

УДК 629.017

## ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ ГІБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА ДОРОГАХ З НИЗЬКИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ЗЧЕПЛЕННЯ

О.П. Сітовський, доцент, к.т.н., Луцький національний технічний університет  
В.М. Дембіцький, завідувач лабораторії, Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства, м. Київ

*Анотація.* Проведено теоретичні дослідження процесів електродинамічного гальмування автомобіля з гібридною силовою установкою на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення, доведено імовірність виникнення блокування коліс і, відповідно, юзу автомобіля під час електродинамічного гальмування.

*Ключові слова:* електродинамічне гальмування, гальмівна сила, коефіцієнт зчеплення, блокування коліс.

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ДОРОГАХ С НИЗКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СЦЕПЛЕНИЯ

О.Ф. Ситовский, доцент, к.т.н., Луцкий национальный технический университет,  
В.М. Дембицкий, заведующий лабораторией, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт городского хозяйства, г. Киев

*Аннотация.* Проведены теоретические исследования процессов электродинамического торможения автомобиля с гибридной силовой установкой на дорогах с низким коэффициентом сцепления, доказана вероятность возникновения блокировки колёс автомобиля во время электродинамического торможения.

*Ключевые слова:* электродинамическое торможение, тормозная сила, коэффициент сцепления, блокировка колёс.

## ELECTRICAL AND DYNAMIC BRAKING OF THE HYBRID VEHICLE ON THE ROADS WITH LOW COUPLING COEFFICIENT

O. Sitovskiy, Associate Professor, Candidate of Technical Science,  
Lutsk National Technical University, V. Dembitskyj, State enterprise  
«Scientific, research, design and technology Institute of Municipal Economy», Kyiv

*Abstract.* There were carried out theoretical researches of the processes of the electrical and dynamic braking of the vehicle with hybrid power-plant on the roads with low coupling coefficient, it was proved the probability of the wheels blocking appearing, during electrical and dynamic braking.

*Key words:* electrical and dynamic braking, braking power, coupling coefficient, wheels blocking.

### Вступ

Сучасний розвиток автомобілебудування спрямований на досягнення максимального економічного ефекту, зменшення викидів у навколишнє середовище. Результатом роботи

автомобілебудівників та науковців у даному напрямку став розвиток електричних та гібридних транспортних засобів. Поява нових конструкцій, систем та технологій приводить до необхідності їх досліджень як зі сторони практичності та економічності, так і зі сторо-

ни безпеки. Значна кількість електричних та гібридних транспортних засобів обладнується системами рекуперації енергії. По суті це є елементом гальмівної системи автомобіля.

Дана робота є продовженням серії досліджень [1, 2, 4, 5], пов'язаних з гальмівними властивостями гібридного автомобіля, обладнаного системою рекуперації енергії.

### Аналіз публікацій

Теорія автомобільних властивостей на сьогодні досить швидко доповнюється дослідженнями електричних та гібридних транспортних засобів. Але система рекуперації енергії розглядається 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. Значну увагу приділено дослідженням електродинамічних процесів гальмування науковцями США університету Західної Флориди [6].

Також 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.

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

### Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є теоретичне дослідження процесів електродинамічного гальмування макета колісного транспортного засобу з гібридною силовою установкою на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення.

Усі сучасні автомобілі обладнуються антиблокувальними системами, які під час гальмування, контролюючи процес, запобігають блокуванню коліс та юзу автомобіля. Антиблокувальні системи пов'язані з гальмівною системою та приводяться в дію лише під час гальмування механічними гальмами. Крім того, автомобілі також обладнуються системами безпеки, такими як система курсової стійкості, протипробуксовувальна система і

т.п. Суть даної роботи полягає у дослідженні питання імовірності виникнення юзу автомобіля під час електродинамічного гальмування без застосування механічної гальмівної системи.

### Електродинамічне гальмування

З теорії автомобільних властивостей відомо, що блокування коліс транспортного засобу відбувається за умови, коли гальмівна сила  $P_{te}$  перевищує силу зчеплення коліс з дорогою  $P_{\phi}$ , тобто

$$P_{te} > P_{\phi}. \quad (1)$$

Зважаючи на те, що в даному випадку розглядається лише процес електродинамічного гальмування, гальмівна сила буде рівною

$$P_{te} = \frac{M_{te} \cdot u_t}{r_k \cdot \eta_t}, \quad (2)$$

де  $M_{te}$  – гальмівний момент електричного двигуна в режимі генератора, Нм;  $u_t$  – передатне число трансмісії;  $r_k$  – радіус кочення колеса, м;  $\eta_t$  – коефіцієнт корисної дії трансмісії.

Сила зчеплення коліс з дорогою визначається

$$P_{\phi} = \phi \cdot R_Z,$$

де  $\phi$  – коефіцієнт зчеплення;  $R_Z$  – нормальна реакція дороги на колесо, Н.

Для автомобіля, який перебуває у нерухомих стані на горизонтальній опорній поверхні, нормальні реакції дороги на колесо є рівними частині маси транспортного засобу, яка припадає на це колесо [3]. Однак у випадку динамічного стану автомобіля відбувається перерозподіл мас, і тоді значення нормальної реакції дороги на колесо розраховується з урахуванням коефіцієнта зміни реакцій  $m_Z$

$$P_{\phi} = \phi \cdot G_i \cdot m_Z,$$

де  $G_i$  – вага автомобіля, яка передається опорній поверхні через  $i$ -те колесо або вісь.

Під час гальмування транспортного засобу значення коефіцієнтів зміни нормальних реакцій дороги на колесо перебувають у межах

[3]: для передньої осі  $m_{z1} = 1,2-1,35$ ; для задньої осі  $m_{z2} = 0,65-0,70$ . Зважаючи на те, що процес гальмування відбувається зі сповільненням до  $1,0-1,5$  м/с<sup>2</sup> на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення, коефіцієнти зміни нормальних реакції дороги перебуватимуть в межах: для передньої осі  $m_{z1} = 1,03-1,08$ ; для задньої осі  $m_{z2} = 0,93-0,98$ . Таким чином на основі вищевказаного, враховуючи, що електродинамічне гальмування забезпечує лише задня вісь транспортного засобу, нехтуючи силою опору підйому та вважаючи, що транспортний засіб перебуває на горизонтальній ділянці дороги, нерівність (1) набуде вигляду

$$P_{\tau e} = \frac{M_{\tau e} \cdot u_t \cdot \eta_t}{r_k} > \varphi \cdot G_2 \cdot m_{z2}. \quad (3)$$

Під час службового гальмування на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення  $\varphi$  приймається коефіцієнт зміни нормальних реакцій дороги на колеса для задньої осі  $m_{z2} = 0,95$ .

Тоді сила зчеплення коліс з дорогою  $P_{\varphi}$ , за різних коефіцієнтів зчеплення, буде дорівнювати значенням, вказаним у табл. 1.

Таблиця 1 Значення сили зчеплення коліс з дорогою  $P_{\varphi}$  за різних коефіцієнтів зчеплення

Коефіцієнт зчеплення, $\varphi$	Сила зчеплення коліс з дорогою $P_{\varphi}$ , Н
0,1	300
0,2	610
0,3	920

Як електродвигун у макеті гібридного автомобіля використано генератор Г-290, який під час службового гальмування працюватиме у своєму штатному режимі. Фазні обмотки статора генератора виконані з проводу типу ПЕВП перерізом  $1,95 \times 4,4$  мм. Це дає можливість короткостроково збільшувати силу струму генератора. Тому для підвищення гальмівної потужності під час гальмування сила струму  $I$  може бути збільшена до 300 А, протягом 5–10 с, при обертах генератора до  $5500$  хв<sup>-1</sup>. Залежність сили струму від обертів двигуна наведено на рис. 1.

З урахуванням передатного числа головної передачі  $u_0=3,3$  для існуючої трансмісії обер-

ти ротора генератора  $n_{ген}$  та струм будуть достатньо низькими для забезпечення ефективного процесу гальмування.

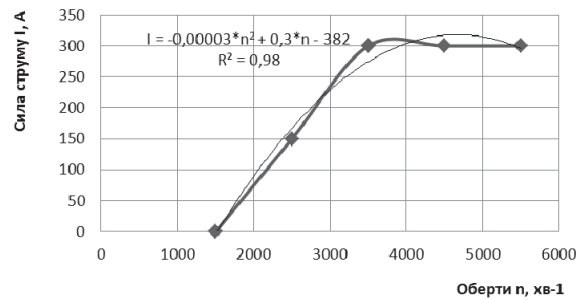


Рис. 1. Залежність сили струму від обертів

Для підвищення сили струму, з метою досягнення певної ефективності службового гальмування до швидкості 5 м/с, необхідно збільшити передатне число трансмісії до  $u_0=8,164$ . Залежність сили струму генератора від швидкості наведено на рис. 2. Крім того, зроблено додаткові розрахунки для головної передачі  $u_0=10,0$ .

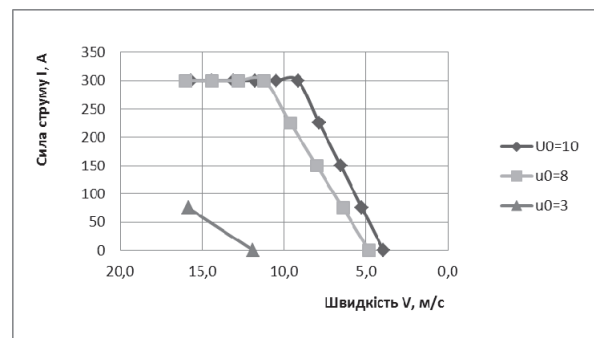


Рис. 2. Характер зміни сили струму залежно від швидкості руху транспортного засобу в режимі електродинамічного гальмування

Під час службового гальмування з рекуперацією енергії передбачається, що потужність, яка виробляється генератором, дорівнює потужності, яка затрачується при гальмуванні

$$N_e \cdot \eta_e = N_{\tau e} \cdot \eta_{\tau p}, \quad (4)$$

де  $N_e = U \cdot I$  – потужність, яка виробляється генератором;  $N_{\tau} = P_{\tau e} \cdot V$  – потужність, яка затрачується при гальмуванні;  $U$  – напруга генератора, В;  $I$  – сила струму генератора, А;  $P_{\tau e}$  – гальмівна сила при службовому гальмуванні, Н;  $V$  – швидкість транспортного засобу при гальмуванні, м/с;  $\eta_e$  – електричний кое-

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

З урахуванням викладених залежностей гальмівна сила  $P_{\text{те}}$  при службовому гальмуванні з рекуперацією енергії дорівнює

$$P_{\text{те}} = \frac{U \cdot I}{V \cdot \eta_e \cdot \eta_{\text{тр}}}. \quad (5)$$

Якщо вираз (5) привести до залежності від швидкості, то він набуде вигляду

$$P_{\text{те}} = \frac{U \cdot (-0,00003 \cdot n^2 + 0,3 \cdot n - 382)}{V \cdot \eta_e \cdot \eta_{\text{тр}}}, \quad (6)$$

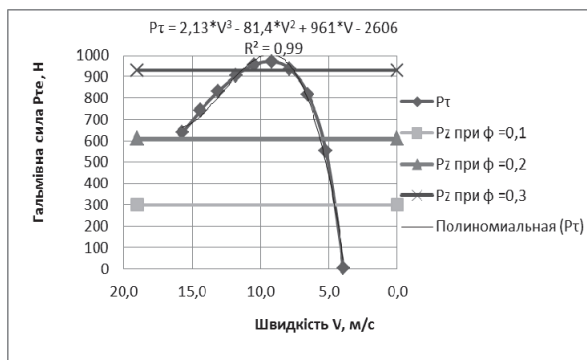
де  $n = \frac{30 \cdot V \cdot u_0}{\pi \cdot r_k}$  – приведені оберти ротора генератора,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $u_0$  – передатне число головної передачі.

Результати розрахунків залежності гальмівної сили  $P_{\text{те}}$  від швидкості макета транспортного засобу за різних значень передатного числа головної передачі наведені на рис. 3 (а, б, в).

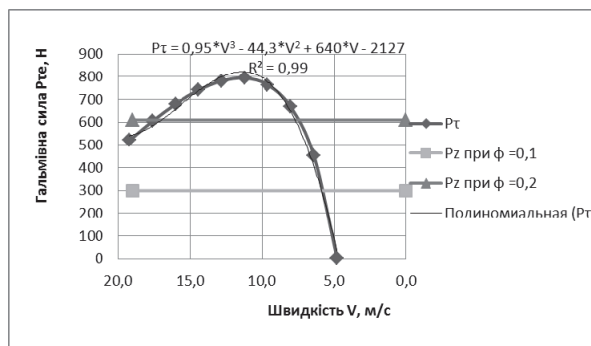
Також на цих графіках наведено значення сили зчеплення коліс з дорогою за різних значень коефіцієнтів зчеплення. При передатному числі  $u_0=3,3$  гальмівна сила  $P_{\text{те}}$  буде меншою від сили зчеплення навіть на обледенілій дорозі за коефіцієнта зчеплення  $\phi=0,1$ . За збільшення передатного числа  $u_0$  до 8,164 максимальна гальмівна сила  $P_{\text{те}}$  зростає до 800 Н, що може викликати блокування коліс на дорожньому покритті з коефіцієнтом зчеплення  $\phi=0,2$ .

Але під час гальмування з рекуперацією енергії повного блокування коліс не виникає. Це пояснюється тим, що при початку проковзування гальмуючого колеса зменшується його кутова швидкість і швидкість обертання ротора генератора. Це призводить до зменшення потужності генератора і, відповідно, гальмівної сили  $P_{\text{те}}$ , і, як наслідок, колесо не буде блокуватися повністю.

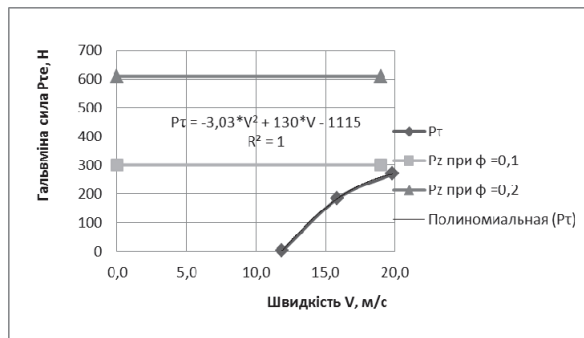
Крім того, на макеті автомобіля з гібридною силовою установкою і рекуперацією енергії має бути встановлена система контролю обертання коліс при гальмуванні.



а



б



в

Рис. 3. Залежності гальмівної сили  $P_{\text{те}}$  від швидкості макета транспортного засобу за різних значень передатного числа головної передачі: а –  $u_0=10,0$ ; б –  $u_0=8,164$ ; в –  $u_0=3,3$

Суть її роботи буде зводитися до зменшення струму збудження на обмотку ротора і зменшення потужності генератора, а відповідно, і гальмівної сили, за значного зменшення кутової швидкості коліс транспортного засобу.

За збільшення передатного числа до  $u_0=10,0$  зростає гальмівна сила  $P_{ге}$  до 1000 Н, мінімальна швидкість, за якої припиняється електрогальмування, зменшується до 4 м/с. Однак при цьому обов'язковою умовою є наявність системи контролю блокування коліс.

Зважаючи на досить складні процеси, які відбуваються під час електрогальмування, антиблокувальні властивості в цьому випадку вимагають детальних досліджень, а також встановлення критеріїв оцінки ефективності системи електричного гальмування щодо цих властивостей та методики їх оцінки.

У табл. 2 наведено значення коефіцієнтів зчеплення для різних дорожніх покриттів та метеорологічних умов.

Як видно з табл. 2, досить частими є випадки, зважаючи на сучасний стан дорожніх покриттів, з наявною тенденцією до укладання бруківок у центральних частинах міст, коли коефіцієнт зчеплення з тих чи інших причин буде досить невисоким, і цей факт різко збільшує ймовірність виникнення блокування коліс на гібридних та електричних автомобілях, обладнаних системою рекуперації енергії.

Тому питання дослідження властивостей систем електродинамічного гальмування на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення є досить актуальним.

Таблиця 2 Значення коефіцієнтів зчеплення коліс із дорогою [3]

Покриття дороги	Коефіцієнт зчеплення	Покриття дороги	Коефіцієнт зчеплення
Асфальтобетон, цементобетон сухий	0,7–0,8	Асфальтобетон, цементобетон обледенілий	0,09–0,10
Асфальтобетон, цементобетон мокрий	0,35–0,45	Пісок сухий	0,2–0,3
Щебінь сухий	0,6–0,7	Пісок вологий	0,4–0,5
Щебінь мокрий	0,3–0,4	Бруківка, камінь мокрі	0,4–0,5
Ґрунтова дорога суха	0,5–0,6	Вкатаний сніг	0,1–0,2
Ґрунтова дорога мокра	0,2–0,4	Лід	0,08–0,15
Бруківка, камінь сухі	0,6–0,7	Вкатаний сніг із піском	0,2–0,3

**Висновки**

- У результаті теоретичних досліджень:
  - проведено дослідження та побудовано графіки залежності гальмівної сили та сили зчеплення коліс із дорогою від швидкості за різних коефіцієнтів зчеплення для макета гібридного транспортного засобу з гібридною силовою установкою;
  - розглянуто теорію процесу електродинамічного гальмування гібридного автомобіля на дорожньому покритті з низьким коефіцієнтом зчеплення з урахуванням передатних чисел головної передачі;
  - доведено імовірність виникнення блокування коліс і, відповідно, юзу автомобіля під час електродинамічного гальмування;

– отримані результати можуть бути застосовані для подальшого дослідження процесів електродинамічного гальмування транспортних засобів, а також для покращення ефективності таких процесів.

**Література**

1. Дембіцький В.М. Вибір компоновальної схеми гібридного автомобіля та визначення режимів його руху / В.М. Дембіцький // Наукові нотатки. – 2012. – Вип. 37. – С. 75–81.
2. Сітовський О.П. Математичне моделювання процесу електричного гальмування макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою / О.П. Сітовський, В.М. Дембіцький // Вісник СевНТУ. – 2012. – Вип. 135. – С. 73–75.

3. 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. Дембіцький В.М. Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / В.М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – Вип. 29 (1002). – С. 28–32.
5. Сітовський О.П. Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на затяжних спусках / О.П. Сітовський, В.М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – Вип. 30 (1003). – С. 10–15.
6. Muhammad H. Rashid Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory and design / Rashid H. Muhammad. Second edition // University of West Florida, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2010. – 558 p.

Рецензент: В.І. Клименко, професор, к.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 24 вересня 2013 р.

---