

УДК 629.3.017.5

**В.М. ДЕМБІЦЬКИЙ**, зав. лабораторією ДП «НДКТІ МГ», Київ;

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ  
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ГІБРИДНОГО  
АВТОМОБІЛЯ**

Проведено огляд попередніх досліджень систем рекуперативного гальмування. Відмічено особливості робіт науковців, які проводили дослідження систем електродинамічного гальмування. Проведено експериментальні дослідження процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії гібридного автомобіля особливо малого класу. Запропоновано математичну модель, яка описує процес гальмування. Здійснено розрахунок коефіцієнтів регресії та перевірено адекватність математичної моделі. Встановлено, що застосування регульованого електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії дозволить здійснювати його з максимальною ефективністю та акумулюванням електричної енергії.

**Ключові слова:** математична модель, експеримент, рекуперація, гальмування, транспортний засіб.

**Вступ.** Останнім часом в Україні спостерігається значне поживлення у сфері електричних транспортних засобів. У м. Київ відбулася презентація електричних автомобілів, які планується залучити до пілотного проекту під назвою “Електротаксі”. Цей проект спрямований продемонструвати переваги застосування екологічно чистого транспорту, а також покликаний звернути увагу органів влади на невиправдано високі податки та відсутність преференцій для транспортних засобів з електричним приводом [1]. Значна робота у вивченні та дослідженні гібридних і електричних транспортних засобів проводиться українськими науковцями Харкова, Києва, Львова, Луцька. Досить активно долучилися до розвитку транспортних засобів з електричним приводом і вітчизняні автомобілевиробники: ПАТ “Богдан Моторс”, СП “Електронтранс”.

Дана робота є продовженням серії досліджень [2 - 4] пов’язаних з системою електродинамічного гальмування гібридного автомобіля обладнаного системою рекуперації енергії.

**Аналіз попередніх досліджень.** Досить фундаментальні дослідження гібридних та електричних автомобілів проведені науковцями університету Західної Флориди [5]. У цій роботі автори досить детально розглядають систему електродинамічного гальмування як окремо так і в комплексі з механічним складником. Застосування системи електродинамічного гальмування розглядається у різних міських їздових циклах. Основним критерієм ефективності системи електродинамічного гальмування є значення середнього сповільнення.

Необхідно також відмітити роботу російських вчених [6]. Науковцями проведена робота щодо розробки, створення та дослідження характеристик електромобіля на базі шасі “ГАЗель”. В цій роботі проведено компонування транспортного засобу, проведено тяговий розрахунок та визначено затрати енергії. Визначення затрат енергії проведено з врахуванням роботи системи рекуперації енергії. Однак під час експерименту визначено лише загальну витрату енергії транспортним засобом, а кількість рекуперованої енергії не зазначено. Кількість рекуперованої енергії є досить важливим показником з точки зору конструкції та експлуатації автомобіля. Адже цей показник необхідний при розрахунку ємності накопичувачів енергії, розрахунку стану (ступеня зарядки) накопичувачів енергії під час експлуатації транспортного засобу, оцінювання адекватності математичних моделей процесу електродинамічного гальмування

© В.М. Дембіцький, 2015

автомобіля з рекуперацією енергії перед їх впровадженням у систему управління електротягою транспортних засобів.

Варто зазначити, що на сьогодні питання рекуперації енергії розглядається в досить широких аспектах. Так, наприклад, науковцями НАМІ розглядається розрахунок балансу потужності комбінованої енергоустановки гібридного автомобіля [7]. Однак в даній роботі система рекуперації енергії розглядається лише з точки зору акумуляції рекуперованої енергії, а вплив рекуперації енергії на гальмівні характеристики автомобіля не вивчається.

Отже, системи рекуперації енергії з точки зору гальмівних систем транспортного засобу потребують ще чимало зусиль для їх вивчення та дослідження.

**Мета роботи** полягає у експериментальному дослідженні системи рекуперації енергії спрямованому на визначення оптимальних гальмівних та паливо-економічних властивостей транспортного засобу. Оптимальні показники паливної економічності повинні бути забезпечені акумулюванням максимально можливої кількості електричної енергії під час здійснення електродинамічного гальмування.

**Планування експерименту** здійснюється з метою побудови та аналізу математичної моделі процесу електродинамічного гальмування, з тим, щоб з максимальною повнотою врахувати вхідні та вихідні характеристики процесу [8, 9]. При цьому доцільно використати представлення у вигляді “чорного ящика”. На даному етапі досліджень достатнім буде проведення двох факторного експерименту. Вхідними величинами вибрано початкову швидкість гальмування транспортного засобу та значення струму обмотки збудження. Ці параметри мають ключове значення при роботі системи електродинамічного гальмування та є одними з найбільш важливих. Функцією відклику приймається значення сповільнення, оскільки цей показник повинен бути прогнозований для забезпечення роботи системи управління електродинамічним гальмуванням. Таким чином завдання полягає у отриманні залежності:

$$j = f(v, I), \quad (1)$$

Вхідні параметри є незалежними один від одного, сумісними, тобто усі комбінації факторів є здійсненними, ними можна керувати, вони діють на об’єкт дослідження, не є корельованими.

Для кодування натуральних величин  $X_i$  факторів варто скористатися наступною залежністю [9]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_{i0}}, \quad (2)$$

де  $x_i$  - кодоване значення фактору;

$X_{i0}$  - натуральне значення основного (нульового) рівня;

$\Delta X_{i0}$  - натуральне значення інтервалу варіювання.

$$X_{i0} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2},$$

$$\Delta X_{i0} = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}, \quad (3)$$

У табл. 1 наведено фактори та їх інтервали варіювання.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

Фактори			Основний рівень ( $X_{i0}$ )	Інтервал варіювання ( $\Delta X_{i0}$ )	Верхній рівень ( $x_i=+I$ )	Нижній рівень ( $x_i=-I$ )	Зіркова точка $+\alpha$ ( $x_i=+I$ )	Зіркова точка $-\alpha$ ( $x_i=-I$ )
Початкова швидкість гальмування	$v$	м/с	35	25	+1	-1	60	10
Струм обмотки збудження	$I$	А,	2,75	2,75	+1	-1	5	0,5

На основі попередніх досліджень вважається, що залежності  $j = f(v, I)$  є не лінійними, тому застосовується нелінійна модель другого порядку.

Модель другого порядку, в загальному випадку, має вигляд [8, 9, 10]:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} x_i^2, \quad (4)$$

де  $\eta$  - істинна величина функції відгуку;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$  - істинні значення коефіцієнтів;

$k$  - кількість факторів.

У даному випадку, згідно залежностей (1, 4), наведених вище, математична модель матиме наступний вигляд:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_v + \beta_2 x_I + \beta_3 x_v x_I + \beta_4 x_v^2 + \beta_5 x_I^2, \quad (5)$$

де  $I$  - індекс відповідає значенню струму збудження;

$v$  - індекс відповідає значенню початкової швидкості гальмування.

**Експериментальні дослідження** спрямовані на визначення параметрів ефективності процесу електродинамічного гальмування. Експеримент проводився на автомобілі, основні характеристики, якого наведені у табл. 2.

Таблиця 2 - Технічні характеристики транспортного засобу ГСУ-1.

Параметр транспортного засобу	Значення параметру
Споряджена маса, кг	385
Тиск повітря в шинах коліс, передніх/задніх, МПа	1,8 / 1,8
Висота рисунка протектора шин, мм	4,7
Повна маса автомобіля, кг	560

Метеорологічні умови, під час яких проводилися випробування відповідали вимогам наведеним у Правилах ЄЕК ООН № 13.

За результатами аналізу результатів теоретичних досліджень встановлено, що доцільним критеріями оцінки роботи та ефективності процесу електродинамічного гальмування є сповільнення, яке розвиває транспортний засіб під час здійснення гальмування.

Проведення експерименту здійснювалося із застосуванням випробувального устаткування, зазначеного в таблиці 3.

Таблиця 3 – Засоби вимірювальної техніки, які застосовувалися під час проведення експерименту

Назва устаткування	Призначення	Діапазон та похибка вимірювання
Програмно-апаратний комплекс на базі Autoscope II (далі USB - осцилограф) та ПК типу Notebook	Реєстрація миттєвих значення вимірюваних параметрів	Діапазон вимірювань: напруга 0...1000 В; час 0...3600 с. Похибки реєстрації: - напруги $\delta = \pm 0,4\%$ ; - часу $\delta = \pm 0,2\%$ .
Перетворювач вимірювальний напруги (датчик ПИИТ-2)	Вимірювання напруги	Постійного струму в діапазоні 100... 1000 В до 75 мВ. Змінного струму в діапазоні 100... 400 В до 75 мВ. $\delta = \pm 1\%$
Шунти 500 А/ 75 мВ,	Вимірювання струму	0 ... 500 А Клас точності 0,5
Прилад VBOX Recelagic	Вимірювання швидкості, прискорення/сповільнення, шляху	Шлях: $\delta = \pm 0,05\%$ ; Швидкість: 0,1...160 км/год, $\Delta = \pm 0,01$ км/год; Час: $\Delta = \pm 0,01$ с Сповільнення/прискорення: 0... $\pm 20g$ $\delta = \pm 0,5\%$

Під час теоретичних досліджень було встановлено, що регульоване електродинамічне гальмування зможе забезпечити більш якісні та кількісні показники. Тому було проведено експерименти для автомобіля із застосуванням різних методів регулювання.

За отриманими результатами експериментів побудовано залежності (рис. 1), які характеризують характер зміни значення сповільнення транспортного засобу, залежно від значення початкової швидкості гальмування та значення струму обмотки збудження.

З наведених залежностей видно, що застосування ШІМ-регулювання під час електродинамічного гальмування підвищує ефективність гальмівної системи і, водночас, забезпечує максимальне накопичення енергії, тому в подальшому розглядатиметься процес електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії із застосуванням широтно-імпульсного регулювання.

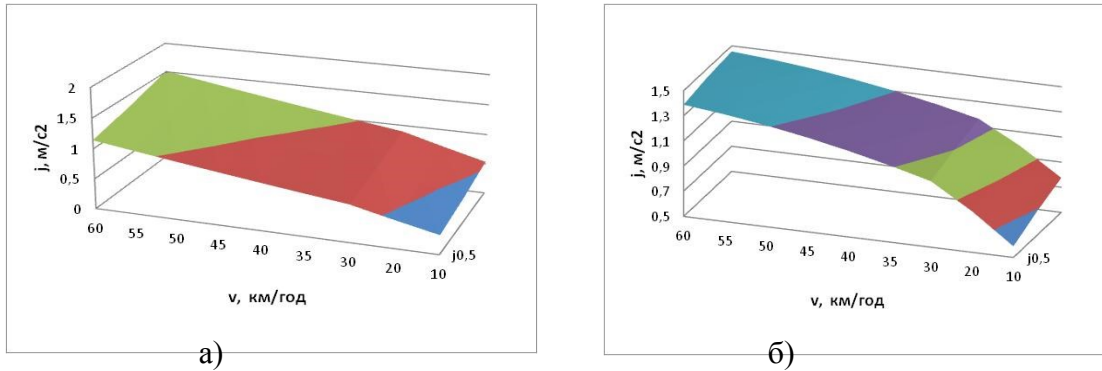


Рисунок 1 – Процес електродинамічного гальмування транспортного засобу: а) із застосуванням реостатного регулювання; б) із застосуванням ШІМ-регулювання

За методикою, викладеною у [9] проведено розрахунок коефіцієнтів математичної моделі (таблиця 4) та перевірено її адекватність.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів математичної моделі.

Коефіцієнт	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
Значення	141,26	80,89	13,82	5,3468	15,193	1,1202
Важливість	Значущий	Значущий	Значущий	Значущий	Значущий	Незначущий

Враховуючи розраховані коефіцієнти, рівняння регресії матиме вигляд:

$$y = 141,26 + 80,89x_v + 13,82x_l + 5,35x_v x_l + 15,193x_v^2 \quad (6)$$

Розрахункове значення критерія Фішера  $F_p = 3,35$  є меншим табличного при 1 % рівні значимості  $F_{T(0,01; 3; 18)} = 4,9$ . Гіпотеза щодо адекватності математичної моделі підтверджується.

Наведена математична модель повинна бути перевірена теоретичними розрахунками з метою співставлення результатів.

**Висновки.** В результаті експериментальних досліджень:

- проведено планування експерименту та дослідження роботи системи рекуперації енергії, запропоновано математичну модель та підтверджено її адекватність;
- встановлено, що застосування регульованого гальмування дозволить здійснювати його з максимальною ефективністю та акумулюванням електричної енергії;

За попередніми дослідженнями застосування регульованого процесу електродинамічного гальмування дозволить здійснювати ефективне гальмування на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення без блокування коліс, однак для цього необхідно провести додаткові дослідження.

**Список літератури:** 1. В Києве презентували експериментальное електротакси [Електронный ресурс] / 2014. – Режим доступа: <http://toneto.net/news/kultura/v-kieve-prezentovali-eksperimentalnoe-elektrotaksi> (Дата обращения 28.01.2015). 2. Дембіцький В.М. Методика визначення енергетичних характеристик процесу електродинамічного гальмування під час дорожніх випробувань транспортних засобів, обладнаних електроприводом та системою рекуперації енергії / В.М. Дембіцький // Вісник НТУ. — К.: НТУ, 2014. — Вип. 30. 3. Дембіцький В.М. Математична модель процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу,

обладнаного електроприводом / *В.М. Дембіцький, О.П. Сітовський та ін.* // Наукові нотатки. Вип. 45. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. С. 159 – 167. **4.** *Сітовський О.П.* Математичне моделювання процесу електричного гальмування макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою / *О.П. Сітовський, В.М. Дембіцький* // Вісник СевНТУ. Вип. 135. – Севастополь: СевНТУ, 2012. С. 73 – 75. **5.** *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. **6.** *Блохин А.Н.* Результаты исследования электромобиля на шасси “ГАЗель” / *А.Н. Блохин, А.М. Грошев, Т.А. Козлова* и др. // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана: Наука и образование. – 2012. – № 12. – С. 75-106. **7.** *Ломакин В.В.* К расчёту баланса мощности комбинированной энергоустановки гибридного автомобиля / *В.В. Ломакин, к.т.н., А.В. Шабанов, к.т.н., А.А. Шабанов* // Журнал автомобильных инженеров № 1 (84), 2014 г. **8.** *Новик Ф.С.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / *Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов.* – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с. **9.** *Нефёдов А.Ф.* Планирование эксперимента и моделирование при исследовании эксплуатационных свойств автомобилей / *А.Ф. Нефедов, Л.Н. Высочин.* – Львов, Выща школа, изд-во при Львов. ун-те. 1976 г. – 160 с. **10.** *Грачёв Ю.П.* Математические методы планирования эксперимента // *Ю.П. Грачёв, Ю.М. Плаксин.* – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *V Kieve* prezentovali eksperimental'noe elektrotaksi [Elektronnyj resurs] / 2014. – Rezhim dostupa: <http://toneto.net/news/kultura/v-kieve-prezentovali-eksperimentalnoe-elektrotaksi> (Data obracsheniya 28.01.2015). **2.** *Dembitskiy V.M.* Metodika viznachennja energetichnih karakteristik procesu elektrodinamichnogo gal'muvannja pid chas dorozhnih viprobuvan' transportnih zasobiv, obladnanih elektroprivodom ta sistemoju rekuperacii energii / *V.M. Dembitskiy* Visnik NTU. — Kyiv.: NTU, 2014. — Issue. 30. **3.** *Dembitskiy V.M.* Matematichna model' procesu elektrodinamichnogo gal'muvannja z rekuperacieju energii transportnogo zasobu, obladnanogo elektroprivodom / *V.M. Dembitskiy, O.P. Sitovskij* ta in. Naukovi notatki. Issue. 45. – Lusk: LNTU, 2014. p. 159 – 167. **4.** *Sitovskij O.P.* Matematichne modeljuvannja procesu elektrichnogo gal'muvannja maketu transportnogo zasobu z gibridnoju silovoju ustanovkoju / *O.P. Sitovskij, V.M. Dembitskiy* Visnik SevNTU. Issue. 135. – Sevastopol': SevNTU, 2012. p. 73 – 75. **5.** *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. **6.** *Blohin A.N.* Rezul'taty issledovanija elektromobilja na shassi “GAZel” / *A.N. Blohin, A.M. Groshev, T.A. Kozlova* i dr. Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana: Nauka i obrazovanie. – 2012. – No 12. – p. 75-106. **7.** *Lomakin V.V.* K raschjotu balansa mocshnosti kombinirovannoj energoustanovki gibridnogo avtomobilja / *V.V. Lomakin, k.t.n., A.V. Shabanov, k.t.n., A.A. Shabanov* Zhurnal avtomobil'nyh inzhinerov No 1 (84), 2014 yr. **8.** *Novik F.S.* Optimizacija processov tehnologii metallov metodami planirovanija eksperimentov / *F.S. Novik, Ja.B. Arsov.* – Moscow.: Mashinostroenie; Sofija: Tehnika, 1980. – 304 p. **9.** *Nefjodov A.F.* Planirovanie eksperimenta i modelirovanie pri issledovanii ekspluatacionnyh svojstv avtomobilej / *A.F. Nefedov, L.N. Vysochin.* – L'vov, Vysha shkola, izd-vo pri L'vov. un-te. 1976 yr. – 160 p. **10.** *Grachjov J.P.* Matematicheskie metody planirovanija eksperimenta / *J.P. Grachjov, J.M. Plaksin.* – Moscow.: DeLi print, 2005. – 296 p.

Надійшла (received) 05.03.2015