

УДК 629.3.017

В.М.Дембіцький, О.П.Сітовський, Ю.В.Булік, М.А.Демидюк
ДП "Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства"
Луцький національний технічний університет
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З
РЕКУПЕРАЦІЄЮ ЕНЕРГІЇ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ, ОБЛАДНАНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Проведено математичне моделювання процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу, обладнаного електроприводом. Здійснено теоретичне дослідження процесу та співставлено результати теоретичного та практичного досліджень.

Ключові слова: електродинамічне гальмування, рекуперація енергії, робота, швидкість, сповільнення.

Рис 4. Табл 1. Форм 17.

В.Н.Дембицкий, О.Ф.Ситовский, Ю.В.Булик, Н.А.Демидюк
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО
ТОРМОЖЕНИЯ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА,
ОБОРУДОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Проведено математическое моделирование процесса электродинамического торможения с рекуперацией энергии транспортного средства, оборудованного электроприводом. Осуществлено теоретическое исследование процесса и сопоставлены результаты теоретического и практического исследований.

Ключевые слова: электродинамическое торможение, рекуперация энергии, работа, скорость, замедление.

V.Dembitskyj, O.Sitovskij, Y.Bulik, M.Demidyuk
MATHEMATICAL MODEL OF BRAKING WITH ENERGY RECUPERATION OF VEHICLES
EQUIPPED AN ELECTRIC DRIVE

Made mathematical modeling process electrodynamic braking with energy recuperation vehicle equipped an electric drive. Performed theoretical research process and compares the results of theoretical and practical research.

Key words: electrodynamic braking, energy recuperation, work, speed, deceleration.

Вступ. В умовах сьогодення автомобілебудівна галузь переживає досить великі зміни. Одним з напрямків, який спрямований на покращення паливної економічності автомобілів та екологічної ситуації в світі є створення конструкції автомобілів на альтернативних видах палива. В цей сектор входять також транспортні засоби, обладнані електричним приводом: електромобілі т гібридні автомобілі. Вже неодноразово доведено їх переваги, в плані економічності та екологічності, перед автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння [1, 2]. Крім того у більшості країн світу, з метою заохочення населення до придбання та експлуатації транспортних засобів з електроприводом, на законодавчому рівні встановлено певні пріоритети: скасовуються мита, безкоштовне паркування, безкоштовний прокат і т.п. [3, 4]. Тому сьогодні все частіше можна зустріти такі автомобілі на дорогах, в тому числі українських.

Аналіз досліджень. Більшість існуючих конструкцій транспортних засобів, обладнаних електричним приводом, обладнуються системами рекуперації енергії. Система рекуперації енергії перетворює кінетичну енергію, яка виділяється в процесі електродинамічного гальмування, у електричну та дозволяє її накопичувати для подальшого використання. Системи рекуперації енергії у транспорті вже давно досить активно застосовуються на залізничному транспорті, тролейбусах, трамвайних вагонах [5]. На сьогодні ці системи активно досліджуються та вдосконалюються [6, 7]. Однак її застосування у автомобілях пов'язане з певними проблемами, основна з яких – відсутність контактної мережі, куди можна практично постійно віддавати електричний струм, потребує встановлення накопичувачів енергії, які можуть досить швидко спожити увесь рекуперований струм. Цими проблемами активно займаються провідні як світові [8, 9] так і українські [10, 11] науковці. Однак необхідно пам'ятати, що система рекуперації енергії напряму пов'язана з гальмівною системою транспортного засобу, хоча і не має фізичного зв'язку. Процес рекуперації енергії починається у момент коли водій задіює відповідний орган керування, тоді здійснюється сповільнення руху автомобіля, електродвигун переходить з тягового режиму в режим генератора та починає рекуперувати електроенергію. Цей процес називається

©В.М. Дембіцький, О.П. Сітовський, Ю.В. Булік, М.А. Демидюк

електродинамічним гальмуванням або гальмуванням з рекуперацією енергії [12]. Тому властивості системи рекуперації енергії повинні розглядатися лише в комплексі з гальмівними властивостями транспортного засобу.

Метою дослідження є створення математичної моделі процесу електродинамічного гальмування транспортного засобу, обладнаного електроприводом та системою рекуперації енергії.

Для досягнення поставленої мети варто скористатися залежностями, які описують процес гальмування транспортного засобу через виконання певної роботи.

Під час електродинамічного гальмування системами автомобіля виконується:

- робота, яка здійснюється під час електродинамічного гальмування транспортного засобу, A_{ϕ} ;
- робота, яка здійснюється накопичувачами енергії при поглинанні рекуперованої енергії, $A_{н}$;
- вивільнення кінетичної енергії автомобіля, під час електродинамічного гальмування, $A_{к}$;

$$\begin{aligned} A_{\tau} &= P_j S; \\ A_{н} &= U I t; \\ A_{к} &= \frac{m_a v^2}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

де P_j – сила інерції автомобіля, Н;
 v – швидкість транспортного засобу, м/с;
 m_a – маса автомобіля, кг;
 S – пройдений шлях, м;
 U – напруга накопичувачів, В;
 I – сила струму, А;
 t – час, с
 Сила інерції автомобіля визначається:

$$P_j = m_a j \quad (2)$$

де $j = \frac{dv}{dt}$ – сповільнення автомобіля, м/с².

Сповільнення автомобіля визначається:

$$j = \frac{D_{\tau e} + \psi}{\delta_{об}} g \quad (3)$$

де $D_{\tau e}$ – гальмівний динамічний фактор автомобіля для випадку електрогальмування;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 $\delta_{об}$ – коефіцієнт врахування обертових мас автомобіля;
 ψ – сумарний опір дороги.

$$D_{\tau e} = \frac{P_{\tau e} + P_w}{G_a} \quad (4)$$

де P_w – сила опору повітря;

$P_{\tau e}$ – гальмівна сила електричного складника автомобіля;

Гальмівна сила автомобіля, під час здійснення електродинамічного гальмування становитиме:

$$P_{\tau e} = \frac{M_{ke} u_{\text{тре}}}{r_k \eta_{\text{тр}}} = \frac{30 U I u_{\text{тре}}}{r_k \eta_{\text{тр}} \pi n} \quad (5)$$

де M_{ke} – крутний момент електродвигуна;

$u_{\text{тре}}$ – передатне число трансмісії для електроприводу;

r_k – радіус кочення колеса, м;

n – оберти електродвигуна, хв^{-1} ;

$\eta_{\text{тр}}$ – коефіцієнт корисної дії трансмісії.

Коефіцієнт корисної дії трансмісії $\eta_{\text{тр}}$, у випадку транспортних засобів обладнаних електроприводом, враховуючи, що досліджуються система електродинамічного гальмування, матиме два складники: електричний $\eta_{\text{тре}}$ та механічний $\eta_{\text{трм}}$, та визначатиметься за залежністю:

$$\eta_{\text{тр}} = \eta_{\text{тре}} \cdot \eta_{\text{трм}}$$

Крутний момент електродвигуна визначається залежністю (6)

$$M_{ke} = \frac{30 \cdot N_{ed}}{\pi \cdot n} = \frac{30 U I}{\pi n}; \quad (6)$$

де, N_{ed} – потужність електродвигуна, яка визначається залежністю (7) та залежить від напруги U та сили струму I :

$$N_{ed} = U \cdot I; \quad (7)$$

З іншої сторони сила струму залежить від характеристик двигуна. В нашому випадку (для генератора Г-290):

$$I = 0,00003n^2 + 0.3n - 382 \quad (8)$$

або, для загального випадку

$$I = an^2 + vn + c \quad (9)$$

де, a , v , c – коефіцієнти, які визначають характеристику електродвигуна в режимі генератора.

Оберти електродвигуна можна виразити через швидкість руху автомобіля

$$n = \frac{30 \cdot v \cdot u_{\text{тре}}}{\pi \cdot r_k} \quad (10)$$

Підставивши у (5) залежності (9) та (10) отримаємо

$$\begin{aligned}
 P_{\tau e} &= \frac{30Uu_{\text{тре}}}{r_k \eta_{\text{тр}} \pi n} = \frac{30Uu_{\text{тре}}(an^2 + vn + c)}{r_k \eta_{\text{тр}} \pi n} = \frac{30Uu_{\text{тре}} \left(a \left(\frac{30vu_{\text{тре}}}{r_k \pi} \right)^2 + v \frac{30vu_{\text{тре}}}{r_k \pi} + c \right)}{r_k \eta_{\text{тр}} \pi \frac{30vu_{\text{тре}}}{r_k \pi}} = \\
 &= \frac{30Uu_{\text{тре}} \left(a \left(\frac{30vu_{\text{тре}}}{r_k \pi} \right)^2 + v \frac{30vu_{\text{тре}}}{r_k \pi} + c \right)}{r_k \eta_{\text{тр}} \pi \frac{30vu_{\text{тре}}}{r_k \pi}} = \frac{U \left(900au_{\text{тре}}^2 v^2 + 30b\pi u_{\text{тре}} r_k v + c\pi^2 r_k^2 \right)}{\pi^2 r_k^2 \eta_{\text{тр}} v}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Оскільки,

$$j = \frac{g \cdot P_{\tau e}}{G_a} \tag{12}$$

Однак в даному випадку необхідно зауважити, що рівняння (12) матиме сенс після прийняття умов, які дещо спростять та полегшать вирішення поставленої задачі на даному етапі:

- транспортний засіб рухається по горизонтальній ділянці дороги;
- розглядається лише міський режим руху транспортного засобу, дорожнє покриття перебуває у нормальному стані, тому приймається $\mu = 0$;
- коефіцієнт врахування обертових мас приймається рівним $\mu_{\text{об}} = 1$.

То підставивши (11) у (12) а потім у (2), отримуємо

$$P_j = \frac{U \left(900au_{\text{тре}}^2 v^2 + 30b\pi u_{\text{тре}} r_k v + c\pi^2 r_k^2 \right)}{\pi^2 r_k^2 \eta_{\text{тр}} v} \tag{13}$$

Враховуючи залежності (13) та (1), робота, яка здійснюється силами гальмування буде рівна:

$$A_{\tau} = \frac{U \left(900au_{\text{тре}}^2 v^2 + 30b\pi u_{\text{тре}} r_k v + c\pi^2 r_k^2 \right)}{\pi^2 r_k^2 \eta_{\text{тр}} v} \cdot S \tag{14}$$

З іншої сторони, пройдений шлях транспортного засобу визначається як

$$S = \int_{t_n}^{t_k} v dt \tag{15}$$

де, t_n – час початку електродинамічного гальмування, с;

t_k – час закінчення гальмування, с.

Враховуючи (15), рівняння (1) можна представити наступному вигляді:

$$A_{\tau} = P_j \int_{t_n}^{t_k} v dt \tag{16}$$

Таблиця 1.

Результати розрахунку ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії транспортного засобу.

| Найменування параметру | Позначення | Одиниці вимірювання | Фактичні дані |
|--|--------------|---------------------|---------------|
| Вхідні дані | | | |
| Маса автомобіля | m_a | кг | 550 |
| Робоча напруга | U | В | 48 |
| Максимальна швидкість руху перед електрогальмуванням | v | км/год | 70 |
| ККД трансмісії | $\eta_{трм}$ | - | 0,9 |
| ККД електродвигуна | $\eta_{тре}$ | - | 0,8 |
| ККД загальний | $\eta_{пр}$ | - | 0,72 |
| Потужність електродвигуна | N_e | Вт | 4800 |
| Радіус кочення колеса | r_k | м | 0,3 |
| Передатне число трансмісії | $u_{тре}$ | - | 5,5 |

Підставивши (14) у (16) та про інтегрувавши вираз по часу, отримано залежність, яка характеризує роботу транспортного засобу, виконану під час електродинамічного гальмування:

$$\begin{aligned}
 A_r &= \frac{U \left(900 a u_{тре}^2 v^2 + 30 b \pi u_{тре} r_k v + c \pi^2 r_k^2 \right)}{\pi^2 r_k^2 \eta_{тр} v} \int_{t_n}^{t_k} v dt = \\
 &= \frac{U \left(900 a u_{тре}^2 v^2 + 30 b \pi u_{тре} r_k v + c \pi^2 r_k^2 \right)}{\pi^2 r_k^2 \eta_{тр}} \int_{t_n}^{t_k} dt = \\
 &= \frac{U \left(900 a u_{тре}^2 v^2 + 30 b \pi u_{тре} r_k v + c \pi^2 r_k^2 \right)}{\pi^2 r_k^2 \eta_{тр}} (t_k - t_n)
 \end{aligned} \tag{17}$$

Вищеописана математична модель дозволяє провести ряд досліджень, пов'язаних з процесами електродинамічного гальмування транспортного засобу.

Для макету легкового автомобіля з гібридною силовою установкою, характеристики якого зазначені у таблиці 1, процес електродинамічного гальмування можна описати графіками, наведеними на рисунках 1, 2 та 3.

Описана математична модель процесу електродинамічного гальмування дає можливість проводити дослідження ряду конструктивних та експлуатаційних властивостей та характеристик транспортних засобів:

- підбір оптимального передатного числа;
- вибір характеристик електроприводу;
- вибір електродвигуна;
- підбір накопичувачів енергії, для досягнення оптимального співвідношення між їх вартістю та техніко-економічними показниками транспортного засобу.

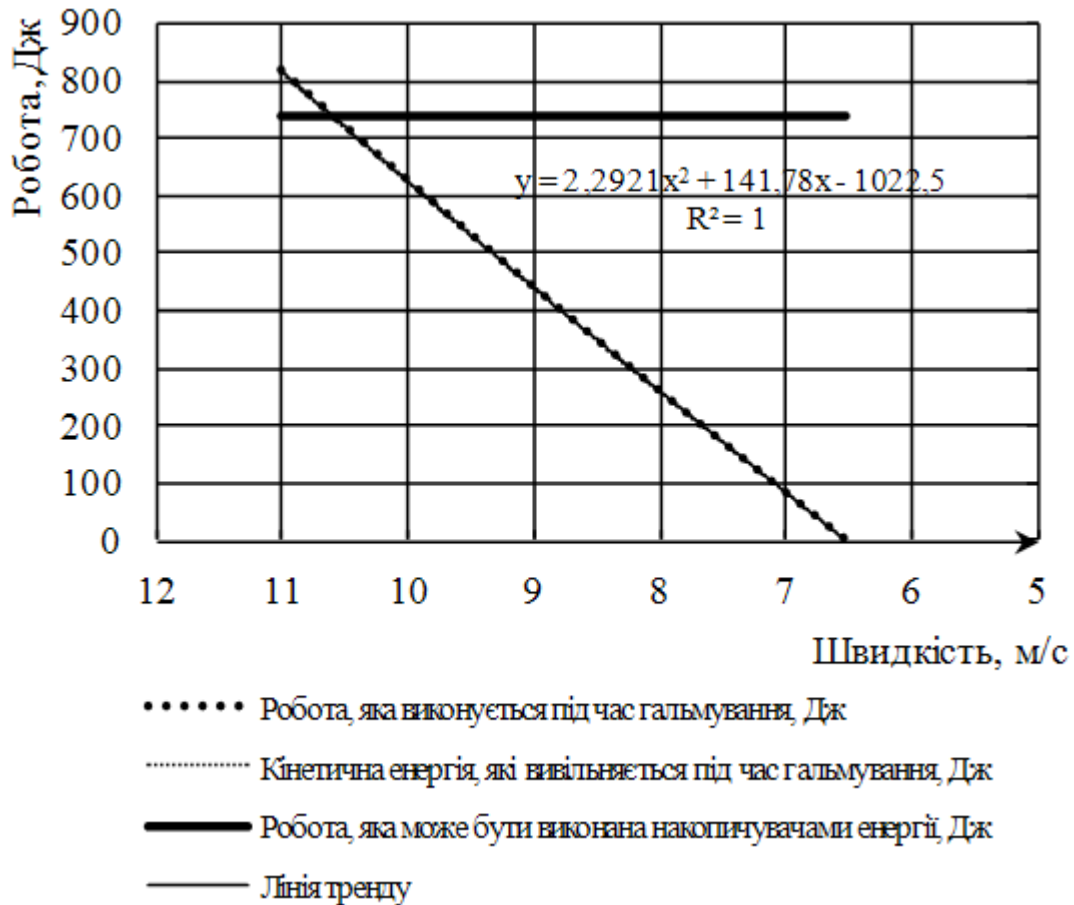


Рис. 1. Робота, яка виконується під час здійснення електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу з електричним приводом

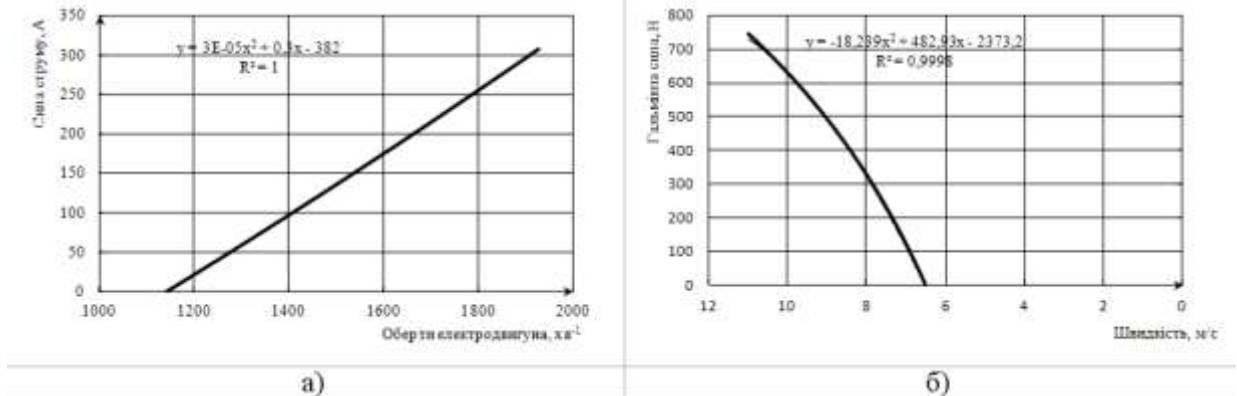


Рис. 2. Залежності, які характеризують процес, електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії, автомобіля, обладнаного електроприводом:

- а) зміна сили струму електродвигуна (генератора) залежно від його обертів;
- б) характер зміни гальмівної сили залежно від зміни швидкості;

Крім того дана математична модель може бути застосована, як основа, для системи управління тяговими електричними двигунами автомобілів.

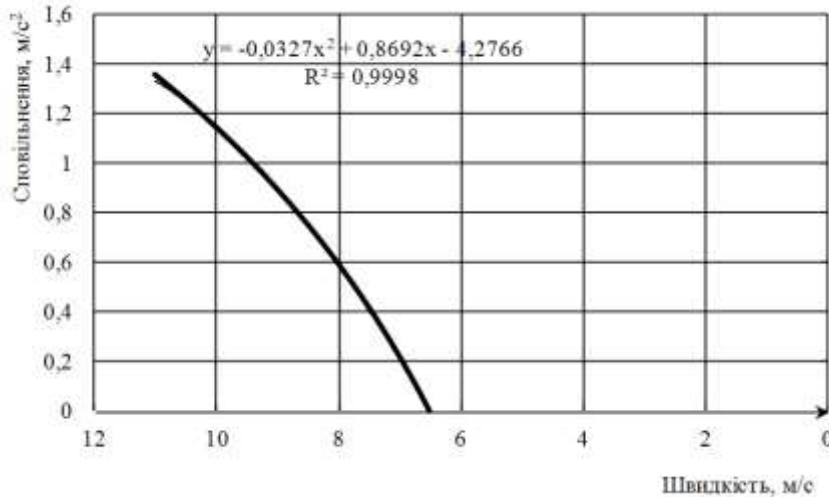


Рис. 3. Характер зміни сповільнення зі зменшенням швидкості транспортного засобу, які характеризують процес, електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії, автомобіля, обладнаного електроприводом.

За створеною математичною моделлю було також проведено моделювання процесу електродинамічного гальмування тролейбуса "Богдан" Т 60110. На рисунку 3 наведено залежність зміни сповільнення від швидкості тролейбуса за результатами теоретичного розрахунку та результатами фактичних випробувань.

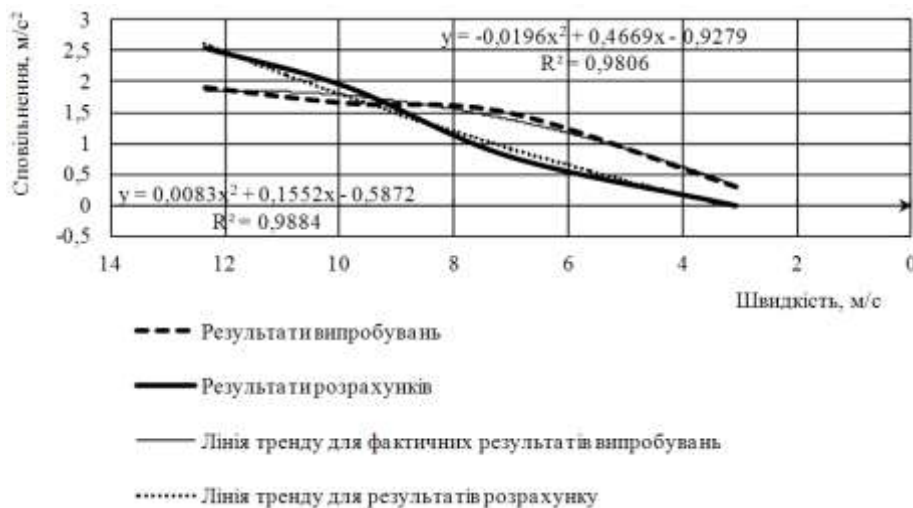


Рис. 4. Результати розрахунків та випробувань системи електродинамічного гальмування тролейбуса "Богдан" Т 60110.

З рисунка 4 видно, що теоретичні та фактичні результати випробувань збіжні, однак необхідно врахувати те, що випробування тролейбуса проводилися з метою визначення ефективності системи електродинамічного гальмування та не мали на меті доведення адекватності описаної математичної моделі, а також те, що зазначена модель не враховує коректування процесу, які здійснюються системою управління тяговим двигуном. Разом з тим проведене дослідження дає можливість стверджувати, що після розробки відповідної методики випробувань та власне проведення випробувань їх результати перебуватимуть у межах допустимих відхилень.

Висновки за результатами проведеного дослідження:

- створено математичну модель процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу, обладнаного електродвигуном;
- проведено теоретичні дослідження цього процесу для макету легкового автомобіля з гібридною силовою установкою;

©В.М. Дембіцький, О.П. Сітовський, Ю.В. Булік, М.А. Демидюк

- проведено порівняння теоретичних розрахунків та результатів випробувань дає можливість проводити подальші роботи по створенню методики випробувань (експерименту) та подальшого підтвердження адекватності математичної моделі.

Отримані результати можуть бути застосовані з метою подальших досліджень процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортних засобів, обладнаних електроприводом, визначення їх конструктивних та експлуатаційних характеристик.

1. Крячко А. Электромобиль – будущее или уже настоящее [Электронный ресурс] / А. Крячко. – 2013. – Режим доступа: <http://eco-boom.com/elektromobil-budushhee-ili-uzhe-nastoyashhee/>.
2. Розрахунок еквівалентної витрати палива електромобілями у різних країнах / О. П. Смирнов, О. Б. Богаєвський, А. О. Смирнова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 29 (1002). – С. 114–119.
3. Мерия Парижа сделала бесплатным прокат электромобилей [Электронный ресурс] / 2014. – Режим доступа: <http://novosti-n.org/ukraine/read/62234.html>.
4. До 2025 року США планують збільшити кількість електромобілів до 3,3 млн. / 2013. - Режим доступу: <http://ua-energy.org/post/38179>.
5. Ефремов И.С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчёт) издание третье, исправленное и дополненное. – Москва: Высшая школа, 1989. – 488 с.
6. Ноженко О. С. Підвищення енергетичної ефективності тепловоза активацією робочих середовищ: автореф. дис. на здобуття наукового ст. канд. техн. наук : спец. 05.22.07 “”Рухомий склад залізниць та тяга поїздів / О. С. Ноженко; Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. — Луганськ, 2010. — 19 с.
7. Устименко Д.В. Підвищення ефективності тяги поїздів шляхом удосконалення системи рекуперативного гальмування: автореф. дис. на здобуття наукового ст. канд. техн. наук : спец. 05.22.07 “”Рухомий склад залізниць та тяга поїздів / Д.В. Устименко; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. В.Лазаряна. — Д., 2006. — 25 с.
8. Guido Wager. Efficiency and performance testing of electric vehicles and the potential energy recovery of their electrical regenerative braking systems: PEC624 M.Sc. Renewable Energy Dissertation / Wager Guido. – Murdoch University, 2012. – 59 p.
9. Muhammad H. Rashid / Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory and design. Second edition/ Muhammad H. Rashid // University of West Florida, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2010. – 558 p.
10. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. Гібридні автомобілі. – Харків: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
11. Серіков С.А. Управление вектором тока тягового вен тильного электродвигателя силовой установки гибридноавтомобиля: Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2009. –Выпуск 25. – С. 127-133.
12. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей в отношении торможения: Правила ЕЭК ООН №13-Н. - [Введены в действие 04.10.2011]. – Женева.: Европейская Экономическая комиссия Организации Объединенных наций, 2011. – 118 с.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2014