

УДК 629.017

О. П. СІТОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц. Луцький НТУ;
В. М. ДЕМБІЦЬКИЙ, зав. лабораторією ДП «НДКТІ МГ», Київ

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СТУПЕНЯ ПОЧАТКОВОЇ ЗАРЯДКИ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Запропоновано методику визначення оптимального ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії транспортних засобів, обладнаних електродвигунами та системами рекуперації енергії. Дана методика може застосовуватися на етапі проектування, виробництва та під час проведення випробувань транспортних засобів, а також у алгоритмі роботи їх системи управління рекуперацією енергії. Проведено дослідження ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії залежно від умов експлуатації транспортного засобу.

Ключові слова: зарядка, ступінь, рекуперація, електрогальмування, накопичувачі енергії, кількість енергії, умови експлуатації.

Вступ. У автомобілебудівній галузі сьогодення докладаються значні зусилля спрямовані на підвищення економічності, зниження токсичності відпрацьованих газів. Внаслідок чого розвиток електричного та гібридного транспорту демонструє постійний ріст. За результатами статистичних досліджень відмічено ріст реалізації електричних та гібридних автомобілів. В результаті створення нових технологій, конструкцій постає питання безпеки, та експлуатаційних показників, яке завжди є актуальними, оскільки будь-яке внесення змін в конструкцію транспортного засобу в певній мірі відображається на його показниках активної безпеки.

Дана робота є продовженням серії досліджень [1 - 3], пов'язаних з системою електродинамічного гальмування гібридного автомобіля обладнаного системою рекуперації енергії.

Аналіз попередніх досліджень. Автомобілі, які обладнані електродвигунами, зазвичай, обладнуються системою рекуперації енергії, яка дозволяє накопичувати електричну енергію, отриману в процесі гальмування та в подальшому використовувати її для руху. Крім того використання системи рекуперації енергії в певних моментах може бути більш ефективним та доцільним, ніж застосування штатної гальмівної системи. Оскільки гальмівна система є одним з елементів активної безпеки, то це вимагає її детального дослідження та вивчення. Але система рекуперації енергії розглядається, зазвичай, лише в контексті системи накопичення енергії, а те, що вона по суті є однією з гальмівних систем автомобіля в більшості випадків залишається поза увагою науковців. Значна увага дослідженням електродинамічних процесів гальмування приділена науковцями США університету Західної Флориди [4].

Також питання дослідження гальмівних властивостей транспортних засобів під час рекуперації енергії досить активно розглядається та вивчається у сфері міського електричного транспорту та залізничного транспорту.

Однак розгляд системи рекуперації енергії з точки зору допоміжної гальмівної системи транспортного засобу потребує ще чимало зусиль для її вивчення та дослідження.

Мета роботи полягає у розробці методики визначення оптимального ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії транспортних засобів, обладнаних електроприводом та системою рекуперації енергії.

Для проведення розрахунків найбільш доцільно скористатися вхідними даними

© О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький, 2014

встановленими у нормативних документах. Так, у [5] зазначено, що під час випробувань транспортних засобів, обладнаних електроприводом та системою рекуперації енергії, доля участі електричної системи рекуперативного гальмування не повинна перевищувати мінімального рівня, гарантованого конструкцією системи. Під час проведення випробувань ця вимога вважається виконаною, якщо накопичувачі енергії мають один з нижченаведених ступенів зарядки:

- а) максимальний ступінь зарядки, рекомендований заводом-виробником;
- б) не менше 95% від повної зарядки при відсутності будь-яких конкретних рекомендацій підприємства-виробника;
- в) максимальний ступінь, який забезпечується автоматичним засобом регулювання ступеня зарядки батарей на транспортному засобі.

Необхідно зазначити, що вимоги (а) та (б) є дещо схожими, оскільки підприємством-виробником, для нормальної роботи транспортного засобу, повинно бути забезпечено оптимальний режим регулювання ступеня зарядки накопичувачів енергії.

Вибір оптимального ступеня зарядки накопичувачів енергії та, відповідно, регулювання їх ступеня зарядки, дозволить забезпечити максимально ефективну їх роботу, а на стадії проектування транспортних засобів провести більш достовірні розрахунки їх експлуатаційних показників.

Для визначення оптимального ступеня зарядки накопичувачів енергії, вихідними даними за результатами розрахунку будуть кількість енергії, яка рекуперована транспортним засобом під час гальмування та відношення цієї енергії до загальної ємності накопичувачів енергії.

В міському циклі руху транспортного засобу відбувається, зазвичай, службове гальмування. Під час цього гальмування поглинається кінетична енергія КТЗ. Якщо ж це гальмування здійснюється під час руху автомобіля на ухилі, то також необхідно врахувати і потенціальну енергію. Тоді, в загальному вигляді, кількість енергії, яка буде вивільнена під час електродинамічного гальмування та, відповідно, яка повинна бути поглинута накопичувачами енергії становитиме

$$A_{re} = \Delta E_K + \Delta E_{II} = \frac{G_a \cdot (v_n^2 - v_k^2)}{2 \cdot g} + G_a \cdot S \cdot \sin \alpha = \frac{G_a}{2} \left(\frac{(v_n^2 - v_k^2)}{g} + t \cdot \sin \alpha \cdot (v_n + v_k) \right), \quad (1)$$

де, ΔE_K – зміна кінетичної енергії транспортного засобу, Дж;

ΔE_{II} – зміна потенціальної енергії транспортного засобу, Дж;

t – час здійснення гальмування, с;

G_a – вага автомобіля, Н;

v_n – початкова швидкість транспортного засобу, м/с;

v_k – кінцева швидкість транспортного засобу, м/с;

α – кут спуску (ухилу), °;

S – шлях, який долає автомобіль під час електродинамічного гальмування, м;

g – прискорення вільного падіння, дорівнює 9,81 м/с².

Варто звернути увагу на ряд припущень та спрощень, введених у залежності (1):

– оскільки гальмування здійснюється лише за допомогою електричного двигуна, гальмівні сили механічного складника рівні 0;

– транспортний засіб рухається з відносно невеликою швидкістю, тому опором повітря можна знехтувати, тобто $P_w=0$.

Швидкість, з якої здійснюється гальмування, під час електродинамічного гальмування на етапі проектування доцільно вибирати з їздових циклів, які використовуються під час визначення паливної економічності транспортних засобів. Зважаючи на те, що після гальмування транспортний засіб в будь-якому випадку переходить у тяговий режим, то можна стверджувати, що в тяговому режимі уся накопичена енергія буде витрачена, тому ступінь зарядки накопичувачів енергії перед початком гальмування повинен бути таким, щоб можна було забезпечити поглинання усієї рекуперованої енергії. Для цього з вищенаведених їздових циклів достатньо вибрати максимальне значення швидкості. Кінцева швидкість гальмування, це значення швидкості, при якому припиняється рекуперація енергії, приймається 1,5 м/с.

Час, протягом якого здійснюється електродинамічне гальмування, можна визначити із залежності

$$t = \frac{(v_n + v_k)}{j_\tau}, \quad (2)$$

де, j_τ – сповільнення, яке розвиває транспортний засіб, під час електродинамічного гальмування. Приймається, на основі розрахункових даних та результатах випробувань, близько $1,0 \text{ м/с}^2$.

Однак, при розрахунках необхідно також враховувати зовнішні фактори, зокрема поздовжній профіль дороги. У [6] описано методику розрахунку кількісних та якісних показників поздовжнього дорожнього профілю для різних місцевостей, застосовуючи які можна досить точно розрахувати необхідний ступінь зарядки накопичувачів автомобіля.

На даний момент відмічаються тенденції автовиробників спрямовані на здешевлення гібридних та електричних транспортних засобів. Вони проявляються у виконанні автомобілів із загальною ємністю накопичувачів енергії у відповідності до вимог споживачів. Тобто з'являється можливість отримати транспортний засіб якнайбільше адаптований до реальних умов експлуатації та вимог споживача.

Спираючись на вищевикладене, з метою спрощення розрахунків варто скористатися наступними твердженнями щодо поздовжнього ухилу дороги:

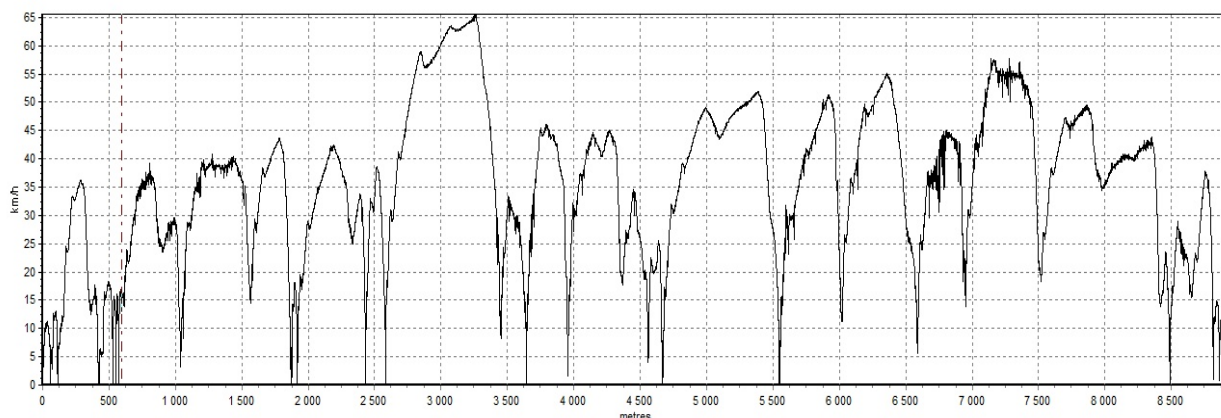
- поздовжній профіль дорожнього полотна є однаковим на усій довжині;
- розподіл спусків та підйомів за кількістю є рівномірним.

Крім того врахування поздовжнього профілю дороги необхідно проводити з розподілом умов експлуатації за типом місцевості. Можна виділити наступні типи рельєфу, з метою вибору комплектації транспортного засобу:

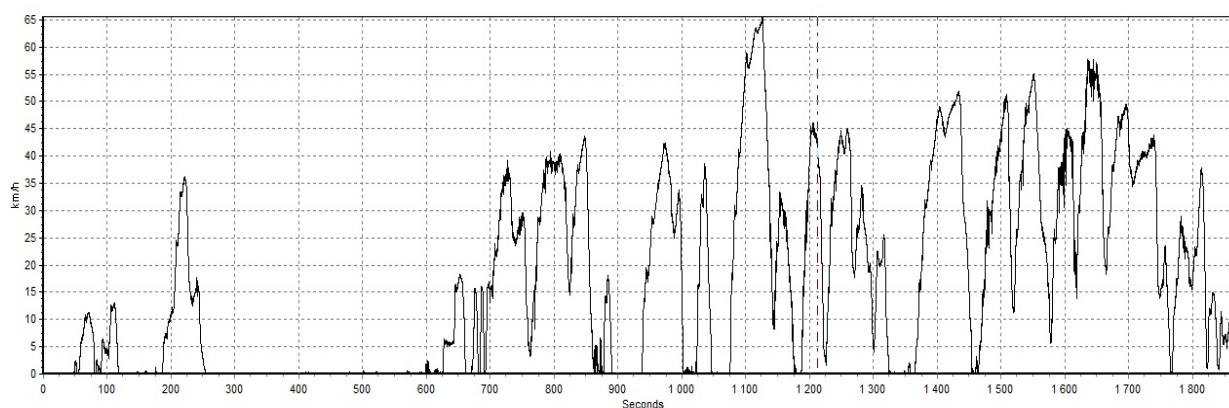
- рівнинна місцевість;
- пересічна місцевість;
- різкопересічна місцевість;
- гірська місцевість.

В даній роботі для врахування поздовжнього дорожнього профілю варто скористатися експериментальними даними, отриманими при виконанні поїздок у м. Луцьку Волинської області.

Як видно з рис. 1, а – б нижче, максимальна початкова швидкість службового гальмування становить близько 70 км/год, що і буде доцільним взяти за основу. Оскільки у Волинській області відсутні затяжні спуски, то проводити розрахунки по шляху електродинамічного гальмування є недоцільним.



а



б

Рисунок 1 – Експериментальні дані міського їздового циклу легкового автомобіля: а – зміна швидкості руху на відрізку шляху; б – зміна швидкості руху по часу

Таким чином скориставшись залежністю (1), з врахуванням вищенаведених положень, можна визначити максимальну кількість енергії, яка може бути вироблена транспортним засобом під час електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії.

Кількість енергії, яку можуть сприйняти накопичувачі енергії, або максимальна ємність накопичувачів енергії, розрахована виходячи з тягово-швидкісних властивостей транспортних засобів [3] буде рівна $A_n = 5,18 \cdot 10^6$ Дж.

Отож враховуючи залежність (1) та маючи значення максимальної ємності накопичувачів енергії можна встановити, що оптимальний ступінь зарядки накопичувачів енергії транспортних засобів, обладнаних електроприводом та системою рекуперації енергії буде рівний

$$k = 1 - \frac{A_{\tau e}}{A_n}, \quad (4)$$

де A_z – максимальний ступінь зарядки накопичувачів енергії після їх зарядки, у/ нормальних умовах експлуатації.

Нижче у табл. 1 наведено розрахунок ступеня зарядки накопичувачів енергії, який може бути рекомендований підприємством виробником, як максимальний, з метою

проведення випробувань на відповідність доповнення 1 Додатку 3 [5] транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії.

Таблиця 1 – Результати розрахунку ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії транспортного засобу

| Найменування параметру | Позначення | Одиниці вимірювання | Фактичні дані та/або результати розрахунків |
|---|------------|---------------------|---|
| Вхідні дані | | | |
| Маса автомобіля | m_a | кг | 550 |
| Кут ухилу | α | ° (%) | 0 (0) |
| Початкова швидкість руху | $v_{п}$ | м/с | 19 |
| Кінцева швидкість руху | $v_{к}$ | м/с | 1,5 |
| Час гальмування | t | с | 15 |
| Вихідні дані | | | |
| Енергія, яку повинні сприйняти накопичувачі | $A_{те}$ | Дж | $0,1 \cdot 10^6$ |
| Енергія, яку можуть сприйняти накопичувачі | A_n | Дж | $5,18 \cdot 10^6$ |
| Ступінь зарядки накопичувачів енергії | k | - | 0,981 |

Таким чином розрахований ступінь зарядки накопичувачів енергії становить 0,981. Тобто для забезпечення можливості поглинання рекуперованої енергії, яка може бути вивільнена під час руху гібридного транспортного засобу, у міському циклі на рівнинній місцевості, необхідно забезпечити максимальну зарядку накопичувачів енергії на рівні 98,1 %.

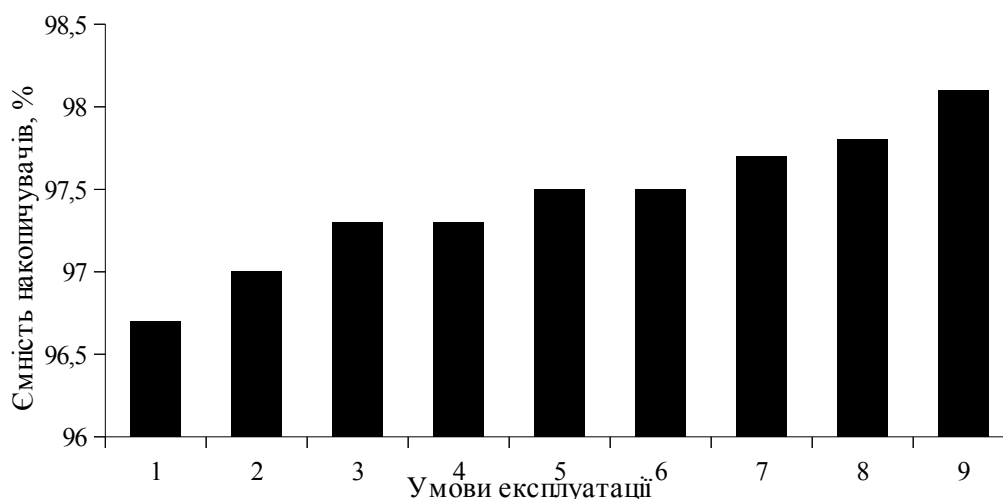


Рисунок 2 – Залежність початкового стану накопичувачів енергії від різних умов експлуатації енергії: 1 – при $\alpha = 5^\circ$; 2 – при $\alpha = 4^\circ$; 3 – при $\alpha = 3^\circ$; 4 – при $t = 40$ с; 5 – при $\alpha = 2^\circ$; 6 – при $t = 30$ с; 7 – при $t = 20$ с; 8 – при $\alpha = 1^\circ$; 9 – при $\alpha = 0^\circ$. Інші параметри – згідно таблиці 2

За описаною методикою можливо здійснювати як розрахунки необхідної ємності накопичувачів енергії для конкретних умов експлуатації транспортного засобу, так і під час регулювання їх ємності на самому транспортному засобі. Це дасть змогу забезпечити максимальну акумуляцію рекуперованої енергії.

На рисунку 2, в якості прикладу, наведено розрахунок ступеня зарядки накопичувачів енергії для різних умов експлуатації транспортного засобу.

Отож, як видно з рис. 2 за певних умов експлуатації (збільшення швидкісного режиму, гірська місцевість) початковий ступінь зарядки накопичувачів енергії повинен бути меншим, оскільки під час електродинамічного гальмування буде вивільнятися значно більше енергії. Одночасно необхідно зазначити, що при цьому буде зменшено запас тяги транспортного засобу на електротязі без електрогальмування. Тому найбільш доцільним буде впровадження алгоритму роботи системи управління електродинамічним гальмуванням, з тим, щоб відбувалося регулювання початкового ступеня зарядки накопичувачів енергії залежно від конкретних умов експлуатації.

Висновки. В результаті теоретичних досліджень:

- розроблено методологію розрахунку оптимального ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії;

- проведено попередній розрахунок ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою для конкретних умов експлуатації;

- проведено дослідження впливу істотних умов експлуатації на ступінь початкової зарядки накопичувачів енергії.

Отримані результати можуть бути застосовані:

- для подальшого дослідження процесів електродинамічного гальмування транспортних засобів та накопичення вивільненої енергії;

- для обґрунтування підприємствами-виробниками ступеня зарядки накопичувачів енергії під час проведення випробувань на відповідність вимогам Правил ЄЕК ООН 13-Н [5];

- для створення алгоритму роботи системи управління рекуперацією енергії транспортного з метою оптимізації тягово-швидкісних показників та показників паливної економічності.

Список літератури: 1. *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. 2. *Дембіцький В.М.* Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / *В.М. Дембіцький* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 29 (1002). – С. 28–33. 3. *Сітовський О.П.* Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на затяжних спусках / *Сітовський О. П., Дембіцький В. М.* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 30 (1003). – С. 10–15. 4. *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. **5.** 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. **6.** *Безбородова Г.Б.* Моделирование движения автомобиля / *Г.Б. Безбородова, В.Г. Галушко.* - К.: Вища школа, 1978. - 168 с.

Надійшла до редколегії 18.03.2014

УДК 629.017

Методика визначення оптимального ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії транспортних засобів / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 8 (1051). – С. 54-60. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-6840.

Предложена методика определения оптимальной степени начальной зарядки накопителей энергии транспортных средств, оборудованных электродвигателями и системой рекуперации энергии. Методика может применяться на этапе проектирования, производства и во время проведения испытаний транспортных средств, а также в алгоритме работы их системы управления рекуперацией энергии. Проведено исследование степени начальной зарядки накопителей энергии в зависимости от условий эксплуатации транспортного средства.

Ключевые слова: зарядка, степень, рекуперация, электроторможение, накопители энергии, количество энергии, условия эксплуатации.

Methods of the determination optimum degree initial charging the drives to energy of the transport facilities / O.F. Sitovsky, V.N. Dembickiy // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and tractorbuilding. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 8 (1051). – P. 54-60. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-6840.

The methodology of determination of optimal level of primary charging of the energy accumulators of the vehicles equipped with the electrical engines and systems of energy recuperation was propounded. The presented methodology can be used while designing, manufacturing and vehicles testing, and in the scheme of the work of their energy recuperation control system. The investigation of the primary charging level of the energy accumulators depending on the vehicles service conditions was done.

Key words: charging, level, recuperation, electrical braking, energy accumulators, quantity of energy, service conditions.