

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**Дембіцький Валерій Миколайович**



УДК 629.017

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ  
КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ  
З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ**

Спеціальність 05.22.02 – Автомобілі та трактори

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Луцькому національному технічному університеті (Луцькому НТУ) Міністерства освіти і науки України, м. Луцьк.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Сітовський Олег Пилипович,**  
Луцький національний технічний університет,  
доцент кафедри «Автомобілі і транспортні технології».

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Самородов Вадим Борисович,**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри «Автомобіле- і тракторобудування»;

кандидат технічних наук, доцент  
**Тімков Олексій Миколайович,**  
Національний транспортний університет,  
доцент кафедри «Автомобілі».

Захист відбудеться «26» лютого 2016 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.052.20 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: м. Львів, вул. С. Бандери, 32, корп. VI, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “ 23 ” \_\_\_\_\_ січня \_\_\_\_\_ 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
К 35.052.20, к.т.н., доцент



М.Ф. Боднар

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сьогодні все гостріше постає питання економічного використання світових паливних ресурсів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є створення гібридних та електричних автомобілів. Застосування електричного приводу із системою рекуперації енергії дає можливість поповнювати запас енергії під час руху транспортного засобу. В даний час застосування систем рекуперації енергії найбільшого розвитку досягло у сфері міського електричного та залізничного транспорту. Однак основною відмінністю автомобілів від вказаного виду транспорту є відсутність контактної мережі, куди можна віддавати рекуперовану, під час гальмування, енергію. Основною проблемою на сьогоднішній день є досить обмежена можливість акумулювання рекуперованої енергії. Це пов'язано з значною вартістю її накопичувачів та відносно малою кількістю.

Сучасні дослідження гібридних автомобілів, в основному, пов'язані з моделюванням компоувальних схем, визначенням тягово-швидкісних властивостей, запасу енергії. Питання дослідження гальмівних властивостей гібридних транспортних засобів, на яких застосовано рекуперацію енергії та системи її накопичення залишається відкритим, оскільки подібні роботи в Україні ще перебувають у стадії розвитку. Певні дослідження проведені Харківськими науковцями під керівництвом професора Бажинова О.В.; також активно працюють у цьому напрямку науковці Національного транспортного університету: Тімков О.М., Іванов О.С. Серед іноземних науковців можна відмітити роботи Блохіна А.Н., Грошева А.М., Козлова Т.А., Мухамеда Рашіда (Muhammad H. Rashid).

У цілому на сьогодні залишається багато невирішених питань щодо процесу рекуперативного гальмування транспортних засобів, тому дослідження їх систем рекуперації продовжує бути актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційного дослідження відповідає науковому напрямку кафедри автомобілів та транспортних технологій Луцького національного технічного університету "Покращення експлуатаційних властивостей КТЗ з гібридними силовими установками". Робота виконана в рамках реалізації транспортної стратегії України на період до 2020 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 року № 2174-р.

**Мета роботи** полягає у підвищенні ефективності енергетичних показників колісних транспортних засобів з електричним приводом у фазі сповільнення шляхом вдосконалення системи рекуперативного гальмування.

У відповідності до поставленої мети визначено **задачі дослідження:**

- розробка математичної моделі процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу, обладнаного електроприводом із застосуванням комплексного підходу, яка дозволить за заданими конструктивними параметрами прогнозувати енергетичні та гальмівні показники транспортного засобу;

- дослідження впливу конструктивних параметрів транспортного засобу та зовнішніх чинників на процес рекуперативного гальмування;
- впровадження системи рекуперації енергії на експериментальний автомобіль ГСУ-1 та забезпечення її роботи з максимальною ефективністю;
- проведення експериментальних досліджень процесу рекуперативного гальмування з метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі;
- розробка рекомендацій спрямованих на забезпечення акумулювання максимальної кількості рекуперованої енергії під час процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу, обладнаного електроприводом.

**Об'єктом дослідження** є енергетичні показники колісного транспортного засобу з електричним приводом, обладнаного системою рекуперації енергії, у фазі сповільнення.

**Предметом дослідження** є система рекуперативного гальмування колісного транспортного засобу з електричним приводом.

**Методи досліджень**, які використовуються в роботі засновані на основних положеннях теорії автомобіля та теорії експлуатаційних властивостей автомобіля щодо визначення гальмівних, тягово-швидкісних властивостей та енергоефективності, теорії електроприводу та теорії електродвигунів під час досліджень електричної складової процесу рекуперації енергії, теорії планування експерименту, математичного аналізу, дискретної математики, лінійної алгебри щодо експериментальних досліджень, теорії невизначеності вимірювань щодо оцінювання результатів експериментальних даних. Дослідження проводяться з використанням персонального комп'ютера та сучасного програмного забезпечення.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що:

- уточнено математичні моделі руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування із застосуванням комплексного підходу;
- розв'язано проблему підвищення ефективності рекуперативного гальмування транспортних засобів з електричним приводом;
- вперше досліджено механіку процесу рекуперативного гальмування;
- розроблено оціночні критерії – показники енергоефективності системи рекуперації енергії.

**Достовірність результатів досліджень** забезпечується коректним застосуванням математичних методів, положень теорії автомобіля, теорії електричного приводу, застосуванням сучасного відкаліброваного випробувального обладнання та устаткування, оцінюванням невизначеності вимірювань експериментальних даних, задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних даних.

**Практичну цінність отриманих результатів** складають

- математичні моделі руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування, які забезпечують можливість прогнозування необхідного стану накопичувачів енергії безпосередньо перед початком гальмування та можливість розрахунків і надання рекомендацій стосовно техніко-економічних показників та експлуатаційних властивостей транспортного засобу;

- принципова схема роботи системи управління, яка забезпечить максимальні показники енергоефективності та ефективності гальмування під час руху транспортного засобу.

**Реалізація роботи.** Результати дисертаційних досліджень прийняті до використання в ДП «Автоскладальний завод № 1» публічного акціонерного товариства «Автомобільна компанія «Богдан Моторс»»: в системі управління тяговим електричним приводом гібридного автобуса А70522 застосовано алгоритм керування системою рекуперації енергії, показник ефективності роботи системи рекуперації енергії – коефіцієнт рекуперації застосовується з метою наладки тягового електричного привода, під час постановки продукції на виробництво; ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Електронтранс»: під час проектування транспортних засобів після визначення їх тягово-швидкісних характеристик, застосовується в якості перевіркової, методика розрахунку системи рекуперативного гальмування, ТзОВ «Волиньстандарт»: методика оцінювання невизначеності ефективності гальмування, а також результати дисертаційних досліджень застосовуються співробітниками кафедри автомобілів і транспортних технологій під час викладання навчальних дисциплін.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати роботи, які виносяться на захист опубліковані у наукових працях [1 – 17], отримані здобувачем особисто.

Роботи [1, 4, 5, 10, 12, 13] виконані самостійно. В роботах у співавторстві здобувачу належать: [2] – дослідження та аналіз доцільності застосування рекуперації енергії під час руху транспортного засобу з вимкненим зчепленням; [3] – розробка математичної моделі процесу електричного гальмування транспортного засобу з гібридною силовою установкою; [6] – аналіз показників ефективності рекуперативного гальмування транспортного засобу; [7] - розробка математичної моделі процесу електричного гальмування транспортного засобу на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення; [8] – проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів; [9] – проведення ідентифікації складових невизначеності, формування бюджету невизначеності; [11] - розробка математичної моделі процесу електричного гальмування транспортного засобу обладнаного електроприводом.

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних семінарах і наукових конференціях Луцького національного технічного університету (2011-2015 р.р.), II міжнародній науково-технічній конференції: “Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей” у Луцькому національному технічному університеті (2012 р.), XV міжнародній науково-технічній конференції: “Автомобільний транспорт: проблеми і перспективи” у Севастопольському національному технічному університеті (2012 р.), III міжнародній конференції: “Автомобіль і електроніка. Сучасні технології” у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (2013 р.), III міжнародній науково-технічній конференції: “Науково-прикладні аспекти

автомобільної і транспортно-дорожньої галузей” у Луцькому національному технічному університеті (2014 р.), “Стратегічне планування розвитку м. Луцьк 2015 – 2030 р.р.” (2014 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції “Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні” (м. Львів, 2015).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 17 наукових працях, в т.ч. 13 - у фахових виданнях, з яких 4 у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз [5, 6, 8, 12], 4 – матеріали та тези конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, основну частину, яка складається з чотирьох розділів, висновки, список використаних джерел, який нараховує 160 найменувань на 21 сторінці. Повний обсяг дисертації – 198 сторінок, із яких 129 сторінок основного тексту, 57 рисунків з урахуванням графіків, 34 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації обґрунтована актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну результатів досліджень, зазначено практичну цінність отриманих результатів, надано відомості про апробацію та публікацію основних результатів роботи.

У **першому розділі** виконано огляд вітчизняних та закордонних робіт з дослідження систем рекуперативного гальмування транспортних засобів. Показано, практично відсутні роботи із дослідження систем рекуперативного гальмування. З українських вчених можна відзначити роботи Самородова В.Б., Бажинова О.В., Смирнова О.П., Двадненко В.Я., Серікова С.А., Тімкова О.М., Іванова О.С. Серед закордонних науковців можна відмітити роботи науковців університету Західної Флориди (Muhammad H. Rashid), Блохіна А.М., Ломакіна В.В. Система рекуперації розглядається, в основному, як засіб поповнення запасу енергії, відсутній єдиний підхід до визначення оптимальних показників рекуперативного гальмування. Зважаючи на сучасні тенденції, засновані на комплексному підході до досліджень складних систем транспортного засобу, враховуючи синергетичний ефект, який виникає під час застосування системи рекуперації енергії, постає задача комплексного вивчення системи рекуперації енергії та її властивостей.

У **другому розділі** виходячи з положень теорії автомобіля та теорії електричного приводу побудовано математичні моделі регульованого процесу рекуперативного гальмування у яких застосовано комплексний підхід та враховано електричні і механічні впливи на ефективність даного процесу.

Рівняння руху транспортного засобу, який здійснює електричне гальмування за допомогою електродвигуна матиме вигляд:

$$P_j = P_w + P_f \pm P_h + \frac{M_{\tau e} \cdot u_{mpe}}{r_k \cdot \eta_{mp.e}}, \quad (1)$$

де  $M_{те}$  – крутний момент генератора;  $u_{мре}$  – передатне число трансмісії;  $\eta_{мр.е}$  – коефіцієнт корисної дії трансмісії, який має місце під час здійснення рекуперативного гальмування;  $r_k$  – радіус кочення колеса.

Сповільнення транспортного засобу визначатиметься залежністю:

$$j = \frac{1}{m_a \cdot \delta_{об}} \cdot \left( \frac{30 \cdot U \cdot \eta_e \cdot u_{мре} \cdot I(n)}{\pi \cdot n \cdot r_k \cdot \eta_{мр.е}} + k_w \cdot B \cdot H \cdot V^2 + m_a \cdot g \cdot \psi \right). \quad (2)$$

Як видно з наведеної залежності, визначальними у випадку рекуперативного гальмування є сила струму та оберти двигуна.

Залежність (2) дозволяє провести розрахунки лише в заданий момент часу.

Оскільки, під час рекуперативного гальмування транспортного засобу, оберти, і відповідно, струм електричного двигуна будуть падати, то значення сповільнення автомобіля теж зменшуватиметься. Для розрахунків значення сповільнення на всьому діапазоні швидкостей, рекуперативного гальмування доцільно скористатися методом ітерації. При чому, розрахунок здійснюється покроково, через певні проміжки часу  $\Delta t$  в наступному порядку:

- визначення початкового сповільнення (2);
- розрахунок швидкості руху, обертів електричного двигуна, сили струму через  $\Delta t$ , с;
- визначення наступного значення сповільнення.

У якості електродвигуна в гібридному автомобілі використано генератор Г-290. Залежність сили струму від обертів двигуна наведено на рисунку 1.

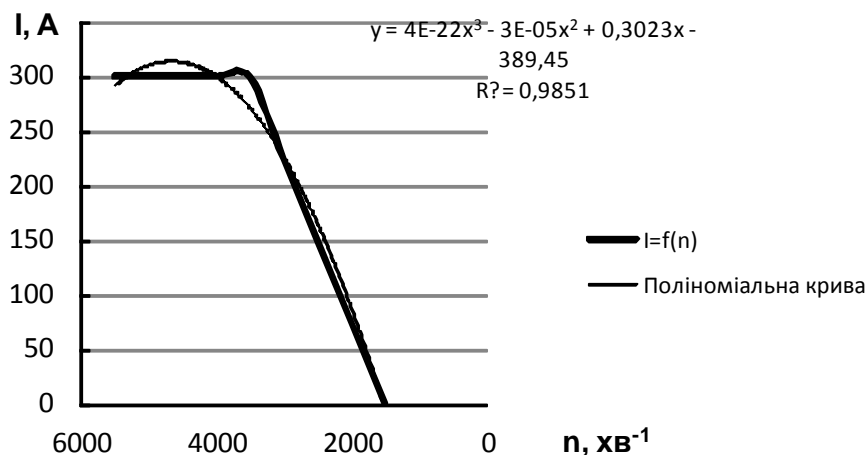


Рисунок 1 – Залежність сили струму від обертів електричного двигуна, який працює в режимі генератора

Для експериментального зразка легкового автомобіля з гібридною силовою установкою ГСУ-1 проведено розрахунки та побудовано графіки зміни сили струму залежно від швидкості руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування для різних передатних чисел (див. рис. 2).

Для досліджень та розрахунків процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу, обладнаного електроприводом і системою рекуперації енергії найбільш оптимальним буде скористатися залежностями, які описують процес гальмування транспортного засобу через виконання певної роботи.

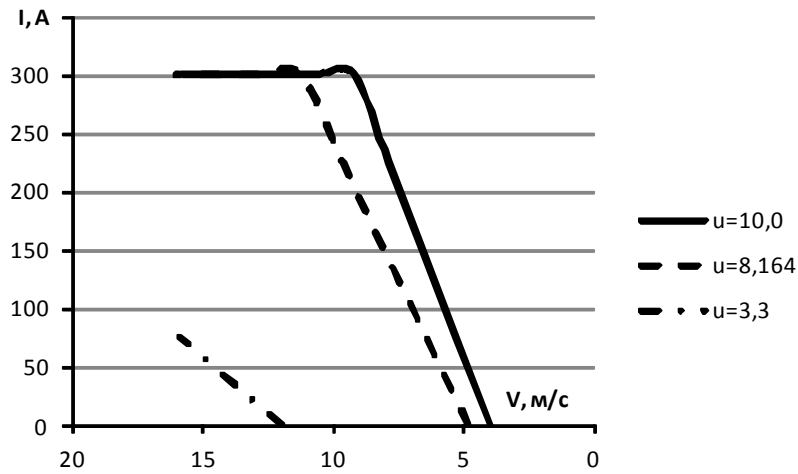


Рисунок 2 – Характер зміни сили струму залежно від швидкості руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування

Під час рекуперативного гальмування системами автомобіля виконується робота, яка здійснюється у процесі гальмування транспортного засобу,  $A_\tau$ ; робота, яка здійснюється накопичувачами енергії при поглинанні рекуперованої енергії,  $A_n$ ; вивільнення кінетичної енергії автомобіля під час гальмування,  $A_k$ ;

$$\begin{aligned} A_\tau &= P_j \cdot S, \\ A_n &= U \cdot I \cdot t, \\ A_k &= \frac{m_a \cdot V^2}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $P_j$  – сила інерції автомобіля, Н;

$m_a$  – маса автомобіля, кг;

$S$  – пройдений шлях, м;

$U$  – напруга накопичувачів, В;

$I$  – сила струму, А;

$t$  – час, с.

Із метою підвищення ефективності рекуперативного гальмування, збільшуючи передатне число трансмісії, необхідно постійне регулювання характеристик електричного приводу з метою уникнення його перевантаження. Враховуючи рівняння (3) та застосовуючи регулювання характеристик двигуна широтно-імпульсною модуляцією, можна записати систему рівнянь:



$$\left\{ \begin{array}{l}
 A_{\tau} = \frac{1}{r_k \cdot \eta_{mp.e}} \int_{t_n}^{t_k} \left( \frac{30 \cdot \eta_e \cdot u_{mpe} \cdot I_{ген}(n) \cdot I_{ген}(I_{3б})}{\pi \cdot n} + \right. \\
 \left. + B \cdot H \cdot k_w \cdot V^2 \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} + \psi \cdot G_a \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} \right) V dt \\
 C = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_k^2)}{2 \cdot U_{max} \cdot \eta_{mpe}} \\
 A_{\tau} \leq C \cdot U_{max} \\
 V = f(t) \\
 I_{ген} = f(I_{3б})
 \end{array} \right. \quad (4)$$

Залежності (4) дозволяють описати рух транспортного засобу під час рекуперативного гальмування.

У **третьому розділі** визначено методику експерименту, проведено підбір випробувального устаткування, проведено планування експерименту, здійснено оцінювання невизначеності вимірювань величин.

У результаті експериментальних досліджень отримано показники, які зведено у таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних даних щодо ефективності системи рекуперативного гальмування.

№ з/п	V, км/год	I <sub>3б</sub> , А	j <sub>1</sub> , м/с <sup>2</sup>	j <sub>2</sub> , м/с <sup>2</sup>	j <sub>3</sub> , м/с <sup>2</sup>	j <sub>ср</sub> , м/с <sup>2</sup>	E <sub>м1</sub> , кДж	E <sub>м2</sub> , кДж	E <sub>м3</sub> , кДж	E <sub>м.ср</sub> , кДж
1	60	5	2	2,02	1,98	2	39,5	38,9	40,2	39,53
2	60	0,5	1,7	1,6	1,55	1,617	24,3	22,7	23,9	23,63
3	10	5	0,84	0,82	0,86	0,84	10,2	10,3	10,8	10,43
4	10	0,5	0,52	0,51	0,48	0,503	3,4	4,1	3,7	3,733
5	60	2,75	1,8	1,7	1,75	1,75	32,9	34,1	33,1	33,37
6	10	2,75	0,61	0,63	0,69	0,643	5,9	7,1	6,8	6,6
7	35	5	1,71	1,72	1,60	1,68	28,2	30,1	29,5	29,27
8	35	0,5	1,21	1,24	1,33	1,26	17,9	18,8	19,3	18,67
9	35	2,75	1,3	1,28	1,32	1,3	25,4	23,9	24,7	24,67

За отриманими результатами експерименту побудовано залежності кількості рекуперованої енергії від швидкості за різної ефективності гальмування (див. рис. 3).

За отриманими експериментальними даними проведено розрахунок коефіцієнтів математичної моделі та значення їх дисперсії, а також побудовано рівняння регресії:

$$E = 84,268 + 78,83 \cdot I_{3б} + 34,54 \cdot V + 11,72 \cdot I_{3б} \cdot V - 16,76 \cdot I_{3б}^2 - 2,4 \cdot V^2. \quad (5)$$

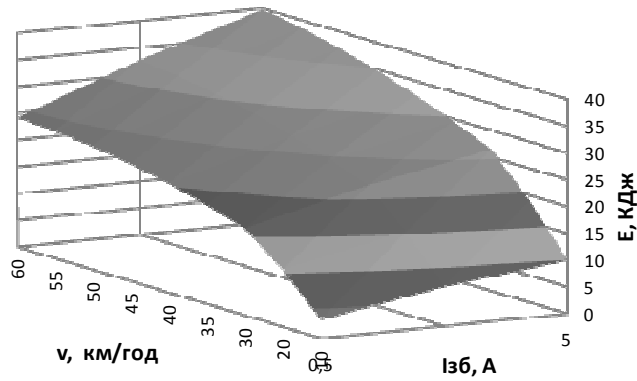


Рисунок 3 – Питома енергія, рекуперована двигуном, під час рекуперативного гальмування

Розрахункове значення критерію Фішера  $F_p = 4,0642$  є меншим табличного при 1 % рівні значимості  $F_m(0,01; 3; 18) = 4,9$ . Гіпотеза щодо адекватності математичної моделі підтверджується.

За отриманими результатами експериментальних досліджень з визначення сповільнення, яке виникає під час рекуперативного гальмування побудовано залежності кількості рекуперованої енергії від швидкості за різної ефективності гальмування (див. рис. 4).

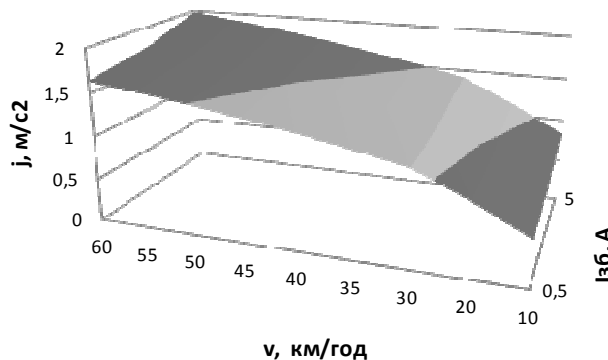


Рисунок 4 – Сповільнення, яке виникає під час рекуперативного гальмування автомобіля.

За отриманими експериментальними даними проведено розрахунок коефіцієнтів математичної моделі та значення їх дисперсії, а також побудовано рівняння регресії:

$$j = 66,767 + 50,66 \cdot I_{30} + 17,04 \cdot V - 0,8566 \cdot I_{30} \cdot V - 9,6414 \cdot V^2 + 4,4131 \cdot I_{30}^2. \quad (6)$$

Розрахункове значення критерію Фішера  $F_p = 3,4924$  є меншим табличного при 1 % рівні значимості  $F_m(0,01; 3; 18) = 4,9$ . Гіпотеза щодо адекватності математичної моделі підтверджується.

У четвертому розділі проведено оцінювання вихідних даних, отриманих теоретичним та експериментальним шляхами, проведено теоретичні дослідження системи рекуперативного гальмування, а також здійснено

дослідження системи рекуперації на дорогах із низьким коефіцієнтом зчеплення та на затяжних спусках.

Оцінювання вихідних даних, отриманих теоретичним та експериментальним шляхами проведено графічно-чисельним методом. Під час оцінювання теоретичних та експериментальних даних побудовано криві, які характеризують зміну значень сповільнення та питомої енергії під час здійснення рекуперативного гальмування транспортного засобу.

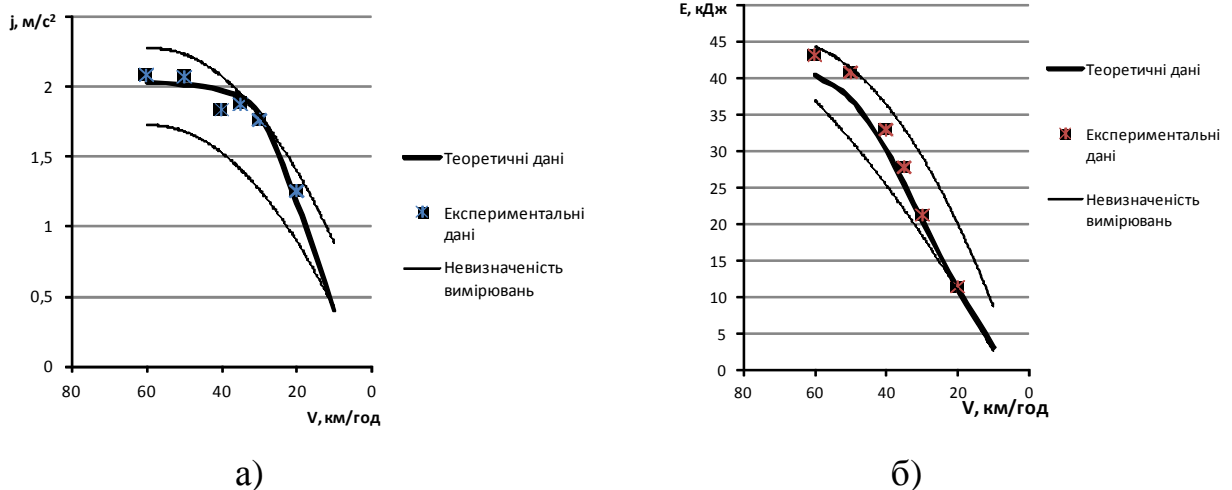


Рисунок 5 – Порівняння ефективності рекуперативного гальмування за результатами теоретичних та експериментальних досліджень: а) за значенням сповільнення; б) за значенням енергії

У таблиці 2 наведено результати порівняння вихідних даних теоретичних та експериментальних досліджень значення сповільнення та питомої енергії для діапазону швидкостей 60...20 км/год.

Таблиця 2 – Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень

Показник	Значення показника	
	Сповільнення	Питома енергія
Дисперсія експерименту, $S_{екс}^2$	0,006624	2,23216
Дисперсія адекватності, $S_{ад}^2$	0,0018	0,4619
Розрахункове значення критерію Фішера, $F_p$	3,68	4,83
Табличне значення критерію Фішера, $F_m$	4,9	4,9
Похибка результатів	До 8 %	До 11 %

На приведених графіках також показано криві, які визначають довірчий інтервал для отриманих значень сповільнення та питомої енергії. Певні невідповідності спостерігаються наприкінці процесу, що обумовлено нестабільністю показників на малих швидкостях, у момент припинення рекуперативного гальмування.

За наведеними даними можна стверджувати про достовірність побудованих теоретичних та експериментальних моделей з імовірністю 0,95.

Основним показником ефективності гальмування є значення сповільнення.

За залежностями 4, проведено розрахунки та побудовано відповідні графіки (див. рис. 6, 7, 8 і 9).

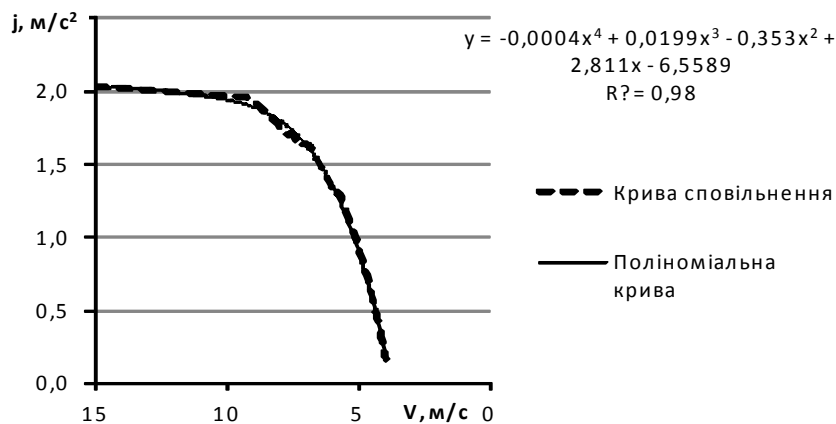


Рисунок 6 – Характер зміни сповільнення під час рекуперативного гальмування транспортного засобу при передатному числі трансмісії:  $u_{mpe}=11,87$

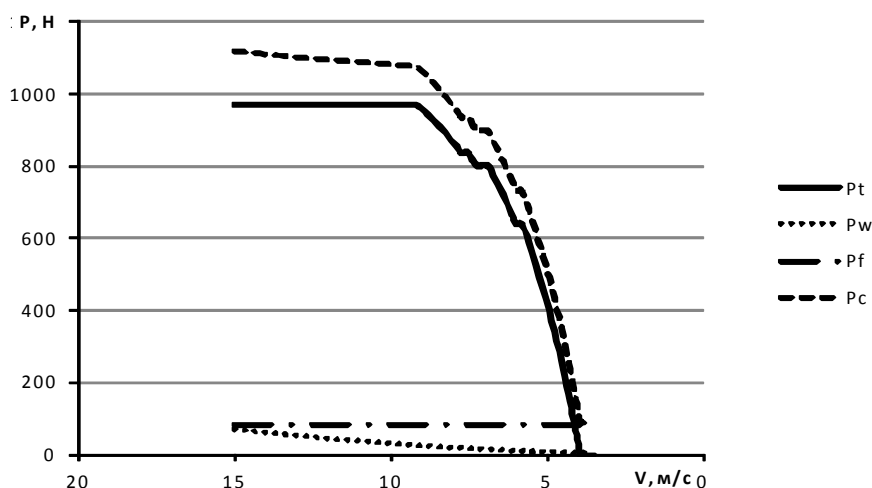


Рисунок 7 – Сили, які діють на автомобіль під час рекуперативного гальмування при передатному числі трансмісії:  $u_{mpe}=11,87$

Під час здійснення рекуперативного гальмування, автомобілем, обладнаним електричним приводом, без здійснення регулювання процесу гальмування, спостерігається його припинення на досить високих швидкостях, які становлять близько 20 км/год. Окрім цього максимальне значення сповільнення знаходиться в межах 0,9...1,0 м/с<sup>2</sup>.

За результатами теоретичних досліджень процесу регульованого рекуперативного гальмування транспортного засобу з гібридною силовою установкою із збільшеним передатним числом встановлено підвищення ефективності рекуперативного гальмування (див. рис. 8). Максимальне значення сповільнення складає приблизно 2 м/с<sup>2</sup>. У цьому випадку спостерігається зростання значення сповільнення та його вихід на максимальне

значення за мірою наближення характеристик електричного двигуна до номінальних.

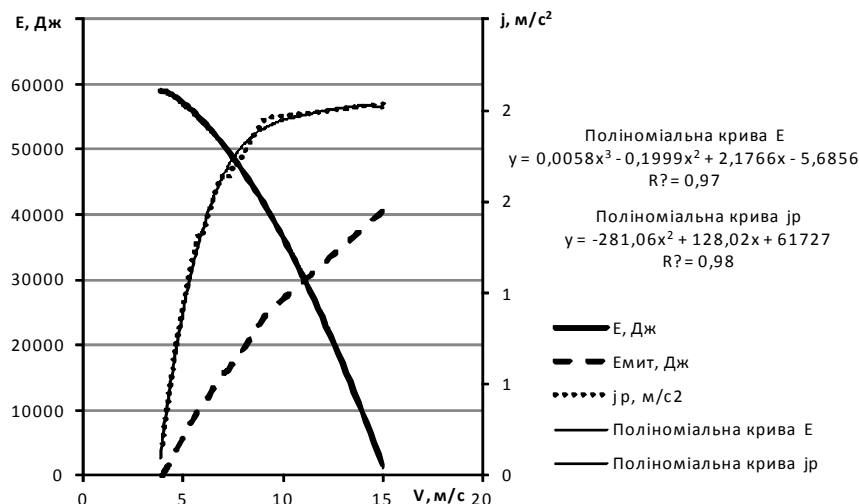
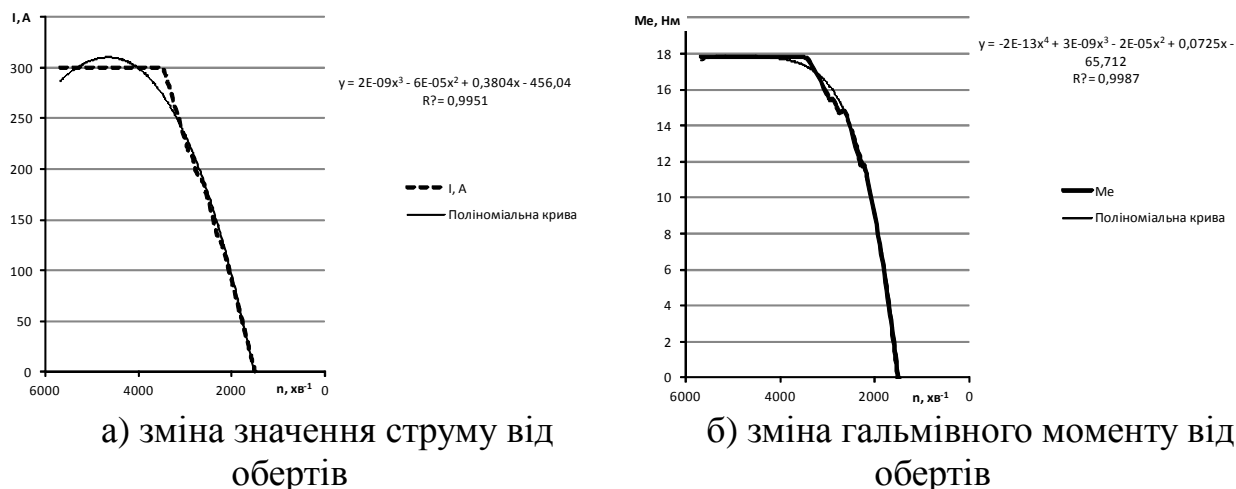


Рисунок 8 – Енергетичні показники та гальмівні властивості автомобіля з електричним приводом при передатному числі трансмісії:  $u_{mpe}=11,87$

Таким чином, залежності, наведені на рисунках 6, 7, 8 і 9, повною мірою відображають процес рекуперативного гальмування і характеризують його, як зі сторони гальмівних властивостей, так і зі сторони енергетичних характеристик автомобіля. Зазначені залежності разом зі струмошвидкісною характеристикою електричного двигуна, який працює у режимі генератора можна назвати енергоефективними характеристиками автомобіля.

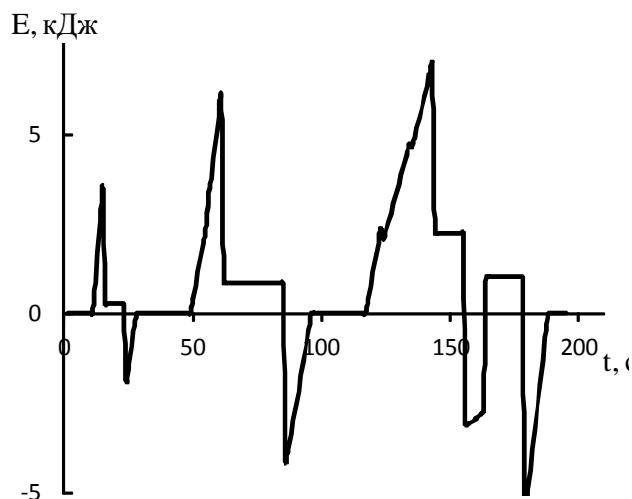


а) зміна значення струму від обертів

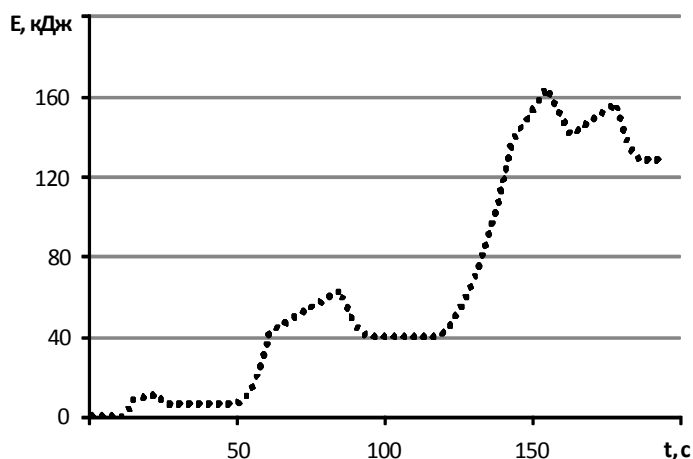
б) зміна гальмівного моменту від обертів

Рисунок 9 – Зміна значення струму та гальмівного моменту від обертів електричного двигуна автомобіля з електричним приводом при передатному числі трансмісії:  $u_{mpe}=11,87$

Окрім того визначено енергетичні показники гібридного автомобіля, обладнаного системою рекуперації енергії, у міському їздовому циклі EN 1986–1:2001, які наведені на рисунку 10.



а) питомі енергетичні показники



б) сумарні показники

Рисунок 10 – Енергетичні показники гібридного автомобіля у міському їздовому циклі, при застосуванні рекуперативного гальмування

Якщо провести аналіз залежностей, показаних на рисунку 10, можна констатувати значне зменшення сумарних витрат електричної енергії при застосуванні рекуперативного гальмування. Окрім того, сповільнення, регламентоване вимогами нормативних документів можливо забезпечити лише за рахунок рекуперативного гальмування із подальшим догальмовуванням механічним складником гальмівної системи автомобіля.

Для ефективної роботи системи рекуперативного гальмування запропоновано наступний алгоритм роботи системи управління рекуперацією енергії (див. рис. 11). Система управління рекуперацією постійно, відразу ж після початку руху відстежує стан накопичувачів енергії та проводить теоретичні розрахунки можливої кількості рекуперованої енергії, з тим, щоб забезпечити максимальну ефективність роботи системи рекуперації енергії. При цьому одночасно забезпечується підвищення ефективності системи електричного гальмування. Принципова схема роботи системи управління рекуперативним гальмуванням наведена на рис. 11.

Застосування рекуперативного гальмування призводить до циклічної роботи накопичувачів енергії.

Із метою накопичення статистичних даних щодо циклічності роботи під час поїздок містом Луцьк проводилася реєстрація режимів гальмування транспортного засобу. Результати наведені у таблиці 3 та у вигляді гістограми на рисунку 12.

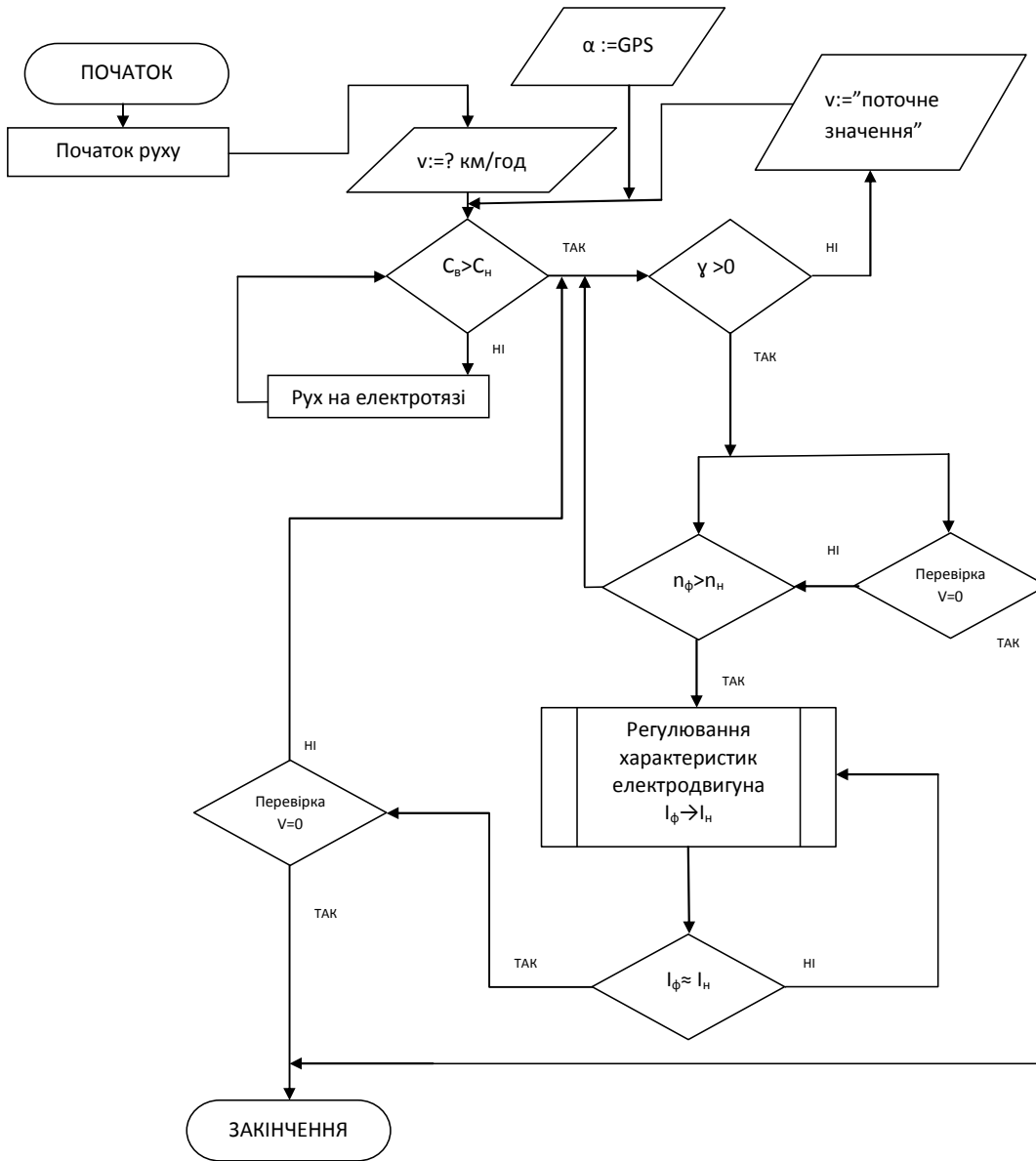


Рисунок 11 – Алгоритм роботи системи управління рекуперацією енергії автомобіля.

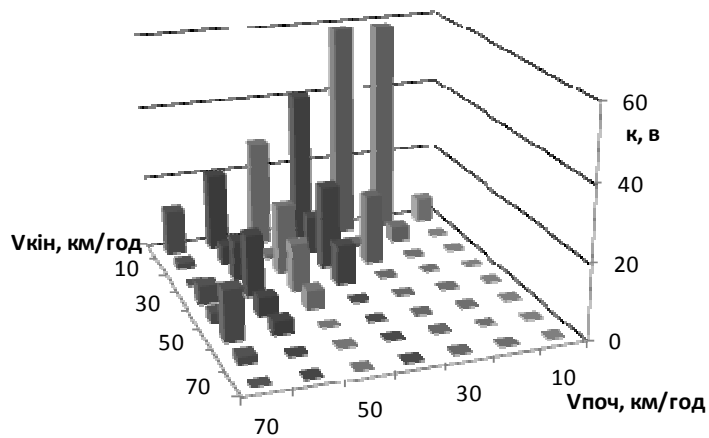


Рисунок 12 – Розподіл гальмівних режимів транспортного засобу

Таблиця 3 – Розподіл гальмівних режимів транспортного засобу

Початкова швидкість гальмування, км/год.	Кінцева швидкість гальмування, км/год.								Всього випадків
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0	2	14	3	5	0	2	12	38
60	0	0	4	5	17	11	5	21	63
50	0	0	0	5	13	19	1	29	67
40	0	0	0	0	11	23	10	41	85
30	0	0	0	0	0	19	1	59	79
20	0	0	0	0	0	0	4	59	63
10	0	0	0	0	0	0	0	7	7
Всього випадків	0	2	18	13	46	72	23	228	402

Наведена гістограма відображає розподіл гальмувань транспортного засобу за весь період спостережень.

Якщо прийняти період спостережень за один будь-який цикл та перейти до імовірності станів системи, то можна отримати матрицю імовірностей переходів станів системи (7), яка наведена у таблиці.

Таблиця 4 – Матриця ймовірності переходів гальмівних режимів транспортного засобу

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год								Сума імовірностей подій
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0,000	0,005	0,035	0,007	0,012	0,000	0,005	0,030	0,0945
60	0,000	0,000	0,010	0,012	0,042	0,027	0,012	0,052	0,1567
50	0,000	0,000	0,000	0,012	0,032	0,047	0,002	0,072	0,1667
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,057	0,025	0,102	0,2114
30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,002	0,147	0,1965
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,147	0,1567
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,0174
Сума імовірностей подій	0,000	0,005	0,045	0,032	0,114	0,179	0,057	0,567	1,000

Матриця імовірності станів запишеться у вигляді:

$$A = \begin{pmatrix} P_{70-60} & P_{70-50} & P_{70-40} & P_{70-30} & P_{70-20} & P_{70-10} & P_{70-0} \\ 0 & P_{60-50} & P_{60-40} & P_{60-30} & P_{60-20} & P_{60-10} & P_{60-0} \\ 0 & 0 & P_{50-40} & P_{50-30} & P_{50-20} & P_{50-10} & P_{50-0} \\ 0 & 0 & 0 & P_{40-30} & P_{40-20} & P_{40-10} & P_{40-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{30-20} & P_{30-10} & P_{30-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{20-10} & P_{20-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{10-0} \end{pmatrix}, \quad (7)$$



де  $p_{v_1-v_2}$  – імовірність переходу системи зі стану 1 у стан 2.

Також розраховано одиничні енергетичні показники для матриці зміни станів, кількість рекуперованої енергії, матрицю глибини розряду системи накопичення на цикл, необхідні ємності суперконденсаторів та ступінь їх використання, згідно з матрицею переходу станів системи за один цикл, що в подальшому дозволить проводити розрахунок системи рекуперації енергії на етапі проектування.

Для оцінки ефективності системи рекуперації запропоновано два показника:

- кількісний  $k_{рек}$  – коефіцієнт рекуперації, який у відсотковому значенні характеризує ступінь використання можливостей системи рекуперативного гальмування транспортного засобу;
- якісний  $K_{рек}$  – фактор рекуперації, який дозволить провести порівняльний аналіз ефективності систем рекуперації електричної енергії різних транспортних засобів.

Коефіцієнт рекуперації  $k_{рек}$  визначається як відношення кількості енергії, рекуперованої транспортним засобом  $E_{рек}$  до максимально можливої кількості рекуперованої енергії  $E_K$ :

$$k_{рек} = \frac{E_{рек}}{E_K}, \quad (8)$$

$$\text{де } E_K = \frac{m_a(V_n^2 - V_k^2)}{2}. \quad (9)$$

Даний коефіцієнт дозволить, окрім оцінювання ефективності системи рекуперації енергії транспортного засобу, проводити оцінювання ступеня використання можливостей системи рекуперації енергії водієм.

Оскільки стиль водіння має значний вплив на енергетичні показники транспортного засобу, то встановлення на транспортному засобі показника ступеня використання системи рекуперації енергії, спонукатиме водіїв до її ефективнішого використання, що призведе до поліпшення показників енергоефективності. Значення коефіцієнта рекуперації енергії за поїздку, визначатиметься за наступною залежністю:

$$k_{pn} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{E_{рек}}{E_K}, \quad (10)$$

де  $n$  – кількість гальмувань.

Отримавши дані щодо ефективності роботи системи рекуперації енергії для двох автомобілів неможливо провести їх порівняння, оскільки транспортні

засоби відрізняються масово-габаритними показниками, потужностями двигунів і т.і.

Тому пропонується застосувати в якості оціночного показника фактор рекуперації  $K_{рек}$ , приведений до одиниці маси транспортного засобу. Фактор рекуперації дозволяє визначити кількість рекуперованої енергії на одиницю маси транспортного засобу (Дж/кг):

$$K_{рек} = \frac{E_{рек}}{m_n}, \quad (5)$$

де  $m_n$  – повна маса автомобіля, кг.

При цьому кількість рекуперованої енергії визначається під час рекуперативного гальмування транспортного засобу зі швидкості 60 км/год.

Фактор рекуперації дає змогу проводити моделювання енергетичних показників на стадії проектування транспортних засобів, а також у випадку переобладнання автомобілів на електричну тягу. Наведена залежність дозволяє уніфікувати конструкції електричного приводу, для певного діапазону масових показників транспортних засобів. Наприклад: підприємство займається виробництвом модельного ряду транспортних засобів від мікроавтобусів до автобусів надвеликої місткості. При проектуванні нової моделі проводиться аналіз фактора рекуперації енергії, в результаті чого транспортний засіб обладнується електричним приводом, який є найбільш ефективним у даному випадку.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності рекуперативного гальмування, а саме енергетичних показників та гальмівних властивостей транспортних засобів з електричним приводом.

1. За результатами проведеного аналізу останніх досліджень у сфері електричних та гібридних транспортних засобів, їх гальмівних та енергетичних властивостей встановлено необхідність застосування комплексного підходу до питань дослідження систем рекуперації енергії, при якому система рекуперації енергії розглядається з однієї сторони як елемент гальмівної системи, з іншої – як система накопичення енергії

2. Побудовано математичні моделі регульованого процесу рекуперативного гальмування, де застосовано комплексний підхід та враховано електричні і механічні впливи на ефективність даного процесу, проведено теоретичні дослідження системи рекуперації енергії залежно від дорожніх умов, встановлено вплив зовнішніх факторів на роботу системи рекуперації енергії, що дає змогу проводити розрахунок показників системи рекуперації

енергії під час руху транспортного засобу

3. Розроблено методику проведення експерименту досліджень, яка базується на використанні методів двофакторного нелінійного планування експерименту з отриманням регресійних моделей нелінійного взаємоз'язку вихідних параметрів дослідження – сповільнення  $j$  та рекуперованої енергії  $E_p$ , з вхідними факторами – початкової швидкості гальмування  $V$  та струмом збудження  $I_{зб}$

4. Проведено експериментальні дослідження системи рекуперативного гальмування на гібридному автомобілі ГСУ-1, за отриманими експериментальними даними побудовано рівняння регресії для визначення сповільнення та кількості питомої рекуперованої енергії, за якими здійснено моделювання процесу рекуперативного гальмування, а також, які можуть застосовуватися у системах управління рекуперацією енергії

5. Порівнянням теоретичних та експериментальних результатів досліджень встановлено, що похибка по сповільненню становить до 8 %, похибка по питомому значенню рекуперованої енергії становить до 11 %. Обидві наведені математичні моделі є адекватними за критерієм Фішера. Окрім того проведено оцінювання невизначеності вимірювань по обох показниках. За результатами оцінювання можна стверджувати, що з рівнем довіри 0,95, дані моделі можна вважати адекватними

6. Запропоновано рекомендації щодо розрахунку системи рекуперації енергії, конструктивних параметрів автомобіля, а також рекомендації щодо прогнозування режимів роботи системи рекуперації енергії та накопичувачів енергії, розроблено оціночні критерії – показники енергоефективності системи рекуперації енергії, запропоновано принципову схему роботи системи управління рекуперацією енергії гібридного автомобіля

7. Встановлено, що впровадження розроблених рекомендацій призводить до збільшення кількості рекуперованої енергії до 20 % та поліпшення ефективності гальмування до 2 разів

8. Результати роботи прийняті до використання в ДП “Автоскладальний завод № 1” публічного акціонерного товариства “Автомобільна компанія “Богдан Моторс””: в системі управління тяговим електричним приводом гібридного автобуса А70522 застосовано алгоритм керування системою рекуперації енергії, показник ефективності роботи системи рекуперації енергії – коефіцієнт рекуперації застосовується з метою наладки тягового електричного привода, під час постановки продукції на виробництво; ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Електронтранс»: під час проектування транспортних засобів після визначення їх тягово-швидкісних характеристик, застосовується в якості перевіркової, методика розрахунку системи рекуперативного гальмування, ТзОВ “Волиньстандарт”: методика оцінювання невизначеності ефективності гальмування, а також результати дисертаційних досліджень застосовуються співробітниками кафедри

автомобілів і транспортних технологій під час викладання навчальних дисциплін.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дембіцький В. М. Вибір компонуальної схеми гібридного автомобіля та визначення режимів його руху / В. М. Дембіцький // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”. — Луцьк: НТУ, 2012. — Вип. 37. — С. 75–80.
2. Дембіцький В. М. Доцільність застосування рекуперації енергії під час руху автомобіля за інерцією з вимкненим зчепленням / В. М. Дембіцький, О. П. Сітовський // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”. — Луцьк: НТУ, 2012. — Вип. 36. — С. 83–85.
3. Сітовський О. П. Математичне моделювання процесу електричного гальмування макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Вісник СевНТУ. — Севастополь, 2012. — Вип. 135. — С. 73–75.
4. Дембіцький В. М. Методика оцінки ефективності системи накопичення енергії транспортного засобу з гібридною силовою установкою / В. М. Дембіцький // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — Луганськ, 2013. — Вип. 15 (204). — С. 93–95.
5. Дембіцький В. М. Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. — Серія: Автомобіле- та тракторобудування. — Харків: НТУ “ХПІ”, 2013. — Вип. 29 (1002). — С. 28–33.
6. Сітовський О. П. Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на зatoryжних спусках / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. — Серія: Автомобіле- та тракторобудування. — Харків: НТУ “ХПІ”, 2013. — Вип. 30 (1003). — С. 10–15.
7. Сітовський О. П. Електродинамічне гальмування гібридного транспортного засобу на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ; [редкол.: Туренко А. Н. (гл. ред.) [и др.]. — Харьков, 2013. — Вып. 33. — С. 13–18 [http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/728].
8. Сітовський О. П. Методика визначення оптимального ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії транспортних засобів / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. — Серія: Автомобіле- та тракторобудування. — Харків: НТУ “ХПІ”, 2014. — Вип. 8 (1051). — С. 54–60.

9. Сітовський О. П. Оцінювання невизначеності вимірювань під час гальмівних випробувань транспортних засобів / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький, А. М. Кашуба, В. М. Босенко // Вісник НТУ. — К.: НТУ, 2013. — Вип. 28 (Частина I). — С. 379–388.
10. 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 (Частина I). — С. 95–102.
11. 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.
12. Дембіцький В. М. Експериментальні дослідження процесу електродинамічного гальмування гібридного автомобіля / В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. — Серія: Автомобілебудування. — Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. — Вип. 10 (1119). — С. 38–43.
13. Дембіцький В. М. Регулювання параметрів генератора під час рекуперативного гальмування / В. М. Дембіцький // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: науковий журнал. — Луцьк: Луцький НТУ, 2015. — Вип. 1 (3). — С. 65–70.
14. Дембіцький В. М. Оптимальні режими руху електричних та гібридних транспортних засобів, обладнаних системою рекуперації енергії / В. М. Дембіцький // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту”, 21–23 жовтня, 2013 р.: збірник наукових праць. — Вінниця: ВНТУ, 2013. — С. 142–143.
15. Сітовський О. П. Вплив стилю водіння на рекуперацію енергії / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // LXXI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. — Київ, 2015. — С. 57.
16. Сітовський О. П. Перспективи розвитку автомобілів з електричним приводом в Україні / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький, А. М. Кашуба // LXXI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. — Київ, 2015. — С. 57.

17. Дембіцький В. М. Поліпшення енергетичних та гальмівних показників гібридних автомобілів категорії М1 /В. М. Дембіцький // Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів: збірник тез доповідей науково-практичної конференції 8–11 вересня 2015 року. Одеса – Коблево. – Одеса: Військова академія, 2015. – С. 68–71.

## АНОТАЦІЯ

**Дембіцький В.М.** Підвищення ефективності системи рекуперації енергії колісних транспортних засобів з електричним приводом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – Автомобілі та трактори. – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація присвячена поліпшенню енергетичних показників та гальмівних властивостей гібридних автомобілів шляхом застосування рекуперативного гальмування.

Для дослідження ефективності системи рекуперації проведено ідентифікацію та здійснено аналіз впливу складників процесу рекуперативного гальмування, побудовано математичні моделі регульованого процесу рекуперативного гальмування в яких застосовано комплексний підхід та враховано електричні і механічні впливи на ефективність даного процесу, проведено аналіз впливу експлуатаційних та конструктивних параметрів на процес рекуперативного гальмування транспортного засобу, визначено принцип керування роботою системи рекуперативного гальмування. Шляхом проведення теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що збільшення передатного числа трансмісії із застосуванням сучасних методів регулювання характеристик електричного приводу призводить до збільшення кількості рекуперованої енергії до 20 % та поліпшення ефективності гальмування до 2 разів. Результати роботи прийняті до використання в ДП «Автоскладальний завод № 1» публічного акціонерного товариства «Автомобільна компанія «Богдан Моторс»», ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Електронтранс», ТзОВ «Волиньстандарт», а також результати дисертаційних досліджень застосовуються викладачами кафедри автомобілів і транспортних технологій під час викладання навчальних дисциплін.

**Ключові слова:** рекуперація, енергія, гальмування, сповільнення, математична модель, властивість, електричний привід, електричний двигун, накопичувач енергії, енергетичні показники.

## ANNOTATION

**Dembitskyi V.M.** Improving the efficiency of energy recovery wheel vehicles with electric drive. – On the rights of manuscript.

Dissertation for an academic degree of the candidate of technical science according to the specialty 05.22.02 – Automobiles and tractors. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

Dissertation is devoted to the improvement of the energetic characteristics and braking peculiarities of the hybrid vehicles by means of recuperative braking. For the investigation of the efficiency of recuperation system there was made an identification and the analysis of influence of the recuperative braking components, there were represented the mathematical models of the regulated process of recuperative braking, where there was used a complex point of view and there were considered the electrical and mechanical influences for the efficiency of given process, there was made an analysis of influence of the exploitation and construction parameters for the process of recuperative braking of the vehicle, and there was determined the control strategy of the functioning of recuperative braking system. The represented mathematical models describe the process of recuperative braking of the vehicle with electric actuator, depending of its construction peculiarities and taking into consideration the characteristics of electrical engine. By means of theoretical and experimental researches, it was determined that augmentation of transmission gear ration with using of contemporary methods of adjusting of electric actuator characteristics leads to the augmentation of recuperated energy number for 20% and to the improvement of braking efficiency up to 2 times. Except of this, according to the results of statistics analysis, there was elaborated the method of calculation which allows to make an apportionment of the energetic characteristics of the vehicle equipped with the electric actuator in any speed range and to calculate the energy storage system. There were made the theoretical researches of movement of the vehicles with an electric actuator on the roads with low coefficient of adhesion and on the prolonged slopes. There were given the recommendations concerning the management of recuperative braking system, there was cited the principal scheme of control of the energy recuperation system, there were given the recommendations concerning the calculation of the recuperative braking system during the vehicles engineering. There were elaborated and offered the criteria for estimation of the energy efficiency characteristics of the energy recuperation systems. The results of the research are taken for application at DE “Car assembling plant № 1” of public joint-stock company “Automobile company “Bogdan Motors”: in the system of control of the tractive electric actuator of the hybrid bus A70522 there was used the control algorithm of the energy recuperation system, the efficiency parameter of functioning of the energy recuperation system – recuperation coefficient, is used with the aim of adjustment of the tractive electric actuator, during the launching into manufacturing; LC “Common Ukrainian-German enterprise “Elektrotrans”: during the engineering of the vehicles, after the determination of their traction and speed characteristics, the method of calculation of the recuperative braking system is used

as a test method; LC “Volynstandart”: the method of evaluation of the indefiniteness of braking efficiency and the results of the dissertation researches are used by the members of Department of the vehicles and vehicle technologies during the teaching of educational subjects.

**Key words:** recuperation, energy, braking, deceleration, mathematical model, peculiarity, electric actuator, electrical engine, energy accumulator, energy characteristics.

## АННОТАЦИЯ

**Дембицкий В.М.** Повышение эффективности системы рекуперации энергии колесных транспортных средств с электрическим приводом. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 – Автомобили и тракторы. – Национальный университет “Львівська політехніка”, Министерство образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена улучшению энергетических показателей и тормозных свойств гибридных автомобилей путем применения рекуперативного торможения.

Для исследования эффективности системы рекуперации проведена идентификация и осуществлен анализ влияния составляющих процесса рекуперативного торможения, построены математические модели регулируемого процесса рекуперативного торможения, в которой применен комплексный подход и учтены электрические и механические воздействия на эффективность данного процесса, проведен анализ влияния эксплуатационных и конструктивных параметров на процесс рекуперативного торможения транспортного средства, определен принцип управления работой системы рекуперативного торможения.

Построенные математические модели описывают процесс рекуперативного торможения транспортного средства с электрическим приводом, в зависимости от конструктивных особенностей, с учетом характеристик электрического двигателя.

Проведением теоретических и экспериментальных исследований установлено, что увеличение передаточного числа трансмиссии с применением современных методов регулирования характеристик электрического привода приводит к увеличению количества восстановленной энергии до 20% и улучшения эффективности торможения до 2 раз. Кроме того, по результатам анализа статистических данных разработана методика расчета, которая позволяет провести раскладку энергетических показателей транспортного средства, оборудованного электрическим приводом в любом скоростном диапазоне и провести расчеты системы накопления энергии.



Проведены теоретические исследования движения транспортных средств с электрическим приводом на дорогах с низким коэффициентом сцепления и на затяжных спусках. Даны рекомендации по управлению системой рекуперативного торможения, приведена принципиальная схема управления системой рекуперации энергии, даны рекомендации по расчету системы рекуперативного торможения при проектировании транспортных средств.

Разработаны и предложены критерии для оценки показателей энергоэффективности систем рекуперации энергии.

Результаты работы приняты к использованию в ГП «Автосборочный завод № 1» публичного акционерного общества «Автомобильная компания» Богдан Моторс»: в системе управления тяговым электроприводом гибридного автобуса А70522 применен алгоритм управления системой рекуперации энергии, показатель эффективности работы системы рекуперации энергии - коэффициент рекуперации применяется с целью наладки тягового электрического привода, при постановке продукции на производство; ООО «Совместное украинский-немецкое предприятие «Электронтранс»: при проектировании транспортных средств после определения их тягово-скоростных характеристик, применяется в качестве проверочной, методика расчета системы рекуперативного торможения, ООО «Волиньстандарт»: методика оценки неопределенности эффективности торможения, а также результаты диссертационных исследований применяются сотрудниками кафедры автомобилей и транспортных технологий при преподавании учебных дисциплин.

**Ключевые слова:** рекуперация, энергия, торможение, замедление, математическая модель, свойство, электрический привод, электрический двигатель, накопитель энергии, энергетические показатели.



Підписано до друку 29.12.2015 р.  
Формат 60x80/16. Папір офс.  
Ум. Друк арк. 0,625. Тираж 100 прим. Зам. № 137.

Редакційно-видавничий відділ  
Луцького національного технічного університету  
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.  
Друк – РВВ Луцького НТУ  
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

