

Система електродинамічного ретардеру подвійної дії

Бороденко Ю. М.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Складено класифікаційну структуру систем сповільнення автомобіля. Запропоновано технічне рішення електричного ретардеру, який являє композицію двох електричних машин, одна з яких являє генератор для рекуперації енергії гальмування. Розглядаються два підходи в реалізації конструкції спареного ретардеру – використання окремих машин або синтез суміщеного агрегату.

Ключові слова: система сповільнення, електродинамічний ретардер, гальма, рекуперація енергії гальмування, електрична машина з аксіальним магнітним потоком, трансмісія, баланс енергії.

Вступ

На автомобілі застосовуються гальмівні системи різного призначення: основна; аварійна; стоянкова; додаткова (сповільнення автомобіля). Системи гальм-сповільнювачів (гірських гальм) призначені для гальмування автомобіля при його русі під ухил з метою підтримки обмеженої швидкості переміщення рухомого складу без натискання на педаль гальма. Такі системи дозволяють запобігти перевантаженню робочої гальмівної системи перегріву і зношенню її гальмівних колодок через інтенсивну роботу під час руху автомобіля на тривалому спуску. Якщо, автомобіль часто експлуатується в гористій місцевості, то витрати на ремонт і обслуговування системи гальм різко зростають.

Використання електричних способів створення гальмівного моменту пов'язано з витратами електричної енергії транспортного засобу. Тому, одним з напрямків поліпшення енергетичних показників допоміжної гальмівної системи є застосування рекуперативних методів самозабезпечення.

Аналіз публікацій

На сьогодні розповсюдження набули системи сповільнення, які відрізняються за рядом класифікаційних ознак: механізмом дії системи; принципом дії та засобом керування ретардером; способом під'єднання гальма сповільнювача [1], рис. 1.

Перш за все, розрізняють моторні та трансмісійні системи. Перші, інвертують характеристику ДВЗ шляхом перетворення двигуна на компресор, за рахунок відключення подачі палива та перекриття випускної системи (компресійні системи) або зміни алгоритму роботи ГРМ (декомпресійні системи). Другі, використовують агрегат сповільнення (ретардер) в ланцюзі передачі моменту на колеса ведучого мосту. При цьому, залежно від місця встановлення розрізняють системи з первинними (до коробки передач) та вторинними (після коробки передач) ретардерами.

За принципом дії, ретардери з електричним керуванням можна поділити на газодинамічні, гідродинамічні та електродинамічні (магнітоіндукційні і електромагнітні) [2, 3].



Рис. 1. Класифікаційна структура систем сповільнення автомобіля

Газодинамічні ретардери застосовуються в моторних системах у вигляді газових заслінок (компресійні) або випускних клапанів ГРМ з пневмоелектричним приводом механізму корекції фази початку відкриття клапанів (декомпресійні) і за складом являють пневмоелектричні системи, рис. 2 [4, 5].



Рис. 2. Газодинамічні моторні сповільнювачі: а – компресійний; б – декомпресійний

Газова заслінка компресійного сповільнювача встановлюється на виході випускного колектору ДВЗ і в більшості випадків, керується пневматичним циліндром із застосуванням електроклапанів (рис. 2, а). Як альтернативні, можуть використовуватися гідроелектричний, електромагнітний (ЕМ) або сервопривід заслінки. Декомпресійна система сповільнення вбудована в газорозподільний механізм і отримала назву гальма Jake Brake (рис. 2, б). Принцип роботи такого моторного тормоза ґрунтується на скиданні тиску в циліндрі після такту стиснення за допомогою штатного випускного клапана ГРМ (при відключених паливних форсунках). Для цього, між штовхачем і стрижнем клапану ГРМ встановлюється проміжна ланка (штовхач і гідроциліндр з плунжером), яка змінює довжину што-

вхача під керуванням гідроелектричного клапана.

В результаті, активна фаза гальмування триває і на такті розширення, коли після закриття клапана ГРМ, в циліндрі створюється тиск розрідження (декомпресія). Jake Brake застосовується на вантажівках Freightliner (двигуни Cummins і Caterpillar) та DAF [3].

Гідродинамічні ретардери будуються за принципом гідромуфти, в якій крутний момент не передається як у гідротрансформаторі, а розсіюється у вигляді тепла. Керування силою сповільнення виконується шляхом зміни ступеня заповнення камер ретардера робочою рідиною (трансмісійною, охолоджуючою) під тиском, що створюється насосом з приводом від валу трансмісії. Контроль за подачею рідини і відповідно за швидкістю руху під час сповільнення, здійснюється за допомогою гідроелектричного блоку (електроклапанів) на підставі сигналів регулятора (здатчика) сповільнення, датчиків тиску рідини (масла) і датчика зворотного зв'язку (швидкості руху автомобіля).

Гідродинамічні ретардери з електричним керуванням задіюються, як трансмісійні та залежно від особливостей установки отримали різні назви (рис. 3) [6].

Офтардер являє окремий агрегат, який встановлюється в силовому агрегаті автомобіля на замовлення для виконання функції гірського гальма. Під'єднання/від'єднання офтардера до трансмісії здійснюється дистанційно через зубчасту передачу за допомогою електромагнітного приводу.

Інтардер безпосередньо вбудовується в конструкцію коробки передач з приводом від її вихідного валу (вторинне під'єднання). При

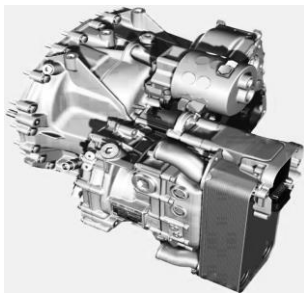
цьому, як робоче тіло використовується трансмісійне масло, а охолодження агрегату може здійснюватися через рідину системи охолодження ДВЗ.

Акватардер встановлюється спереду ДВЗ (первинне жорстке під'єднання до колінчастого валу). У якості робочої рідини в акватардері використовується охолоджуюча рідина замість трансмісійного масла.

Турбо-ретардер, поряд з основною функцією сповільнювача, забезпечує функцію гідравлічної муфти між ДВЗ і трансмісією, під час рушання завантаженого автомобіля. Це дозволяє розвинути максимальний крутний момент на валу ДВЗ (натискання на педаль акселератора) під опором гідродинамічного пристрою (на момент рушання) без зношення механічних елементів трансмісії. Процес підключення ретардера в турборежимі і перехід до режиму сповільнювача, здійснюється пневмогідравлічною системою з електричним керуванням.



а



б

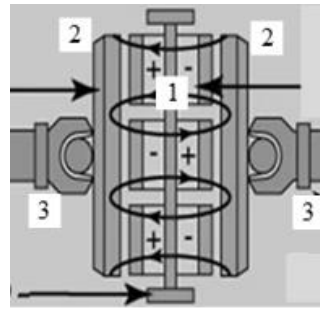


в

Рис. 3. Гідродинамічні сповільнювачі: а – офтардер; б – інтардер; в – акватардер

Магнітоіндукційний ретардер являє собою індукційні гальма, побудовані на ефекті генерації вихрових струмів. Ретардер складається з нерухомого статора з електромагнітами (індуктора 1) і пари роторів (ферромагнітних дисків 2), з'єднаних з приводним валом 3, що їх обертає (рис. 4, а, б) [7].

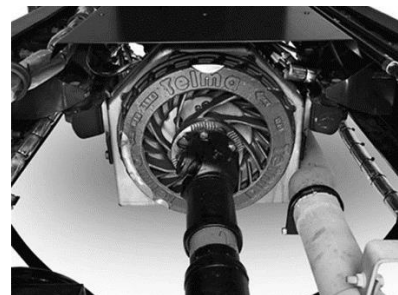
Промислові зразки магнітоіндукційних ретардерів характеризуються значним гальмівним моментом, що створюється силами електромагнітної взаємодії за рахунок моментів від полів вихрових струмів роторного диска і струмів в статорних котушках індуктора. Недоліком таких систем є витрата електричної енергії акумулятора для живлення котушок індуктора, яка перетворюється в позитивний гальмівний момент та негативні теплові втрати на нагрів роторного диску.



а



б



в

Рис. 4. Електродинамічний сповільнювач: а – принцип будови; б – вигляд; в – установка на рамі автомобіля

У якості електромагнітного ретардера можна розглядати вентильний генератор. При

цьому, гальмівний момент, створений на роторі генератора визначеної потужності, буде пропорційний силі струму його електричного навантаження.

Такий момент, зазвичай, недостатній для ефективного гальмування в обмеженому діапазоні нагрівання джерела і споживача електричної енергії. Поряд з цим, застосування гальмівних генераторів дозволяє реалізувати систему сповільнення, як рекуперативну.

В цьому випадку, найбільший інтерес викликають електричні машини з аксіальним магнітним потоком, де напрям магнітного потоку спрямовано вздовж осі обертання ротора. В такому разі, розміри робочого повітряного зазору машини визначає його діаметр, а не осьова довжина – двигун набуває дискової форми. Будова таких безколекторних машин передбачає розміщення друкованої (планарної) обмотки якоря на статорі та постійних магнітів збудження на роторі [7, 9, 10]. При цьому, розрізняють поверхневе SPMs (Surface Permanent Magnets) та вбудоване IPMs (Interior Permanent Magnets) кріплення магнітів на дисковому роторі [11, 12].

Підвищення потужності в таких машинах досягають збільшенням кількості статорів або роторів [13]. Традиційна конструкція машини з одним ротором та одним статором має меншу вагу та витрати матеріалів але, як наслідок це призводить до значних втрат на розсіювання магнітного потоку [8, 12]. Кращі енергетичні характеристики мають машини симетричної будови. Перший варіант, це машини SSDR (Single-Stator Double-Rotor), у яких два ротора розміщені з обох боків статора 1, 2 (рис. 5, а) [9, 14].

Другий варіант навпаки, має два статора, які діють на один ротор DSSR (Double-Stator Single-Rotor) (рис. 5, б) [15, 16].

На рис. 5 позначено: 1, 2 – ярмо ротора; 3 – планарні (друковані) котушки обмотки якоря; 4 – полюсні магніти ротора; 5 – немагнітна основа статора; 6 – полюсні зубці статора; 7 – ярмо статора.

Для машин структури DSSR необхідно застосовувати дискові магнітопроводи для створення замкнутої магнітної системи. Зменшення довжини робочого повітряного зазору і осьової довжини машини досягають шляхом застосування конструкцій статора де магнітопроводи мають зубці 6, які заходять у середину котушок обмотки якоря 3.

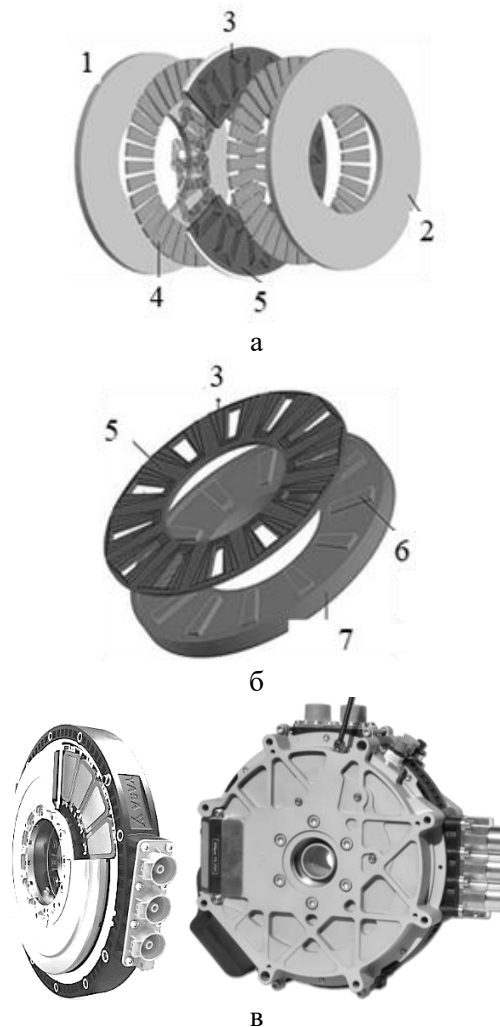


Рис. 5. Компонування аксіальної машини: а – структура SSDR, б – осердя статора з зубцями; в – зовнішній вигляд

Мета досліджень та постановка задачі

Мета роботи полягає у покращенні гальмівних характеристик системи сповільнення автомобіля (підвищення ефективності гальмування, стабілізації гальмівного моменту, керуваності процесом сповільнення, рекуперация енергії).

Основними напрямками вирішення цих задач є удосконалення конструкції ретардера і схеми системи керування гальмівними силами. Таким чином, ставиться задача – запропонувати технічне рішення системи електродинамічного ретардера з підвищеними енергетичними характеристиками, за рахунок використання процесів рекуперативної енергії під час сповільнення автомобіля при протяжному русі під ухил.

Синтез конструкції ретардери

Основним недоліком ретардерів магнітоіндукційної дії є значне споживання електричної енергії, що ставить конкуренцію іншим споживачам борта і потребує застосування генератора системи електропостачання автомобіля підвищеної потужності або АКБ підвищеної ємності. Щоб позбавитися цього недоліку і підвищити ефективність гальмування (гальмівної сили) системи сповільнення, пропонується доповнити конструкцію магнітоіндукційного ретардера автономним генератором для живлення сповільнювача [17]. При цьому, поряд з енергозбереженням, навантажений обмотками магнітоіндукційної частини ретардера генератор, буде створювати додатковий гальмівний момент на валу трансмісії (виконувати функції електродинамічного ретардера). Ідея використання двох суміщених машин була розглянута ще в 90-х роках.

Так, в [18] запропоновано технічне рішення суміщеної машини з синхронним трифазним вентильним генератором. Генератор, в цій конструкції, має електромагнітне збудження із живленням обмотки через контактні кільця. Вихід вентильного генератора, напряму підключений до обмоток сповільнювача. Керування гальмівною силою агрегату здійснюється регулятором струму збудження генератора.

Що стосується реалізації нової подвійної машини, можна розглядати два варіанти конструкції, які передбачають або застосування двох окремих агрегатів, або використання одного агрегату подвійної дії. В першому випадку, мінімізуються витрати на розробку системи але збільшується осьова довжина спареного агрегату і сумарна вартість електричних машин. В другому випадку, довжина синтезованого агрегату скорочується майже удвічі, але витрати на розробку суміщеного агрегату виходять на рівень промислового проекту.

Розглянемо перший варіант конструкції. У якості базового сповільнювача, обираємо магнітоіндукційний ретардер промислового зразка типу TELMA, який встановлюється у вторинному ланцюзі трансмісії (рис. 4, в) [3, 19].

До переваг TELMA-сповільнювачів слід віднести:

- підвищення безпеки за рахунок прийняття на себе значного зусилля гальмування;
- скорочення експлуатаційних витрат за рахунок більш тривалого терміну служби робочих гальм;

- відсутність впливу на навколишнього середовища за рахунок відсутності будь якого тертя та шкідливих викидів в атмосферу;

- підвищення комфортних умов для водія завдяки плавному гальмуванню і автоматичному керуванню;

- довгострокова надійність завдяки підвищеній міцності;

- максимальна ефективність через скорочення термінів окупності.

У якості генератора, за базову, обираємо дискову конструкцію синхронної трифазної машини зі збудженням від постійних магнітів (машина аксіального типу), яка характеризується високою питомою потужністю на малих обертах (рис. 5, в) [20].

За загальними класифікаційними ознаками (атрибутами) така машина ідентифікується як синхронна машина з поверхневою установкою постійних магнітів. Двигуни і генератори YASA, створені на основі унікальних (планарних) технологій, характеризуються високою питомою потужністю на малих обертах.

Наприклад, електродвигун YASA P400R номінальної потужності 100 кВт, який використовується в електромобілях, забезпечує до 200 Нм крутного моменту і частоту обертання до 8000 хв^{-1} при осьовій довжині 0,084 м і діаметрі 0,3 м та вазі 24 кг [20]. Синхронний принцип будови дозволяє використовувати машину в генераторному режимі із застосуванням випрямляча. Мінімальна осьова довжина та низька швидкість обертання конвертованої машини, цілком задовольняють умовам під'єднання спареного агрегату до карданного валу.

В двигуні інтегровано датчик положення ротора і температурний сенсор. До того ж, конструкція агрегату дозволяє поєднувати двигуни в стик на спільному валу для підвищення крутного моменту і потужності.

Означені характеристики роблять машини YASA придатними для застосування у нашій системі. По-перше, машина має мінімальну осьову довжину, по-друге, - цілком задовольняє умовам швидкісного режиму трансмісії після коробки передач.

Основними елементами синтезованої конструкції спареного ретардера є: 1, 3 – індукційні диски ротора; 2 – котушки статорного індуктора; 4 – планарні якірні котушки статора генератора; 5 – роторний диск з планарними магнітами аксіального генератора (рис. 6).

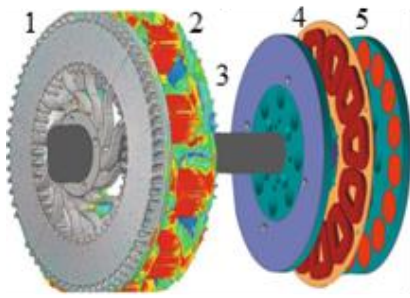


Рис. 6. Будова агрегату системи сповільнення подвійної дії

Подальше удосконалення конструкції ретардер-генератора полягає у застосуванні планарної технології в обох складових суміщеної машини. Слід зауважити, що додавання маси роторної частини подвійної машини збільшить її інерційність десь удвічі.

Для керування гальмівною силою, яку утворює подвійний ретардер (на відміну від [18]), використовується регулятор струму на виході вентильного генератора.

Якщо, оцінювати генераторну частину тандемної конструкції запропонованого ретардери на якісному рівні, було б доречно згадати недолік електричної машини зі збудженням від постійних магнітів, а саме утворення гальмівного моменту під постійною дією магнітного поля в контурі магнітної системи генератора. Це означає, що при русі автомобіля в штатному режимі (без гальмування і сповільнення), буде знижено ККД трансмісії.

Одним з способів компенсації таких втрат, є вмикання електричної машини в режимі двигуна. В такому разі, виникає потреба розглянути більш складну систему енергетичного балансу на рівні електричного мікрогібриду [21].

Відповіді на питання, щодо доцільності застосування аксіального генератора зі збудженням від постійних магнітів у складі тандемного ретардера, допоможуть тільки результати кількісного аналізу структурних параметрів і робочих характеристик обох машин ретардера і приводу автомобіля, як єдиної енергетичної системи. Причому, залежно від відносної потужності машин тандемного ретардера, виникає можливість отримання композиції силової установки автомобіля на рівні помірному і навіть повного гібриду [21]. В такому разі, друга частина спареного ретардера розглядається, як оборотна електрична машина з вентильним керуванням, а весь агрегат цілком, – як електропривод гібридної силової установки автомобіля з вбудованим магнітоіндукційним ретардером.

Висновки

Складено класифікаційну структуру систем сповільнення автомобіля.

Зроблено якісний аналіз техніко-експлуатаційних характеристик електромагнітного ретардера генераторного типу на базі машини з аксіальним магнітним потоком.

Запропоновано технічне рішення електричного ретардера, який являє композицію двох електричних машин, що забезпечують гальмівний момент подвійної дії із застосуванням рекуперованої енергії.

Означено необхідність кількісної оцінки балансу потужностей складових подвійної машини, яка дозволяє оптимізувати масо-габаритні показники суміщеного агрегату для визначеної гальмівної сили системи сповільнення.

Означено можливість трансформування композиції силової установки автомобіля с пасивним електромагнітним ретардером в схему помірному і навіть повного гібриду.

Визначено, що запропоноване технічне рішення, передбачає керованість процесом сповільнення (гальмівною силою), а отже стабілізацію гальмівного моменту та швидкості руху під уклін на заданому рівні і рекуперацію надлишкової енергії гальмування.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Бороденко, Ю. М., Гнатов, А. В., Аргун, Ш. В. (2024). Мехатронні системи автомобіля: підручник. М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Ч.2: Ходова частина. Харків: Мачулін. 228 с. Borodenko, Yu., Hnatov, A., & Argun, Sh. (2024). Mekhatronni systemy avtomobilia: pidruchnyk [Mechatronic Systems of the Automobile: Textbook]. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv National Automobile and Highway University. Part 2: Chassis. Kharkiv: Machulin. 228 p. [in Ukrainian]
2. What is a retarder? All you want to know. (2024). Retrieved from <https://www.truckcustom.com/what-is-a-retarder/>
3. Vehicle retarders: A review. (2021). Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10158685>
4. Ultimate guide: Learn all about Jake Brake. (2017). Retrieved from

- <https://www.fueloyal.com/ultimate-guide-learn-all-about-jake-brake/>
- Допоміжна гальмівна система види і призначення. (н.д.). URL: <https://yak.koshachek.com/articles/dopomizhna-galmivna-sistema-vidi-i-priznachennja.html> (дата звернення: 22.08.2024). Dopomizhna halmivna sistema vydy i pryznachennia. (n.d.). Auxiliary braking system types and purposes. Retrieved August 22, 2024, from <https://yak.koshachek.com/articles/dopomizhna-galmivna-sistema-vidi-i-priznachennja.html> [In Ukrainian].
 - Der Retarder ist nicht nur eine Dauerbremse. (2021). Retrieved August 22, 2023, from <https://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/bremse/retarder.htm>
 - Product presentation TELMA. TL101018. (n.d.). Retrieved August 22, 2023, from <http://telmausa.com/Downloads/TL101018.pdf>
 - Paul, S., Farshadnia, M., & Pouramin, A. (2019). Comparative analysis of wave winding topologies and performance characteristics in ultra-thin printed circuit board axial-flux permanent magnet machine. *IET Electric Power Applications*, 13(5), 694–701.
 - Wang, X., Li, X., & Li, C. (2019). Design of a PCB stator coreless axial flux permanent magnet synchronous motor based on a novel topology Halbach array. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 20(3), 414–424.
 - Shen, Q., Yuan, X., & Chang, H. (2019). Four-phase flower-shape flexible stator winding of micro-motor. 2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), Glasgow, UK, pp. 1–3.
 - Neethu, S., Nikam, S. P., Pal, S., et al. (2020). Performance comparison between PCB-stator and laminated-core-stator-based designs of axial flux permanent magnet motors for high-speed low-power applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5269–5277.
 - Salim, N., Nikam, S. P., Pal, S., et al. (2019). Multiphysics analysis of printed circuit board winding for high-speed axial flux permanent magnet motor. *IET Electric Power Applications*, 13(6), 812–818.
 - Нечаус, А. О. (2022). Обґрунтування можливості модернізації бортового автомобільного електрообладнання шляхом застосування двигунів з друкованими обмотками. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» 21-22 листопада 2022 р. [Електронний ресурс]. Харків: ХНАДУ. С. 7–9. Nechaus, A. (2022). Obhruntuvannya mozhlivosti modernizatsii bortovoho avtomobilnoho elektroobladnannia shliakhom zastosuvannya dvyguniv z drukovanymi obmotkami. [Justification for the possibility of modernizing automotive on-board electrical equipment through the use of motors with printed windings.] Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Online Conference "Vehicle and Electronics. Modern Technologies," November 21–22, 2022. Kharkiv: KhNAHU. pp. 7–9. [in Ukrainian]
 - Lai, J., & Li, J. (2019). Analytical analysis of axial flux permanent magnet machines with air-gap winding. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, pp. 693–699.
 - Verbeek, N., & Dehez, B. (2019). Comparison of inner and outer rotor configurations in shotless PM machines with PCB windings. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, pp. 1–7.
 - Amin, S., Khan, S., & Bukhari, S. S. H. (2019). A comprehensive review on axial flux machines and its applications. 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, Pakistan, pp. 1–7.
 - Бороденко, Ю. М., Тимошевський, Д. С., Лойко, С. О., Петрушинський, А. Н. (2022). Технічне рішення електромагнітного ретардеру подвійної дії. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» 21-22 листопада 2022 р. Харків: ХНАДУ. С. 7–9. Borodenko, Yu., Tymoshevskiy, D., Loiko, S., & Petrushynskiy, A. (2022). Tekhnichne rishennia elektromahnitnoho retarderu podviinoi dii. [Technical solution for a dual-action electromagnetic retarder.] Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Online Conference "Vehicle and Electronics. Modern Technologies," November 21–22, 2022. Kharkiv: KhNAHU. pp. 7–9. [in Ukrainian]
 - Assembly formed by an electromagnetic retarder and its electric supply means. (2021). Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US4864173A/en>
 - TELMA electromagnetic braking axial retarders AX series. (2024). Retrieved from <https://www.oembusparts.com/products/chassis-component/retarder/telma-electromagnetic-braking-axial-retarders-ax-series.html>
 - Electric motor technology company YASA acquired by Mercedes-Benz. (2024). Retrieved from <https://www.businesswire.com/news/home/20210722005414/en/Electric-Motor-Technology-Company-YASA-Acquired-by-Mercedes-Benz>
 - Бороденко, Ю. М., Гнатов, А. В., Аргун, Ш. В. (2023). Мехатронні системи автомобіля: підручник. М-во освіти і науки України,

Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Ч.1: Силовий привід. Харків: Мачулін. 300 с. Borodenko, Yu., Hnatov, A., & Argun, Sh. (2023). Mekhatronni systemy avtomobilia: pidruchnyk [Mechatronic Systems of the Automobile: Textbook]. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv National Automobile and Highway University. Part 1: Powertrain. Kharkiv: Machulin. 300 p. [in Ukrainian]

Бороденко Юрій Миколайович¹, к.ф.-м.н.,
доцент кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: docentmaster@gmail.com,
тел.: +38 098-362-91-12,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2491-6799>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Double-action electrodynamic retarder system

Annotation. Problem: Issues related to increasing the performance characteristics of braking systems due to the use of car deceleration systems are considered. A structural analysis of car deceleration systems was performed according to a number of classification features: the system action mechanism; the principle of action and means of controlling the retarder; and the method of connecting the retarder brake. Ways of improving retarders based on the electrodynamic principle of construction are noted. The importance of improving the energy indicators of the pre-intermediate braking system due to the use of recuperative methods of self-sufficiency is emphasized. The **Relevance** of the study is determined by the increase in the number of motor vehicles involved in freight transportation in mountainous terrain. The **Goal** of the study is to improve the braking characteristics of the car's deceleration system under the conditions of a long descent.

The research **Methodology** includes the improvement of the retarder design and the scheme of the braking force control system. Based on the results of the study, a classification structure of car deceleration systems was compiled; a qualitative analysis of the technical and operational characteristics of the generator-type electromagnetic retarder with axial magnetic flux was made; a technical solution for an electrodynamic retarder is proposed, which comprises two electric machines that provide a double-action braking moment, using recovered energy. The need for a quantitative assessment of the power balance of the double machine's components is identified, which allows optimization of the mass-dimensional indicators of the combined unit for the determined braking force of the deceleration system. **Originality:** The trend of transforming the composition of the power plant of a car with a passive electromagnetic retarder into a moderate and even full hybrid scheme is highlighted. The **Practical Value** of the research is demonstrated through recommendations that can be useful in the design of new systems and adaptation of existing deceleration systems of motor vehicles, which are mainly operated in mountainous terrain.

Key words: deceleration system, electrodynamic retarder, brakes, recuperation of braking energy, electric machine with axial magnetic flux, transmission, energy balance.

Yuriy Borodenko¹, Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, Ph. D. (Phys.-Maht.), tel. 098-362-9112, e-mail: docentmaster@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2491-6799>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.