

Дембіцький В.М.
Державне підприємство “Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний
інститут міського господарства”

РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА ПІД ЧАС РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

Розглянуто задачу регулювання параметрів електричного двигуна, який працює в режимі генератора під час рекуперативного гальмування. У даній роботі обґрунтовано методи регулювання струму електричного двигуна зміною магнітного потоку. Графічно-аналітичним методом знайдено співвідношення між струмом збудження та струмом генератора.

Отримане співвідношення дає можливість більш точного математичного моделювання руху транспортного засобу в гальмівному режимі із застосуванням рекуперації енергії, при цьому можливо суттєво знизити поріг мінімальної швидкості при якій припиниться рекуперативне гальмування за рахунок збільшення передатного відношення трансмісії.

Ключові слова: рекуперативне гальмування, регулювання, струм збудження, магнітний потік

Вступ. На даному етапі розвитку науки та техніки, враховуючи поставлені задачі, спрямовані на покращення екологічної ситуації в світі, зменшення витрати корисних копалин, розвиток відновлюваної енергетики, все більшого розвитку набувають транспортні засоби на альтернативних видах палива. Сюди відносяться автомобілі, які працюють на електричній енергії, водневих двигунах, сонячній енергії. Українські науковці сьогодні досить активно займаються проблематикою дослідження, покращення техніко-експлуатаційних властивостей та впровадженням електричного приводу на транспортних засобах [1, 2]. На державному рівні також є спроби впровадити пільги для власників електричних транспортних засобів [3].

Постановка проблеми. За результатами попередніх теоретичних досліджень [4, 5, 6] ефективності системи електродинамічного гальмування встановлено певні її недоліки, які полягають у припиненні процесу електродинамічного гальмування і, як наслідок, рекуперації енергії при досить високих залишкових швидкостях транспортного засобу. Даний ефект зумовлений зменшенням обертів електричного двигуна, який працює в режимі генератора до того моменту, поки швидкість двигуна буде більшою його швидкості ідеального холостого ходу, і його електрорушійна сила E буде більшою за прикладену напругу. Тому з метою зниження швидкості, при якій припиняється електродинамічне гальмування, необхідно розглянути питання регулювання характеристик електродвигуна, який працює в режимі генератора, з тим, щоб забезпечити максимальну ефективність гальмування та акумулювати у накопичувачі максимальну кількість електричної енергії. Крім того слід зауважити, що з метою досягнення більш точних результатів, під час досліджень механічних процесів гібридного транспортного засобу, необхідно враховувати вплив електричних елементів на даний процес.

Метою роботи є визначення способу регулювання характеристик генератора та побудова математичної моделі за цим способом. Ця математична модель являється необхідною під час математичного моделювання процесу електродинамічного гальмування транспортного засобу з системою рекуперації енергії.

Аналіз досліджень. Вирішенням проблеми управління та регулювання характеристиками електричного приводу займаються провідні українські та зарубіжні науковці [7, 8]. Провівши аналіз сучасних досліджень та розробок можна відмітити, що найбільш перспективним методом управління та регулювання електричних двигунів є векторне управління вентильним двигуном [9, 10]. Однак переважна більшість розробок та досліджень спрямована на управління електричним двигуном, і досить незначна увага приділяється процесу рекуперативного гальмування. Відмінність режимів роботи електричного двигуна під час розгону або постійного руху та електродинамічного гальмування полягає у необхідності початкового зменшення електричного гальмівного моменту з метою уникнення перевантаження електродвигуна в режимі генератора з послідуочим його збільшенням для підвищення ефективності рекуперативного гальмування. Оскільки під час режиму розгону струми та оберти генератора є контрольованими зі сторони системи управління електричним

двигуном, а під час гальмування, особливо при великих швидкостях, струми можуть багатократно перевищувати максимально допустимі значення, що призведе до виходу з ладу електродвигуна.

З теорії електричного привода [11] відома залежність електричного гальмівного моменту (M_e) на валу двигуна від його характеристик:

$$M_e = k \cdot \phi \cdot I_{ген}, \quad (1)$$

де k - коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості генератора;

ϕ - магнітний потік генератора, Вб;

$I_{ген}$ - струм генератора, А.

З іншої сторони струм генератора визначається за залежністю:

$$I_{ген} = \frac{E - U_n}{R}, \quad (2)$$

де U_n – напруга генератора, В;

E – електрорушійна сила, В;

R – внутрішній опір генератора, Ом.

Провівши аналіз залежностей (1) та (2) можна виділити три способи управління електродвигуном незалежного збудження в режимі генератора [12]:

- зміною величини магнітного потоку збудження;
- зміною величини опору ланцюга;
- зміною величини напруги генератора.

Найбільш оптимальним варіантом управління електричним двигуном, який працює в режимі генератора є його регулювання зміною величини магнітного потоку збудження.

За результатами аналізу сучасних конструкцій генераторів та електродвигунів встановлено, що сучасні електричні машини мають досить малу величину внутрішнього опору, значення якого становлять менше 0,1 Ом. [12].

Для моделювання процесу управління доцільно скористатися даними наведеними у [12]. З цієї метою необхідно перейти від абсолютних до відносних змінних величин (3). При цьому постійні величини рівні 1.

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{M_z}{M_n}; \\ i &= \frac{I_z}{I_n}; \\ \nu &= \frac{w_z}{w_n}; \\ f &= \frac{\phi_z}{\phi_n} \end{aligned} \quad (3)$$

де w – частота обертання генератора;

індекси n та z відповідно номінальні та задані величини.

Тоді залежності (1) та (2) можна записати у відносних величинах:

$$\begin{aligned} \mu &= f i \\ i &= \frac{f - 1}{R} \end{aligned} \quad (4)$$

Як відомо, рекуперативне гальмування виникає при $E > U_n$, або при $f > 1$ у відносних величинах. Якщо прийняти максимальний магнітний потік 2, виходячи з умови здійснення рекуперативного гальмування, то при мінімальному значенні магнітного потоку, $f=1$ електричний гальмівний момент буде рівний 0, тобто гальмування припиниться. Ослаблення магнітного потоку на 5 % (при $R=0,1$ Ом) від максимального призведе до зменшення різниці чисельника, і відповідно буде зменшено струм на 5 %, а гальмівний момент електродвигуна на 8 %. Цей прийом доцільно застосовувати при значних початкових швидкостях гальмування для уникнення значного перевантаження генератора.

Залежність значення струму збудження від магнітного потоку у відносних величинах наведена у [11].

У [12] наведено залежність характеристики регулювання моменту генератора при $v=\text{const}$ та $\phi = \text{var}$, яка визначається формулою (5).

$$\mu = f(1 - vf), \quad (5)$$

При цьому діапазон регулювання становить:

$$\begin{aligned} \mu &\in [0; \frac{1}{4v}] \\ f &\in [0; \frac{1}{2v}] \end{aligned} \quad (6)$$

Якщо врахувати, що під час рекуперативного гальмування швидкість змінюється досить повільно, порівняно зі змінами величин моменту та магнітного потоку, та прийняти $v=1$, то діапазон зміни моменту та магнітного потоку набуде більш конкретних значень (7).

$$\begin{aligned} \mu &\in [0; 0,25] \\ f &\in [0; 0,5] \end{aligned} \quad (7)$$

Регульовальні характеристики генератора у відносних величинах, згідно залежностей (3) графічно відображено на рис. 1.

Наведені залежності не відображають в повній мірі характеристики електричного приводу, так, наприклад вони не враховують час наростання та спадання струмів збудження і т.п. Однак для проведення досліджень експлуатаційних властивостей їх точності достатньо. При цьому слід зазначити, що з огляду на те, що електромагнітні процеси в схемі протікають значно швидше, ніж механічні процеси в системі приводу машини, стрибкоподібні зміни струмів збудження, час їх наростання та спадання не матимуть значного впливу на загальну характеристику процесу рекуперативного гальмування.

З графіка, зображеного на рис. 2.9(в) графічним методом можна отримати залежність зміни струму генератора від струму збудження:

$$\begin{aligned} I_{ген} = -2,5753 \cdot I_{зб}^4 + 13,098 \cdot I_{зб}^3 - 26,203 \cdot I_{зб}^2 + 25,94 \cdot I_{зб} - \\ - 0,1467 = f(I_{зб}) = I_{ген}(I_{зб}) \end{aligned} \quad (8)$$

Важливим є той факт, що застосування вищеописаної моделі регулювання процесу рекуперативного гальмування дозволить збільшити передатні числа головної передачі, що матиме позитивний вплив на експлуатаційні властивості автомобіля, а в першу чергу дозволить зменшити швидкість транспортного засобу, при якій припиняється режим рекуперативного гальмування.

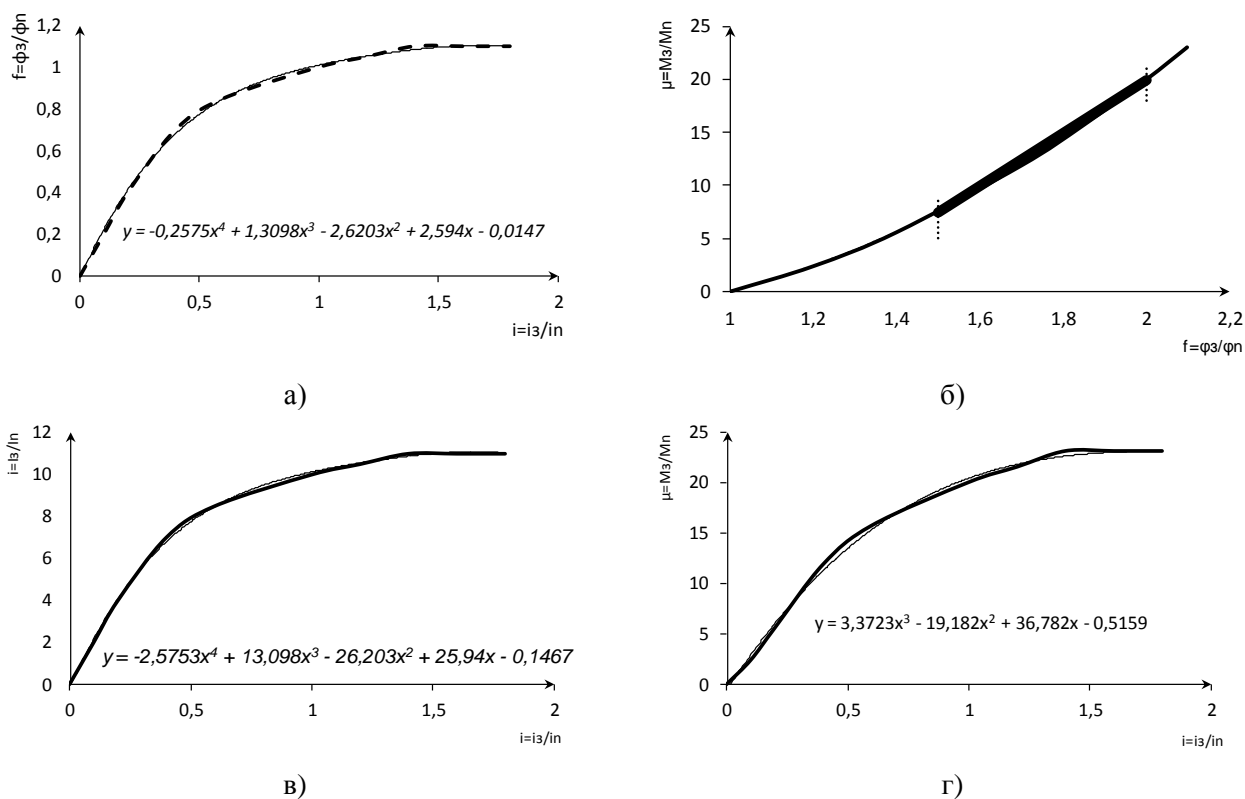


Рис. 1. Регулювальні характеристики електродвигуна (у відносних величинах): а – залежність магнітного потоку від струму збудження; б – залежність гальмівного моменту електродвигуна від магнітного потоку (жирним виділено регулювальний діапазон); в – залежність струму генератора від струму збудження; г - залежність гальмівного моменту електродвигуна від струму збудження.

На рис. 2 наведено криві, які характеризують процес рекуперативного гальмування при різних передатних числах головної передачі.

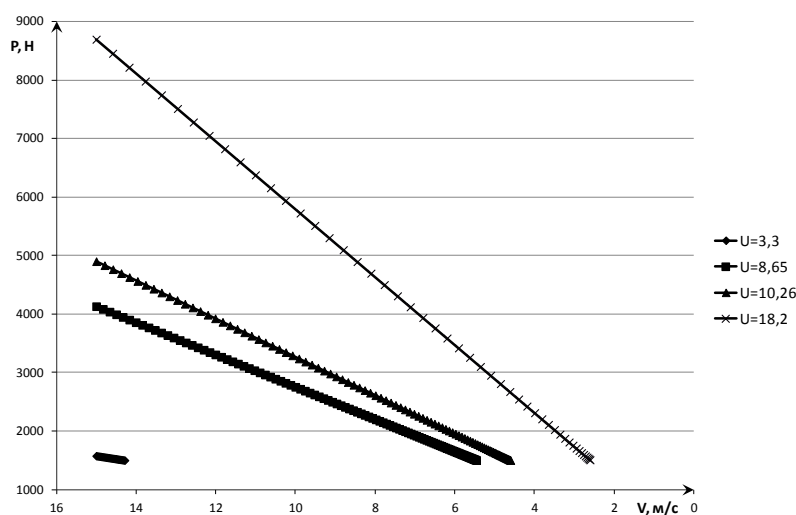


Рис. 2. Процес рекуперативного гальмування автомобіля з різними передатними числами головної передачі.

Висновки. За результатами проведеної роботи визначено метод регулювання генератора та встановлено залежності між струмом обмотки збудження та характеристиками генератора постійного струму незалежного збудження. Встановлено залежність зміни сили струму генератора від струму

збудження. Отримана залежність дозволяє більш точно проводити моделювання руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування, при цьому можливо суттєво знизити поріг мінімальної швидкості при якій припиниться рекуперативне гальмування за рахунок збільшення передатного відношення трансмісії.

1. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. Гібридні автомобілі. – Харків: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
2. Розробка високопотужного гібридного джерела живлення на основі батарей суперконденсаторів та акумуляторів для екологічних транспортних засобів : звіт про НДР (заключ.) НТУУ "КПІ" ; кер. роб. В. Ізотов. – К., 2012. – 96 с.
3. Украина освободила от спецпошлины гибридные автомобили [Электронный ресурс] / 17.02.2015. – Режим доступа: <http://domik.ua/novosti/ukraina-osvobodila-ot-specposhliny-gibridnye-avtomobili-n235129.html>. Дата обращения 19.02.2015.
4. 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.
5. 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.
6. 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. С. 95 – 102.
7. Овсянников Е.М. Управление тяговым асинхронным электроприводом гибридных автомобилей по минимуму потерь и максимуму перегрузочной способности / Е.М. Овсянников, Нгуен Куанг Тхьеу, Нгуен Хак Туан // Сборник научных трудов 65-ой международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) – М.: МАМИ, 2009. С. 120 – 129.
8. Потапенко Е.М. Методы энергооптимального управления асинхронным электроприводом / Е.М. Потапенко, А.А. Шийка // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса: ОНПУ, №15 (91), 2014. С. 364 – 366.
9. Серіков С.А. Идентификация математической модели тягового электропривода автомобиля / С.А. Серіков // Електротехніка і електромеханіка. Науково-практичний журнал – Харків: ХПІ, № 3, 2010. С. 56 – 60.
10. Серіков С.А. Управление вектором тока тягового вентильного электродвигателя силовой установки гибридного автомобиля / С.А. Серіков // Автомоб. трансп. : сб. науч. тр. – 2009. – Вып. 25. – С. 127-133.
11. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
12. Воронин С. Г. Электропривод летательных аппаратов: Учебно-методический комплекс / С.Г. Воронин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 171 с.

REFERENCES

1. Bazhynov, O., Smirnov, A., Serikov, S., Hnatov, A. & Kolesnikov, A. (2008). *Hybrid cars*. [Gibridni avtomobili]. Kharkiv: HNADU Publ. 327 p.
2. Izotov, V. (2012). *Development of high-performance hybrid power source based on ultracapacitors and batteries for ecological vehicles: research report*. [Rozrobka visokopotuzhnogo gibridnogo dzherela zhivlennja na osnovi batarej superkondensatoriv ta akumuljatoriv dlja ekologichnih transportnih zasobiv: zvit pro NDR]. Kyiv. 96 p.
3. *Ukraine released from special duty hybrid vehicles* [Ukraina osvobodila ot specposhliny gibridnye avtomobili] (Electronic resource) / 17.02.2015. – Access: <http://domik.ua/novosti/ukraina-osvobodila-ot-specposhliny-gibridnye-avtomobili-n235129.html>.
4. Dembitsky, V. & Sitovskyy, O. (2014). Mathematical model of electrodynamic braking with energy recovery vehicle fitted electric. [Matematichna model' procesu elektrodinamichnogo gal'muvannja z rekuperacieju energii transportnogo zasobu, obladnanogo elektroprivodom]. *Scientific Notes [Naukovi notatky]*. Vol. 45. Lutsk, LNTU Publ., pp. 159-167.
5. Sitovskyy, O. & Dembitsky, V. (2012). Mathematical modeling of electrical braking model vehicle with hybrid engine. [Matematichne modeljuvannja procesu elektrichnogo gal'muvannja maketu transportnogo zasobu z gibridnoju silovuju ustanovkoju]. *Bulletin of the Sevastopol NTU. Series: mechanical, instrument engineering and transportation*. [Visnyk SevNTU. Seriya: Mashyno-pryladobuduvannia ta transport] Vol. 135, Sevastopol, SevNTU Publ., pp. 73-75.
6. Dembitsky, V. (2014). Method of determining the energy characteristics of the process electrodynamic braking during the road test vehicles equipped with electric energy recovery system [Metodika viznachennja energetichnih harakteristik procesu elektrodinamichnogo gal'muvannja pid chas dorozhnih viprobuvan' transportnih zasobiv, obladnanih elektroprivodom ta sistemoju rekuperacii energii]. *Bulletin of the NTU*. [Visnyk NTU]. Vol. 30. Kyiv, NTU Publ., pp. 95-102.
7. Ovsyannikov, E., Nguyen, Q. T. & Nguyen, T. H. (2009). Traction control asynchronous electric hybrid vehicles to a minimum waste and maximum overload capacity [Upravlenie t'jagovym asinhronnym elektroprivodom gibridnyh avtomobilej po minimumu poter' i maksimumu peregruzochnoj sposobnosti]. *Collection of scientific works of the 65th International Scientific Conference of the Association of Automobile Engineers (AAI)*. Moscow, MAMI Publ., pp. 120-129.
8. Potapenko, E. & Shijka, A. (2014). Methods of energy optimal control of asynchronous electric drive [Metody energooptimal'nogo upravlenija asinhronnym elektroprivodom]. *Electrical and computer systems*. [Elektrotekhicheskie i komp'yuternye sistemy] Vol. 15 (91). Odesa, UNP Publ., pp. 364-366.

9. Serikov, S. (2010). Identification of a mathematical model of traction electric drive of vehicle. [Identifikacija matematičeskoj modeli tjašovogo elektroprivoda avtomobilja]. *Electronics and electrical engineering. [Elektrotehnika i elektromekhanika]*. Vol. 3, Kharkiv, KPI Publ., pp. 56-60.
10. Serikov, S. (2009). Current vector control for traction valve electric motor of power plant of a hybrid car. [Upravlenie vektorom toka tjašovogo ventil'nogo elektrodvigatelja silovoj ustanovki gibridnogo avtomobilja]. *Automotive transport. [Avtomobilnyi transport]*. Vol. 25. Kharkiv, KhNADU Publ., pp. 127-133.
11. Veshenevskyy, S. (1977). *Specifications of motors in the electric drive*. 6th ed. [Harakteristiki dvigatelej v elektroprivode. Izd. 6-e, ispravlennoe]. Moscow, Energia Publ. 432 p.
12. Voronina S. (2006). *Power drive of aircrafts: teaching complex [Elektroprivod letatel'nyh apparatov: Učebno-metodicheskiy kompleks]*. Chelyabinsk, SUSU Publ. 171 p.

Дембіцький В.М. Регулирование параметров генератора во время рекуперативного торможения.

Рассмотрена задача регулирования параметров электрического двигателя, который работает в режиме генератора при рекуперативном торможении. В данной работе обоснованы методы регулирования тока электродвигателя изменением магнитного потока. Графически-аналитическим методом найдено соотношение между током возбуждения и током генератора.

Полученное соотношение позволяет проводить более точное математическое моделирование движения транспортного средства в тормозном режиме с применением рекуперации энергии, при этом возможно существенно снизить порог минимальной скорости при которой прекратится рекуперативное торможение за счет увеличения передаточного отношения трансмиссии.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, регулирование, ток возбуждения, магнитный поток.

V. Dembitskyj. Adjustment of the electric motor in generator mode of operation during recuperative braking.

It is dealt with adjustment problem of the electric motor in generator mode of operation during recuperative braking. Electric motor current adjustment methods by magnetic flux management in this study are justified. Generator field current and out current correlation is determined by the way of the graphical analysis.

The achieved correlation leads to the more precise mathematical simulation of a vehicle during recuperative braking. Thus significant reduction of the recuperation minimum speed threshold by increasing of transmission gear ratio is possible.

Key words: recuperative braking, adjustment, field current, magnetic flux.

АВТОР:

ДЕМБИЦЬКИЙ Валерій Миколайович, Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», завідувач лабораторії надійності і рухомого складу відділу міський електричний транспорт, e-mail: dvm2@meta.ua

AUTHOR:

Valerii DEMBITSKYI, State enterprise «Scientific, research, design and technology institute», Head of the Laboratory of reliability and rolling stock of the city electric transport, e-mail: dvm2@meta.ua

РЕЦЕНЗЕНТИ:

ПРИЙМАК О. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедрою теплотехніки, м. Київ, Україна.

САХНО В. П., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автомобілі», Національний транспортний університет, м. Київ, Україна.

REVIEWERS:

O. PRYUMAK, Doctor of Science in Engineering, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Head of Thermal Engineering Department, Kiev, Ukraine.

V. SAKHNO, Doctor of Science in Engineering, Professor, Head of Automobiles Department, National Transport University, Kiev, Ukraine.

Стаття надійшла в редакцію 11.05.2015р.