



Мобільні і стаціонарні енергозасоби та їх елементи Mobile and stationary power units and their elements

УДК 629.331

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7269131>

Оценка эффективности совместного использования рекуперативного и диссипативного торможений автомобиля

А.В. Бажинов¹, М.А. Подригало², Г.С. Сериков³, И.А. Серикова⁴

Харьковский национальный автомобильно-дорожный
университет, (м.Харків, Україна)

email: georgy301212@gmail.com; ORCID: ¹ 0000-0002-5755-8553;
² 0000-0002-1624-5219; ³ 0000-0002-9578-1211; ⁴ 0000-0002-4695-6521

В работе исследуется проблематика путей повышения эффективности использования энергии, запасенной на борту электроавтомобиля.

Тяговый электропривод даёт ощутимые преимущества в сравнении с двигателями внутреннего сгорания, однако требует применения дорогостоящего энергоаккумулятора. Современное состояние тяговой энергетики транспортных средств вынуждает искать новые, более энергоэффективные подходы к управлению в использовании энергии, запасённой на борту автомобиля. Исследования путей повышения эффективности использования энергии тяговых батарей и механической энергии, запасённой транспортным средством, позволяет сделать вывод о том, что существенная доля механической энергии при передвижении теряется в диссипативной тормозной системе. При торможении диссипативная тормозная система безвозвратно преобразует механическую энергию в другие, неиспользуемые виды энергии. Показано, что часть энергии, потраченной на разгон транспортного средства можно вернуть путем применения рекуперативной системы торможения. Малоизученным остаётся вопрос исследования методик управления тормозной системой с целью максимальной рекуперации энергии в совокупности с поддержанием высокой эффективности торможения. Определение диапазонов скоростей и интенсивности использования рекуперативных и диссипативных тормозных систем даст возможность поддержания режима максимальной рекуперации совместно с соблюдением требований безопасности движения. В работе предложен метод оценки эффективности рекуперативного торможения через цикловой коэффициент полезного действия (КПД), равный отношению энергии, поглощённой рекуперативной тормозной системой к кинетической энергии поступательного движения автомобиля в начальный момент торможения. Показано, что совместное торможение автомобиля с использованием рекуперативной и диссипативной тормозных систем позволяет обеспечить высокую эффективность торможения (особенно на малых скоростях движения).

Ключевые слова: транспортное средство, восстановление энергии, рекуперативное торможение, фрикционное торможение, тормозная сила.

Постановка проблемы и её актуальность.

Бурное развитие современных технологий позволило производителям автотранспорта начать серийное производство электроавтомобилей. Тяговый электропривод даёт ощутимые преимущества в сравнении с двигателями внутреннего сгорания, однако требует применения дорогостоящего энергоаккумулятора. Современное состояние тяговой энергетики транспортных средств вынуждает искать новые, более энергоэффективные подходы к управлению в использовании энергии, запасённой на борту автомобиля.

Анализ результатов последних исследований и публикаций, касающихся проблемы. Тут существуют разные пути решения поставлен-

ной задачи. Прежде всего исследуются пути применения систем управления с нечеткой логикой для предсказания поведения автомобиля и изменения его параметров на некоторый, ограниченный интервал времени вперед [1, 2].

Существенное влияние на эффективность использования запасённой энергии является возможность организации ее циркуляции в трансмиссии и аккумуляция кинетической энергии при торможении [3]. Важной задачей в сохранении полученной от рекуперации электроэнергии являются исследования влияния алгоритмов заряда накопителей [4].

Трансмиссия гибридных автомобилей также должна обеспечивать гибкое управление для

возможности реализации наиболее эффективных алгоритмов передачи энергетических потоков при движении. В работе [5] исследованы силовые агрегаты с планетарными редукторами в различных вариациях.

Наиболее объемные исследования проблем повышения эффективности электропривода при гибридизации автотранспорта были проведены коллективом Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Анализ авторами наиболее распространенных схем трансмиссии показал, что в настоящее время наиболее распространенным видом рекуперации является торможение электрогенератором [6-8]. Такой подход позволяет сократить количество узлов в трансмиссии, поскольку в качестве генератора может использоваться тяговый электродвигатель [9].

В работе [10] исследованы допустимые диапазоны применимости электрогенераторов Г-290 в тормозной системе.

Цель и постановка задачи

Малоизученным остаётся вопрос исследования методик управления тормозной системой с целью максимальной рекуперации энергии в совокупности с поддержанием высокой эффективности торможения. Определение диапазонов скоростей и интенсивности использования рекуперативных и диссипативных тормозных систем даст возможность поддержания режима максимальной рекуперации совместно с соблюдением требований безопасности движения.

Особенности совместного использования рекуперативных и диссипативных тормозных систем. При параллельном включении рекуперативных и диссипативных тормозных систем замедление автомобиля равно

$$\dot{V}_a = \frac{dV_a}{dt} = \dot{V}_{\text{рек.торм.}}^{\text{парц.}} + \dot{V}_{\text{дис.торм.}}^{\text{парц.}} \quad (1)$$

где $\dot{V}_{\text{рек.торм.}}^{\text{парц.}}$ - параллельное ускорение автомобиля, создаваемое рекуперативной тормозной системой; $\dot{V}_{\text{дис.торм.}}^{\text{парц.}}$ - параллельное ускорение, создаваемое диссипативной тормозной системой

Автомобильный коэффициент полезного действия рекуперативного торможения, характеризующий долю кинетической энергии тормозящего автомобиля, преобразованной и сохранённой за счет рекуперации, будет равен

$$\eta_{\text{рек.торм.}}^{\text{мгн.}} = \frac{\dot{V}_{\text{рек.торм.}}^{\text{парц.}}}{\dot{V}_a} = \frac{\dot{V}_{\text{рек.торм.}}^{\text{парц.}}}{\dot{V}_{\text{рек.торм.}}^{\text{парц.}} + \dot{V}_{\text{дис.торм.}}^{\text{парц.}}} \quad (2)$$

Парциальное ускорение, создаваемое рекуперативной тормозной силой

$$\dot{V}_{\text{рек.торм.}}^{\text{парц.}} = -\frac{kV_a}{m_a} \quad (3)$$

где V_a - линейная скорость автомобиля; m_a - масса автомобиля; k - коэффициент пропорциональности между скоростью V_a и тормозной силой $P_{\text{Трек}}$, создаваемой рекуперативной тормозной системой,

$$k = \frac{P_{\text{Трек}}}{V_a} \quad (4)$$

Парциальное ускорение, создаваемое диссипативной тормозной системой

$$\dot{V}_{\text{дис.торм.}}^{\text{парц.}} = -\frac{P_{\text{Тдис}}}{m_a} \quad (5)$$

где $P_{\text{Тдис}}$ - тормозная сила создаваемая диссипативной тормозной системой.

Уравнение (1) с учетом соотношения (3) и (5) примет вид

$$\frac{dV_a}{dt} = -\left(\frac{k}{m_a}V_a + \frac{P_{\text{Тдис}}}{m_a}\right) \quad (6)$$

Уравнение (6) представляет собой дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, решение которого с учетом граничных условий (при $t = 0$; $V_a = V_0$) имеет вид

$$V_a = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{P_{\text{Тдис}}}{k} + V_0\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{k}{m_a}t\right) - \frac{P_{\text{Тдис}}}{k} \end{array} \right] \quad (7)$$

где V_0 - начальная скорость торможения; t - время.

При отсутствии диссипативного торможения $P_{\text{Тдис}} = 0$ и выражение (7) примет вид

$$V_{a \text{ рек}} = V_0 \exp\left(-\frac{k}{m_a}t\right) \quad (8)$$

При совместном торможении

$$V_{a \text{ рек}} = V_{a \text{ рек}}^{\text{парц}} \quad (9)$$

где $V_{a \text{ рек}}^{\text{парц}}$ - условная парциальная скорость рекуперативного торможения.

Энергия, поглощенная рекуперативной тормозной системой к моменту времени t

$$W_{\text{рек}} = \frac{m_a}{2} [V_0^2 - (V_{a \text{ рек}}^{\text{парц}})^2] = \frac{m_a V_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2k}{m_a}t\right)\right] \quad (10)$$

К концу торможения ($t = T$) энергия, поглощенная рекуперативной тормозной системой будет равна

$$W_{\text{рек}} = \frac{m_a V_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2k}{m_a}T\right)\right] \quad (11)$$

Цикловой КПД рекуперативного торможения

$$\eta_{\text{рек.торм.}}^{\text{цикл}} = \frac{W_{\text{рек}}}{W_{k0}} = 1 - \exp\left(-\frac{2k}{m_a}T\right), \quad (12)$$

где W_{k0} - кинетическая энергия поступательного движения автомобиля в начальный момент торможения,

$$W_{k0} = \frac{m_a V_0^2}{2}. \quad (13)$$

График зависимости $\eta_{\text{рек.торм.}}^{\text{цикл}}(T)$ при различных значениях k приведен на рис. 1.

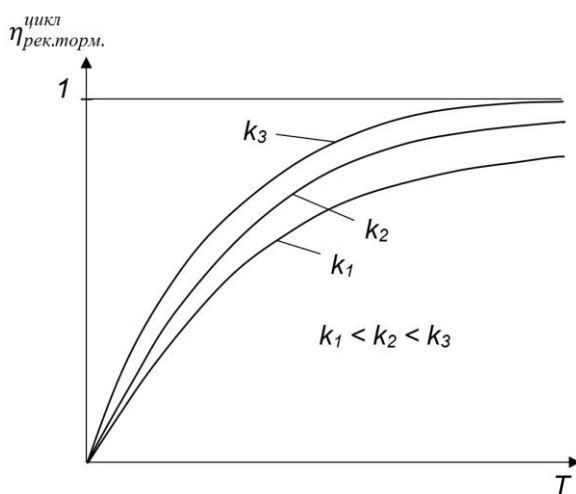


Рис. 1. Зависимость $\eta_{\text{рек.торм.}}^{\text{цикл}}(t)$.

Выводы

1. Совместное торможение автомобиля с использованием рекуперативной и диссипативной тормозных систем позволяет обеспечить высокую эффективность торможения (особенно на малых скоростях движения).

2. Эффективность рекуперативного торможения предложено оценивать через цикловой КПД, равный отношению энергии, поглощённой рекуперативной тормозной системой к кинетической энергии поступательного движения автомобиля в начальный момент торможения.

Литература:

1. Li Peng, Wei Liu, BingNan Qi, "Energy optimization of multi-mode coupling drive plug-in hybrid electric vehicles based on speed prediction", *Journal of Energy. Eng.*, vol. 206, no. 118126. 2020.
2. Yuanjian Zhang, Liang Chu, Zicheng Fu, Nan Xu, Chong Guo, "Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle integrated with vehicle-environment cooperation control", *Journal of Energy. Eng.*, vol. 197, no. 117192. 2020

3. А. В. Бажинов, В. Я. Двадненко, Хаким Мауш «Разработка концепции электропривода для конверсионного гибридного автомобиля», *Сборник научных трудов ХНАДУ «Автомобильный транспорт»*, № 30, с. 7–12. 2012.

4. Peter Keil, Andreas Jossen, "Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells", *Journal of Energy Storage, Eng.*, vol. 6, pp. 125-141. 2016.

5. Cheng-Ta Chung, Chien-Hsun, Yi-Hsuan, Hung, «Evaluation of driving performance and energy efficiency for a novel full hybrid system with dual-motor electric drive and integrated input- and output-split e-CVT», *Journal of Energy*, vol. 191, no. 116508. 2020.

6. О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Сериков, та А.В. Гнатов, *Гібридні автомобілі*. Харків, Україна: ХНАДУ, 2008.

7. О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Сериков, та В. Я. Двадненко, *Синергетичний автомобіль. Теорія і практика*. Харків, Україна: ХНАДУ, 2011.

8. А. В. Бажинов, В. Я. Двадненко, С. А. Сериков «Система управления гибридной силовой возбуждением», *Вісник СНУ ім. Володимира Даля*, №7 (149), с. 61-66. 2010.

9. В. Я. Двадненко «Математическая модель тягового вентильного электродвигателя в режиме рекуперативного торможения», *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, № 70, с. 122-136. 2015.

10. В. Я. Двадненко, С. А. Сериков «Двухзонное управление тяговым вентильным электроприводом гибридного автомобиля», *Труды ЛО МАИ, Науковий журнал*, №1 (23), с. 23-28. 2011.

References:

1. Li Peng, Wei Liu, BingNan Qi (2020) 'Energy optimization of multi-mode coupling drive plug-in hybrid electric vehicles based on speed prediction'. *Journal of Energy. Eng.*, ((206)118126) <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118126>
2. Yuanjian Zhang, Liang Chu, Zicheng Fu, Nan Xu, Chong Guo (2020) 'Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle integrated with vehicle-environment cooperation control', *Journal of Energy. Eng.*, (197(№117192)) <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117192>
3. Bazhinov A., Dvadnenko V., Hakim M. (2012) 'Razrabotka koncepcii elektroprivoda dlya konversionnogo gibridnogo avtomobilya'. *Sbornik nauchnyh trudov HNADU «Avtomobil'nyj transport»*, (30), pp.7–12.
4. Korohodskiy V., Rogovyi A., Voronkov O., Polivyanchuk A., Gakal P., Lysytzia O., Khudiakov I., Makarova T., Hnyp M., Haiek Ye. (2021) 'Development of a three-zone combustion model for

stratified-charge spark-ignition engine'. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. (2/5(110)). pp. 46-57

5. Chung Ch., Hsun Ch, Hsuan Yi, Hung Yi. (2020) 'Evaluation of driving performance and energy efficiency for a novel full hybrid system with dual-motor electric drive and integrated input- and output-split e-CVT', Journal of Energy, (191(116508)), <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116508>

6. Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A., Gnatov A.V. (2008) *Gibridni avtomobili*. Kharkiv, Ukraina: HNADU, 327 p.

7. Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A., Dvadenko V.YA. (2011) *Sinergetichnij avtomobil*. Teoriya i praktika. Harkiv, Ukraïna: HNADU, 236 p.

8. Bazhinov O.V., Smirnov O.P., Serikov S.A. (2010) 'Sistema upravleniya gibridnoj silovoj vozbuzhdeniem', Вісник SNU im. Volodimira Dalya, (7(149)), pp. 61-66.

9. Dvadenko V.YA. (2015) 'Matematicheskaya

model' tyagovogo ventil'nogo elektrodvigatelya v rezhime rekuperativnogo tormozheniya', Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta, (70), pp.122-136.

10. Dvadenko V.YA., Serikov S.A. (2011) 'Dvuhzonovoe upravlenie tyagovym ventil'nym elektroprivodom gibridnogo avtomobilya', Trudy LO MAI, Naukovij zhurnal, (1(23)), pp. 23-28.

11. Bazhynova T., Kravchenko O., Barta D., Haievyi O., Pavelcik V. (2020) 'Neural Network Model of Assessing the Technical Condition of the Power Unit of a Hybrid Vehicle' XII International Science-Technical Conference AUTOMOTIVE SAFETY, Kielce, 21-23 DOI:10.1109/AUTOMOTIVE SAFETY47494.2020.9293504

12. Bazhynova T. (2019) 'Intelligent information and control system of hybrid and electric vehicles' Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. (2(86)). pp. 148-155. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.148>

Анотація

Оцінка ефективності спільного використання рекуперативного і дисипативного гальмувань автомобіля

А.В. Бажинов, М.А. Подригалo, Г.С. Серіков, І.А. Серікова

В роботі досліджується проблематика шляхів підвищення ефективності використання енергії, запасеної на борту електромобіля.

Тяговий електропривод дає відчутні переваги в порівнянні з двигунами внутрішнього згорання, однак вимагає застосування дорогого енергонакопичувача. Сучасний стан тягової енергетики транспортних засобів змушує шукати нові, більш енергоефективні підходи до управління у використанні енергії, запасеної на борту автомобіля. Дослідження шляхів підвищення ефективності використання енергії тягових батарей і механічної енергії, запасеної транспортним засобом, дозволяє зробити висновок про те, що істотна частка механічної енергії при пересуванні втрачається в дисипативній гальмівній системі. При гальмуванні дисипативна гальмівна система безповоротно перетворює механічну енергію в інші, невикористовувані види енергії. Показано, що частина енергії, витраченої на розгін транспортного засобу можна повернути шляхом застосування рекуперативної системи гальмування. Маловивченим залишається питання дослідження методик керування гальмовою системою з метою максимальної рекуперативності енергії в сукупності з підтримкою високої ефективності гальмування. Визначення діапазонів швидкостей і інтенсивності використання рекуперативних і дисипативних гальмівних систем дасть можливість підтримки режиму максимальної рекуперативності спільно з дотриманням вимог безпеки руху. В роботі запропонований метод оцінки ефективності рекуперативного гальмування через цикловий коефіцієнт корисної дії (ККД), рівний відношенню енергії, поглиненої рекуперативною гальмівною системою до кінетичної енергії поступального руху автомобіля в початковий момент гальмування. Показано, що спільне гальмування автомобіля з використанням рекуперативної і дисипативної гальмівних систем дозволяє забезпечити високу ефективність гальмування (особливо на малих швидкостях руху).

Ключові слова: транспортний засіб, енергія відновлення, рекуперативне гальмування, фрикційне гальмування, гальмівна сила.

Abstract

Evaluation of the effectiveness of the joint use of regenerative and dissipative braking of the car

A.V. Bazhinov, M.A. Podrigalo, G.S. Serikov, I.A. Serikova

The paper investigates the problem of ways to improve the efficiency of using the energy stored on board an electric vehicle.

The traction electric drive provides tangible advantages in comparison with internal combustion engines, however, it requires the use of an expensive energy storage device. The current state of the traction energy of vehicles forces us to look for new, more energy-efficient approaches to managing the use of energy

stored on board the vehicle. Studies of ways to increase the efficiency of using the energy of traction batteries and mechanical energy stored in a vehicle allows us to conclude that a significant proportion of mechanical energy during movement is lost in the dissipative braking system. When braking, the dissipative braking system irrevocably converts mechanical energy into other, unused forms of energy. It is shown that part of the energy spent on acceleration of a vehicle can be returned by using a regenerative braking system. The question of researching the methods of controlling the braking system with the aim of maximizing energy recovery in conjunction with maintaining high braking efficiency remains poorly understood. Determination of the ranges of speeds and intensity of use of recuperative and dissipative braking systems will make it possible to maintain the maximum recuperation mode together with the observance of traffic safety requirements. The paper proposes a method for assessing the efficiency of regenerative braking through the cyclic efficiency, which is equal to the ratio of the energy absorbed by the regenerative braking system to the kinetic energy of the vehicle's translational motion at the initial moment of braking. It is shown that joint braking of a vehicle using regenerative and dissipative braking systems allows for high braking efficiency (especially at low speeds).

Keywords: *vehicle, recovery energy, regenerative braking, frictional braking, braking force.*

Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Bazhinov, A. V. et al. (2021) 'Evaluation of the effectiveness of the joint use of regenerative and dissipative braking of the car', *Engineering of nature management*, (3(21)), pp. 7 - 11.

Подано до редакції / Received: 27.04.2021