

УДК 629.3.017.5

О. П. СІТОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц. Луцького НТУ;
В. М. ДЕМБІЦЬКИЙ, аспірант Луцького НТУ

**ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ПРОЦЕСУ
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ПІД ЧАС РУХУ ГІБРИДНОГО
ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА ЗАТЯЖНИХ СПУСКАХ**

В результаті проведених досліджень отримано рівняння руху транспортного засобу під час здійснення електричного гальмування на зтяжному спуску, досліджено вплив конструктивних показників транспортного засобу з гібридною силовою установкою на процес електродинамічного гальмування, визначено та обгрунтовано критерії попередньої оцінки відповідності автомобілів з гібридною силовою установкою, вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 в частині випробувань тип "ПА".

Ключові слова: електродинамічне гальмування, потужність, зтяжний спуск, енергія, сила струму.

Вступ. На сучасному етапі розвитку автомобільної галузі значні зусилля докладаються в напрямку підвищення економічності, зниження токсичності відпрацьованих газів та переходу до альтернативних видів палив. В результаті з'являються нові конструкції автомобілів, модернізуються існуючі. Тому питання безпеки, експлуатаційних показників завжди є актуальними, оскільки будь-яке внесення змін в конструкцію транспортного засобу в певній мірі відображається на його експлуатаційних властивостях.

Дана робота є продовженням серії досліджень [1, 2] пов'язаних з гальмівними властивостями гібридного автомобіля обладнаного системою рекуперації енергії.

Аналіз попередніх досліджень. Аналіз джерел свідчить про те, що основна маса досліджень останніх двох десятиліть спрямована:

- щодо теорії гальмування на вдосконалення, оптимізацію процесів гальмування та покращення конструкції гальмівних систем автомобілів;
- щодо гібридних транспортних засобів на розробку, вдосконалення систем управління, дослідження їх роботи, підвищення ефективності, а також підвищення їх економічності за рахунок застосування електричних рушіїв.

Однак питання дослідження гальмівних властивостей транспортних засобів під час рекуперації енергії досить активно розглядається та вивчається у сфері міського електричного транспорту, залізничного транспорту та у різноманітних як стаціонарних так і пересувних машинах, механізмах. Питання ж застосування системи електродинамічного гальмування в якості допоміжної гальмівної системи поведінки транспортного не розглядалося, оскільки установка допоміжної гальмівної системи на легкових автомобіля не є обов'язковою та не практикується. Однак в гібридних транспортних засобах це питання є досить актуальним, адже з'являється можливість суттєво поповнити запас енергії. Крім того в даному питанні також наявні аспекти безпеки транспортного засобу.

Метою даної роботи є математичне моделювання процесу електричного гальмування макету колісного транспортного засобу з гібридною силовою установкою на зтяжних спусках.

Рух автомобіля під час гальмування описується рівнянням тягового балансу автомобіля [3], з врахуванням режимів руху на спуску значення сили опору підйому P_h враховано зі знаком "мінус":

© О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький, 2013

$$P_w + P_f + P_\tau - P_h - P_j = 0, \quad (1)$$

де P_j – сила інерції автомобіля;

P_w – сила опору повітря;

$P_\tau = P_{\tau 1} + P_{\tau 2} + P_{\tau e}$ – гальмівна сила автомобіля;

$P_{\tau 1}, P_{\tau 2}, P_{\tau e}$ – гальмівна сила відповідно передньої, задньої осей та електричного складника гальмівної системи;

P_h – сила опору підйому;

$P_f = P_{f1} + P_{f2}$ – сила опору кочення;

P_{f1}, P_{f2} – сила опору кочення відповідно передньої та задньої осей.

Після визначення сил, рівняння (1) прийме вигляд:

$$k \cdot F \cdot (V \pm V_\theta)^2 + G_a \cdot f \cdot \cos \alpha + \frac{M_{\tau e} \cdot u_{mp}}{r_k \cdot \eta_{mp}} - G_a \cdot \sin \alpha - \frac{G_a \cdot j \cdot \delta_{об}}{g} + P_\tau = 0, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт обтічності транспортного засобу;

F – площа лобового опору транспортного засобу;

V – швидкість транспортного засобу;

V_θ – швидкість вітру, при чому, знак “+” ставиться при зустрічному вітрі, “-” – при попутному;

$G_a = \text{const}$ – вага автомобіля;

f – коефіцієнт опору кочення автомобіля;

α – кут підйому (спуску);

j – сповільнення автомобіля;

$M_{\tau e}$ – гальмівний момент електричного двигуна в режимі генератора;

u_t, η_t – передатне число і коефіцієнт корисної дії трансмісії;

r_k – радіус кочення колеса;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$\delta_{об}$ – коефіцієнт врахування обертових мас.

Згідно вимог Правил ЄЕК ООН № 13 для допоміжної гальмівної системи, під час випробувань тип “ПА” – “Випробування навантажених транспортних засобів повинне проводитися таким чином, щоб енергія, що поглинається, була еквівалентна енергії, яка вивільнюється за той самий проміжок часу під час руху навантаженого транспортного засобу з середньою швидкістю 30 км/год по спуску з ухилом 7% на відстані 6 кілометрів.”

Враховуючи вищевикладені вимоги можна зробити певні припущення та спрощення:

- оскільки гальмування здійснюється лише за допомогою електричного двигуна, гальмівні сили механічного складника рівні $P_\tau=0$;
- транспортний засіб рухається з відносно невеликою швидкістю, тому опором повітря можна знехтувати, тобто $P_w=0$;
- так як рух автомобіля здійснюється з постійною швидкістю, сповільнення j та відповідно сила інерції P_j транспортного засобу рівні нулю.

З врахуванням припущень та спрощень рівняння (2) прийме вигляд:

$$G_a \cdot f \cdot \cos \alpha + \frac{M_{\tau e} \cdot u_{mp}}{r_k \cdot \eta_{mp}} - G_a \cdot \sin \alpha = 0, \quad (3)$$

Звідси можна отримати значення гальмівного моменту електродвигуна:

$$M_{\tau e} = \frac{G_a \cdot r_k \cdot \eta_{mp}}{u_{mp}} \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (4)$$

Оскільки в даному випадку розглядаються гальмівні випробування типу “ПА”, то рівняння (4) можна записати більш спрощено, підставивши відомі величини:

$$M_{\tau e} = 0.05 \frac{G_a \cdot r_k}{u_t}, \quad (5)$$

Під час здійснення гальмування на затяжному спуску з урахуванням (3), необхідна потужність, яку мають сприйняти накопичувачі енергії:

$$N_{\tau e} = G_a \cdot v \cdot \eta_t \cdot \eta_e \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (6)$$

де η_e – коефіцієнт корисної дії електродвигуна.

З іншої сторони потужність електродвигуна визначається його технічними характеристиками:

$$N_{\tau e} = U \cdot I \cdot \eta_e \quad (7)$$

де U – робоча напруга електросистеми;

I – сила струму;

З рівнянь (6) та (7) можна визначити значення сили струму, яка виникатиме в системі під час електричного гальмування на спуску:

$$I = \frac{G_a \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_e}{U} \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (8)$$

Після спрощень, прийнятих у рівнянні (3), з врахуванням вимог Правил ЄКЕ ООН № 13 можна записати наступну залежність:

$$I = 3.2 \frac{m_a}{U} \text{ А}, \quad (9)$$

де m_a – маса автомобіля, кг.

Рівнянні (9) описує процес електродинамічного гальмування гібридного автомобіля під час випробувань тип “ПА”, згідно вимог Правил ЄКЕ ООН № 13.

Кількість енергії, яка буде вивільнена під час електродинамічного гальмування та, відповідно, яка повинна бути поглинута накопичувачами енергії:

$$A_{\tau} = N \cdot t, \quad (10)$$

де t – час здійснення гальмування.

Враховуючи вимоги Правил ЄКЕ ООН № 13

$$t = \frac{S}{V} = \frac{6000 \cdot 3.6}{30} = 720 \text{ с.}$$

Для гальмівних випробувань тип “ПА”:

$$A_{\tau} = N \cdot 720$$

Кількість енергії, яку можуть сприйняти накопичувачі енергії буде рівна:

$$A_n = U \cdot I \cdot C, \quad (11)$$

де C – ємність накопичувачів енергії.

Таким чином для можливості застосування електричного складника гальмівної системи в якості допоміжної системи (системи сповільнення без гальм) необхідно, щоб:

$$A_n > A_t \quad (12)$$

За наведеними залежностями (6)...(11) проведено розрахунки для макету легкового автомобіля з гібридною силовою установкою, виготовленого в Луцькому НТУ. Результати розрахунків наведено у табл.

Таблиця – Встановлення відповідності характеристик автомобіля вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 (випробування тип “ІА”) під час електродинамічного гальмування

Найменування параметру	Позначення	Одиниці вимірювання	Фактичні дані ²	Результати розрахунків	Відповідність вимогам Правил ЄЕК ООН № 13
Маса автомобіля	m_a	кг	550	-	Н/Р
Кут ухилу	α	° (%)	4 (7)	-	Відповідає ¹
Довжина спуску	s	м	6000	-	Відповідає ¹
Робоча напруга	U	В	48	-	Н/Р ³
Швидкість руху	v	км/год	30	-	Відповідає ¹
ККД трансмісії	η_t	-	0,9	-	Н/Р ³
ККД ел.двигуна	η_e	-	0,8	-	Н/Р ³
Потужність електродвигуна	$N_{те}$	Вт	4800	1780	Відповідає за рівнянням (6)
Сила струму під час гальмування	I	А	90	37	Відповідає за рівнянням (8)
Енергія, яку повинні прийняти накопичувачі	A_t	Дж	-	$1,28 \cdot 10^6$	Відповідає за рівнянням (12)
Енергія, яку можуть прийняти накопичувачі	A_n	Дж	-	$5,18 \cdot 10^6$	Відповідає за рівнянням (12)
Примітки: ¹ – відповідає вимогам нормативного документу щодо вихідних даних, прийнятих для розрахунку; ² – дані встановлені та/або допустимі конструкцією транспортного засобу або прийняті значення для розрахунків; ³ – не регламентовано.					

Таким чином за результатами проведених розрахунків можна констатувати, що конструкція макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою за своїми характеристиками може задовольняти вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 (випробування тип “ІА”). Конструктивний запас по силі струму становить 2, а запас по ємності акумуляторних батарей – 4. Електричний складник гальмівної системи може розглядатися в якості допоміжної гальмівної системи (системи сповільнення без гальм) під час проведення натурних випробувань.

За рівняннями, наведеними вище, можна визначити характер залежності показників, які характеризують процес електродинамічного гальмування на зтяжному спуску.

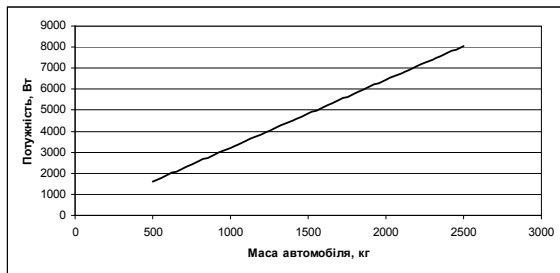


Рисунок 1 – Характер зміни потужності залежно від маси транспортного засобу під час електричного гальмування на зтяжному спуску

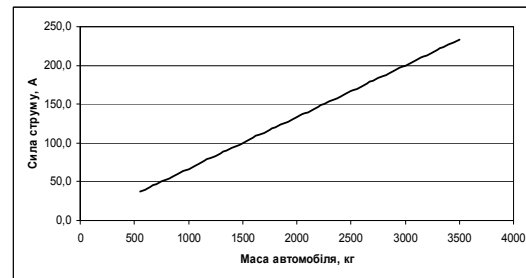


Рисунок 2 – Характер зміни сили струму залежно від маси транспортного засобу під час електричного гальмування на зтяжному спуску

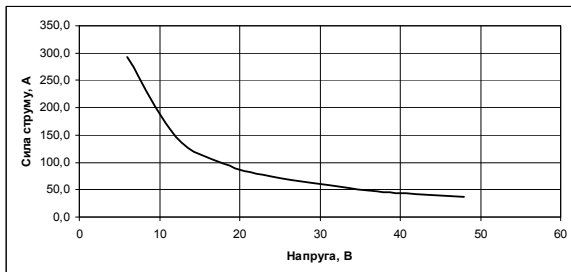


Рисунок 3 – Залежність сили струму від величини робочої напруги накопичувачів енергії під час електродинамічного гальмування на зтяжному спуску

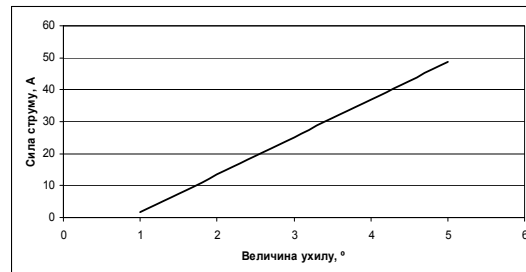


Рисунок 4 – Залежність сили струму від величини ухилу під час електродинамічного гальмування на зтяжному спуску

Як видно з рисунків 1 та 2 характер залежностей сили струму та потужності від маси транспортного засобу є ідентичним. Однак зважаючи на те, що під час електродинамічного гальмування, крім електродвигуна, який працює в режимі генератора, приймають участь накопичувачі енергії, електричні кабелі та інше устаткування, з точки зору електробезпеки, необхідно щоб параметри усіх зазначених систем перебували вище ліній графіків 1 та 2.

На рисунку 3 наведено зміну сили струму при різних величинах ухилів. З даного графіка видно, що для оцінювання гальмівних властивостей гібридного автомобіля на відповідність вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 достатнім є оцінювання за силою струму, однак з огляду на те, що у реальних умовах експлуатації ухил дороги може перевищувати 7%, і, відповідно сила струму буде збільшуватися на цих спусках, необхідно провести додаткові дослідження щодо встановлення величини запасу або коефіцієнту запасу по силі струму.

Оскільки сила струму напряму залежить від величини робочої напруги силової установки та накопичувачів енергії, на стадії проектування та конструювання, можна скористатися залежністю, наведеною на рисунку 4 для визначення та підбору оптимальних показників.

Таким чином за результатами дослідження можна встановити критерії для попередньої оцінки системи електродинамічного гальмування транспортного засобу стосовно її відповідності вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 в частині випробувань тип "ПА".

Під час попередньої оцінки, повинна бути встановлена відповідність наступних конструктивних показників транспортного засобу:

- потужність електродвигуна в режимі генератора;
- виконання електричних кабелів для роботи при розрахованій силі струму;
- виконання накопичувачів енергії для роботи при розрахованій силі струму;
- достатність ємності накопичувачів енергії.

Висновки. В результаті теоретичних досліджень:

- отримано рівняння руху транспортного засобу під час здійснення електричного гальмування на зтяжному спуску;
- досліджено вплив конструктивних показників транспортного засобу з гібридною силовою установкою на процес електродинамічного гальмування;
- проведено попередню оцінку відповідності макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою, виготовленого в Луцькому НТУ, вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 в частині випробувань тип “ІА”;
- визначено та обґрунтовано критерії попередньої оцінки відповідності автомобілів з гібридною силовою установкою, вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 в частині випробувань тип “ІА”.

Отримані результати можуть бути застосовані:

- для подальшого дослідження процесів електродинамічного гальмування транспортних засобів;
- для попередньої оцінки автомобілів вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 в частині випробувань тип “ІА”, з метою встановлення можливості застосування електродинамічного гальмування в якості допоміжної гальмівної системи.

З метою оцінювання відповідності математичної моделі в подальшому необхідно провести гальмівні випробування тип “ІА” або “І” системи електродинамічного гальмування автомобіля на відповідність вимогам Правил ЄЕК ООН № 13.

Список літератури: 1. *Сітовський О.П., Дембіцький В.М.* Математичне моделювання процесу електричного гальмування макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою // Вісник СевНТУ. Вип. 135. – Севастополь: СевНТУ, 2012. С. 73 – 75. 2. *Дембіцький В.М.* Вибір компоновальної схеми гібридного автомобіля та визначення режимів його руху // Наукові нотатки. Вип. 37. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. С. 75 – 81. 3. *Іванов В.В.* Основы теории автомобиля и трактора: учебное пособие для механических специальностей вузов / [В. В. Иванов, В. А. Иларионов, М. М. Морин]. — М. : «Высшая школа», 1970. — 224 с. 4. Єдині технічні приписи щодо офіційного схвалення типу транспортних засобів категорій М N та O стосовно гальмування: Правила ЄЕК ООН № 13. - [Чинні від 14.01.2008]. – Женева.: Європейська Економічна Комісія Організації Об’єднаних націй, 2008. – 276 с.

Надійшла до редколегії 10.05.2013

УДК 629.3.017.5

Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на зтяжних спусках / Сітовський О. П., Дембіцький В. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 30 (1003). – С. 10–15. – Бібліогр.: 4 назв.

В результате проведенных исследований получено уравнение движения транспортного средства во время осуществления электрического торможения на зтяжном спуске, исследовано влияние конструктивных параметров транспортного средства с гибридной силовой установкой на процесс электродинамического торможения, определены и обоснованы критерии предварительной оценки соответствия автомобилей с гибридной силовой установкой, требованиям Правил ЕЭК ООН № 13 в части испытанный тип "ІА".

Ключевые слова: электродинамическое торможение, мощность, зтяжной спуск, энергия, сила тока.

The research resulted in an equation of motion of the vehicle at the time of the electric braking on a long downhill, investigated the influence of of design parameters of the vehicle with a hybrid propulsion system for electrodynamic braking process, identified and justified criteria for the preliminary assessment of conformity with the hybrid vehicle propulsion system, the requirements of Regulation number 13 in the type of test "ІА".
Keywords: electrodynamic braking, power, downhill, the energy, the power supply.

Keywords: electrodynamic braking, power, protracted lowering, energy, strength of current.