ew})_{max}$	0,70	0,54	0,44	0,38	0,29	0,24	0,20	0,18

Аналіз результатів розрахунку, які наведені у таблиці, показує, що для автомобілів з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс при русі у сталому режимі максимальна економія енергії палива (в залежності від числа циліндрів ДВЗ) може знаходитись у межах від 18% до 70%. Для легкових автомобілів, які мають

$i_y = 3 - 6$ вказана економія може складати 29% – 44%. Для вантажних автомобілів з числом циліндрів $i_y = 6 - 8$ відносна економія енергії (палива) складає 24% – 29%.

На рисунку наведено графіки залежності $(\delta_{ew})_{\max} = f\left(\frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар}}\right)$, що побудовані при різному значенні параметра i_y . В межах зміни величини $\left(\frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар}}\right) [0;1]$ величина $(\delta_{ew})_{\max}$ змінюється в межах $[1;0,2]$.

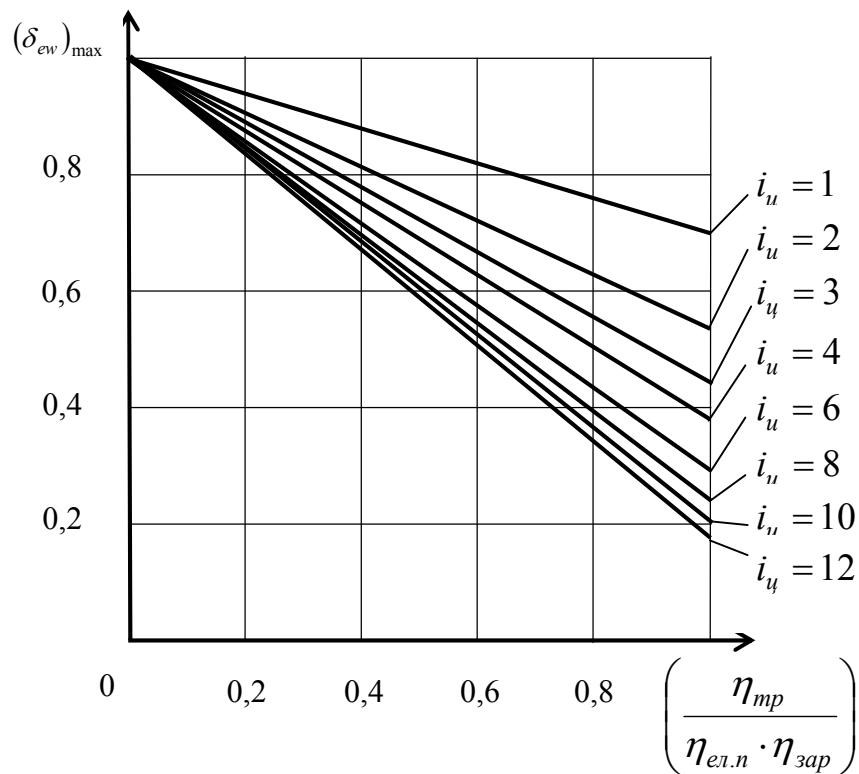


Рис. Залежність $(\delta_{ew})_{\max} = f\left(\frac{\eta_{mp}}{\eta_{ел.н} \cdot \eta_{зар}}\right)$

Висновки. 1. Запропоновано метод оцінки економії енергії гібридного автомобіля при сталому русі, який дозволяє проводити оцінювання економії енергії (палива) автомобілів з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс у сталому режимі руху.

2. Проведені розрахунки економії енергії автомобіля з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс з $\eta_{mp} = 0,8$; $\eta_{зар} = 0,9$ й $\eta_{ел.н} = 0,9$ дозволили визначити наступне:

– відносне зниження енергії, що витрачається на сталий рух автомобіля в залежності від числа циліндрів двигуна може знаходитись в межах від 18% до 70%

(менше значення – при числі циліндрів $i_{ц} = 12$, а більше – при $i_{ц} = 1$);

– для легкових автомобілів, які мають $i_{ц} = 3 – 6$ вказана економія може складати величину, яка знаходиться у межах 29% – 44%.

– для вантажних автомобілів з числом циліндрів $i_{ц} = 6 – 8$ відносна економія енергії (палива) складає 24% – 29%.

Література. 1. Harnesk, D. (2016). *A Review of Energy and Transport in Green Transition: Perspectives on Ecomodernity. Challenges In Sustainability*, 4(2) 15-16. doi: 10.12924/cis2016.04020015. 2. Directive 2009/33/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles // *Official Journal of the European Union (L120)*. – 15.05.2009. P. 5 – 13. 3. Нагайцев М.В. Современные мировые требования к энергетической эффективности автотранспортных средств и пути её обеспечения в России / М.В. Нагайцев // *Журнал автомобильных инженеров*. – М.: ООО «Издательский Дом ААИ Пресс». – 2014. – №4. – С. 32 – 37. 4. Козлов А.В. Современные требования к уровню энергетической эффективности автотранспортных средств / А.В. Козлов, А.С Теренченко // *Журнал автомобильных инженеров*. – М.: ООО «Издательский Дом ААИ Пресс». – 2014. – №1 (84). – С. 28 – 33. 5. Нагайцев М.В. Современные мировые требования к энергетической эффективности автотранспортных средств и пути её обеспечения в России Часть 2. Формирование и реализация требований в ЕС / М.В. Нагайцев // *Журнал автомобильных инженеров*. – М.: ООО «Издательский Дом ААИ Пресс». – 2014. – №5 (88). – С. 18 – 24. 6. BenDor, Todd K. 2012. «The System Dynamics of U.S. Automobile Fuel Economy». *Sustainability* 4, no. 5: 1013-1042. 7. Ramon Peres-Galvez, Jose R. Fuentes-Vega, Juan B. Cogollos-Martines, Antonio Toledo-Dorrego. *Evaluation de la eficiencia energetica de vehiculos pesados en ciclo: Ingenieria Mecanica*. 2010; 13(1): p. 49 – 58. 8. Эткин Д.М. О топливной экономичности массовых автомобилей в США, её регулирование и путях повышения (по материалам публикаций). Д.М. Эткин. *Журнал автомобильных инженеров*, 2009. Вып. №5(88). С. 10 – 15. 9. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика. О.В. Бажинів, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Двадненко. Харків: Вид-во ХНАДУ, 2011. 236 с. 10. Гібридні автомобілі. О.В. Бажинів, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатов, А.В. Колесніков. Харків: Вид-во ХНАДУ, 2008. 327 с. 11. Щетина В.А. *Электромобиль: техника и экономика*. В.А. Щетина, Ю.Я. Морговский, Б.И. Центер, В.А. Богомазов. Ленинград: Машиностроение, 1987. 236 с. 12. 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, 2015. Вип. №9 (1118). С. 98 – 107. 13. Кайдалов Р.О. Дослідження можливості зниження енергетичних втрат автомобіля при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс. Р.О. Кайдалов. *Системи обробки інформації*, 2016. Вип. № 9. С. 13 – 17.

Bibliography (transliterated): 1. Harnesk, D. (2016). *A Review of Energy and Transport in Green Transition: Perspectives on Ecomodernity. Challenges In Sustainability*, 4(2) 15-16. doi: 10.12924/cis2016.04020015. 2. Directive 2009/33/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles // *Official Journal of the European Union (L120)*. – 15.05.2009. P. 5 – 13. 3. Nagaytsev M.V. *Sovremennyye mirovyie trebovaniya k energeticheskoy effektivnosti avtotransportnyih sredstv i puti eYo*

obespecheniya v Rossii / M.V. Nagaytsev // Zhurnal avtomobilnyih inzhenerov. – M.: OOO «Izdatelskiy Dom AAI Press». – 2014. – #4. – S. 32 – 37. 4. Kozlov A.V. Sovremennyye trebovaniya k urovnyu energeticheskoy effektivnosti avtotransportnyih sredstv / A.V. Kozlov, A.S Terenchenko // Zhurnal avtomobilnyih inzhenerov. – M.: OOO «Izdatelskiy Dom AAI Press». – 2014. – #1 (84). – S. 28 – 33. 5. Nagaytsev M.V. Sovremennyye mirovyie trebovaniya k energeticheskoy effektivnosti avtotransportnyih sredstv i puti eYo obespecheniya v Rossii Chast 2. Formirovanie i realizatsiya trebovaniy v ES / M.V. Nagaytsev // Zhurnal avtomobilnyih inzhenerov. – M.: OOO «Izdatelskiy Dom AAI Press». – 2014. – #5 (88). – S. 18 – 24. 6. BenDor, Todd K. 2012. «The System Dynamics of U.S. Automobile Fuel Economy». Sustainability 4, no. 5: 1013-1042. 7. Ramon Peres-Galvez, Jose R. Fuentes-Vega, Juan B. Cogollo-Martines, Antonio Toledo-Dorrego. Evaluacion de la eficiencia energetica de vehiculos pesados en ciclo: Ingenieria Mecanica. 2010; 13(1): p. 49 – 58. 8. Etkin D.M. O toplivnoy ekonomichnosti massovyih avtomobiley v SShA, eYo regulirovanie i putyah povyisheniya (po materialam publikatsiy). D.M. Etkin. Zhurnal avtomobilnyih inzhenerov, 2009. Vyip. #5(88). S. 10 – 15. 9. Sinergetichniy avtomobil. Teoriya I praktika. O.V. Bazhinov, O.P. Smirnov, S.A. SErIkov, V.Ya. Dvadnenko. HarkIv: Vid-vo HNADU, 2011. 236 s. 10. GIbridnI avtomobIII. O.V. Bazhinov, O.P. Smirnov, S.A. SErIkov, A.V. Gnatov, A.V. KolesnIkov. HarkIv: Vid-vo HNADU, 2008. 327 s. 11. Schetina V.A. Elektromobil: tehnika i ekonomika. V.A. Schetina, Yu.Ya. Morgovskiy, B.I. Tsenter, V.A. Bogomazov. Leningrad: Mashinostroenie, 1987. 236 s. 12. Podrigalo M.A. Otsenka dopolnitelnyih energeticheskikh poter pri ustanovivshemsya rezhime dvizheniya transportno-tyagovyih mashin. M.A. Podrigalo, N.P. ArtYomov, D.V. Abramov, M.L. Shulyak. VIIsnik natsIonalnogo tehnlchnogo unIversitetu «HPI». ZbIrnik naukovih prats, 2015. Vip. #9 (1118). S. 98 – 107. 13. Kaydalov R.O. DosIldzhennya mozhlivostI znizhennya energetichnih vtrat avtomobIIya pri vikoristanniI glbridnogo elektromehanIchnogo privodu veduchih kolls. R.O. Kaydalov. Sistemi obrobki InformatsIYi, 2016. Vip. #9. S. 13 – 17.

Кайдалов Р.О., Подригало М.А.

ОЦІНКА ЕКОНОМІЇ ЕНЕРГІЇ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ ПРИ СТАЛОМУ РУСІ

В статті запропонований метод оцінювання економії енергії автомобілів при сталому русі у разі використання комбінованого електромеханічного приводу ведучих коліс.

Кайдалов Р.О., Подригало М.А.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДВИЖЕНИИ

В статье предложен метод оценки экономии энергии автомобилей при постоянном движении с использованием комбинированного электромеханического привода ведущих колес.

R. Kaydalov, M. Podrygalo

ESTIMATION OF ENERGY SAVINGS HYBRID VEHICLE WITH CONSTANT MOTION

In the article the method of estimation of energy saving of cars at constant motion is offered in case of use of combined electromechanical drive of driving wheels.