

Дослідження роботи системи гальмування з врахуванням зміни коефіцієнта зчеплення коліс електровозу з рейками

Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)
e-mail: speet@ukr.net

Кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті
ДВНЗ «Криворізький національний університет»
Кривий Ріг, Україна

Реферат—В статті розглянуті питання пошуку напрямків підвищення ефективності процесу функціонування тягових електроприводів з імпульсними системами регулювання напруги живлення тягових електродвигунів постійного струму в режимах гальмування двохосьових електровозів із мінімізацією проковзування коліс електровозу з рейками. Запропоновано багатфункціональний алгоритм роботи системи електричного гальмування, що ефективно діє до нульової швидкості електровозу з максимальним використанням гальмових властивостей тягового електропривода. Розроблено та рекомендовано для практичних досліджень математичну модель електричного гальмування, необхідну для оцінки рівня ефективності й доцільності застосування відповідної структури в конкретних умовах гальмування електрифікованого двохосьового транспортного засобу. Підтверджена шляхом моделювання ефективність пропонуємого варіанту розбудови структури тягового електропривода аналізованого вида електропотяга.

Бібл. 7, рис. 2

Ключові слова — тяговий електропривод; система гальмування; математична модель; електровоз.

I. ВСТУП

В останнє десятиріччя в ряді наукових учбових закладів та промислових підприємств України відновлювалися наукові дослідження по створенню енергоефективних тягових електроприводів (ТЕП) для двохосьових видів електровозів [1-5].

Важливим показником ефективності функціонування ТЕП є режим гальмування. На жаль, до аналізованого часу у відомих наукових розробках проблема ефективного електричного гальмування ТЕП до кінця не вирішена. Це ставить, в цілому, під сумнів впровадження нових ефективних електроприводів в практику створення сучасних видів двохосьових електровозів. Пов'язано це з рядом технологічних особливостей функціонування ТЕП двохосьових видів електропотягів, оскільки в цьому випадку структура електроприводу являє собою синтез двох локальних модулів, функціонуючих в межах єдиного електромеханічного комплексу – електровозу. При цьому кожна локальна складова частина ТЕП жорстко адресно з'єднана зі своєю колісною парою електровозу, що, в свою чергу, провокує виникнення різних рівнів навантажень на ці модулі по ряду можливих коливань коефіцієнту зчеплення тої чи іншої пари коліс (чи колеса) з рейками (рейкою). Зрозуміло, що за таких умов при переформатизації структури ТЕП в гальмівні режими, вони не можуть виглядати як очікувані по рівню ефективності. Тому задача пошуку та розробки ефективного

способу електричного гальмування в структурі ТЕП двохосьових видів електровозів виступає актуальною. Аналіз відомих, таких, що проводилися раніше, наукових пошуків варіантів вирішення цієї задачі [4] дозволили автору, базуючись на їх як позитивних, так і негативних результатах, вийти на наступний етап пошуку, який пропонується далі.

Як відомо [4], на вибір принципів побудови системи електричного гальмування накладає свої відбитки характер керування ТЕП і ступінь можливості автоматизації цього процесу. Існуючі системи гальмування двохосьових електровозів побудовані, як правило, на основі рекуперативно-реостатного й різного роду механічних видів гальмування, у результаті чого не повною мірою реалізуються можливості саме електричного гальмування ТЕП. Перехід з одного робочого режиму до іншого таких систем може здійснюватися ручним або напівавтоматичним керуванням. Але підтримка заданого режиму гальмування тягових електродвигунів за допомогою ручного керування неминуче призводить до істотного збільшення кількості апаратури, що коштує. Останнє, в умовах обмеженості габаритних показників даних типів електровозів, не вважається доцільним [5].

Між тим, застосування імпульсного керування рівнем напруги живлення ТЕД дозволяє змінити ступінь використання електричного виду гальмування, що компенсує недоліки одних за рахунок переваг



інших. При цьому необхідно враховувати особливості роботи системи широтно-імпульсного регулювання при керуванні відповідними режимами в конкретних умовах процесу гальмування двохосьових електровозів. Так, при гальмуванні треба враховувати, що коефіцієнт зчеплення коліс електровозу з рейками може змінюватись в залежності від умов експлуатації. Внаслідок чого можливо зменшення гальмового зусилля, що визначає зниження ефективності гальмування, а отже, збільшення гальмового шляху. Уникнути цього можливо за рахунок розробки алгоритму роботи системи керування електричним гальмуванням, що враховує зміну коефіцієнту зчеплення для різних умов шляхів відкочення. Для чого є доцільним доповнити існуючу систему керування гальмуванням двохосьових електровозів математичними виразами, які враховують зміну коефіцієнта зчеплення коліс електровозу з рейками.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

У матеріалі досліджень, що пропонується, в напрямку досягнення кінцевого результату — розробки системи електричного гальмування двохосьових електровозів, — в основу покладений принцип перемикачності ТЕД у найбільш ефективний режим функціонування, залежно від конкретних умов гальмування, коли в результаті у певні моменти часу відбуваються зміни в силовому колі ТЕП, по якому здійснюється регулювання струму гальмування, тобто змінюються параметри навантаження. У цьому випадку закон керування ТЕП і задані параметри імпульсного перетворювача напруги ТЕД виявляють безпосередній вплив на характер зміни вихідної величини (у цьому випадку середнє значення струму гальмування, його пульсації).

Ефективна робота системи керування (СК) можлива при визначенні критеріїв керування. На підставі аналізу режимів експлуатації двохосьових електровозів встановлено, що для зменшення проковзування коліс одним з ефективних способів є зниження навантаження на ТЕД [4]. При цьому повинна виконуватись умова:

$$V_t \approx V_s \quad (1)$$

Тобто швидкість проковзування коліс електровоза повинна прямувати до нуля. Це забезпечує повернення роботи ТЕП електровоза в зону пружного ковзання. Для забезпечення даної умови необхідно визначити ступінь зменшення навантаження ТЕД. Для залізничних видів транспорту найбільший вплив на коефіцієнт зчеплення виявляє стан (характер забруднення) поверхні рейок та швидкість ковзання (буксування) ведучих коліс щодо рейок.

Досвід експлуатації також підтверджує відоме положення, що реалізація сили тяги й сили гальмування завжди, як при малій, так і при великій дотичній силі супроводжується проковзуванням коліс ведучих або (гальмуючих) вісей щодо рейок: буксуванням при тязі й проковзуванням — при гальмуванні. При цьому максимальне значення струму не повинне перевищувати граничну величину за умовою зчеплення коліс електровозу з рейками. Величина мінімального

струму визначається жорсткістю характеристик гальмування ТЕД.

Складемо систему рівнянь, що пов'язує вихідні параметри привода електровозу, величину коефіцієнта зчеплення й параметри потяга за допомогою застосування енергетичних рівнянь Лагранжа другого роду [6]. При цьому будемо мати на увазі, що енергія, яка отримана від ТЕД, іде на переміщення потягу, буксування коліс електровоза й втрати в редукторі. Однак енергія на втрати по величині незначна в порівнянні з першими складовими, і нею можна знехтувати.

Тому відповідно до рівняння Лагранжа другого роду [6] маємо:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E_s}{\partial s_1} - \frac{\partial E_s}{\partial s_1} = -F_b - F_c, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E_t}{\partial s_2} - \frac{\partial E_t}{\partial s_2} = -F_c - \sum W, \quad (3)$$

де s_1, s_2 - узагальнені координати, рівні переміщенню колісних пар відносно рейкового шляху; E_s, E_t - відповідно, кінетична енергія ковзання й переміщення потяга.

Кінетична енергія:

$$E_s = \frac{M_r V_s^2}{2}, \quad (4)$$

$$E_t = \frac{M_t V_t^2}{2}, \quad (5)$$

Величини s_1 й s_2 мають той самий напрямок, що й швидкості потяга й ковзання. Вони так само незалежні від кінетичної енергії. Тому маємо:

$$\begin{cases} s'_1 = V_s \\ s'_2 = V_t \end{cases}, \quad (6)$$

Тоді вирази (2), (3) з обліком (4) - (6) приймуть вигляд:

$$M_r \frac{dV_s}{dt} = -F_b - F_c, \quad (7)$$

$$M_t \frac{dV_t}{dt} = -F_c - \sum W, \quad (8)$$

Якщо прийняти, що ТЕП електровоза працює в зоні пружних ковзань і величина швидкості проковзування набагато менша за швидкість потягу, що є характерним для рівномірного руху, то маємо рівняння руху потягу у відомій класичній формі запису [7], тобто:

$$M_t \frac{dV_t}{dt} = -F_c - \sum W, \quad (9)$$

Розглянемо процес керування ТЕП. При описі фізичних процесів робимо наступні допущення:

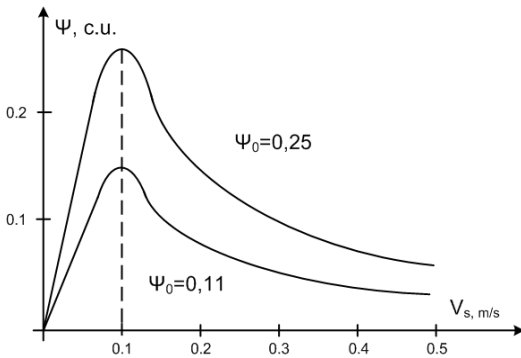


Рис. 1. Характеристики зчеплення коліс електровозу з рейками

- імпульсна СК замінена безперервною, тому що частота комутації струму ТЕД значно вище за частоту зрізу системи;
- центр ваги електровоза збігається із центром симетрії;
- розподілена маса рухомого складу замінена зосередженою;
- коефіцієнт зчеплення колісної пари з рейками залежить від швидкості буксування;
- при оцінці якісної сторони процесу реалізації сили гальмування, у зв'язку з порівняно невеликим значенням сили, що витрачається на подолання магнітних і механічних втрат у передачі, дотичну силу гальмування колісної пари приймаємо рівною електромагнітній силі гальмування:

$$F_t = F_e = \frac{2 \cdot M_e \cdot \rho}{D}, \quad (10)$$

де M_e – електромагнітний гальмовий момент, що обертає; ρ – передатне відношення редуктора; D – діаметр колеса.

Електричне коло ТЕД:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U + \rho \cdot \kappa \Phi \cdot (\omega_w - \omega_s) - I \cdot R}{L} \quad (11)$$

де $\kappa \Phi$, L , U , R – характеристика намагнічення, еквівалентна індуктивність, напруга та активний опір силового кола ТЕД відповідно; ω_w – кутова швидкість колісної пари електровозу при нормальному зчепленні; ω_s – кутова швидкість проковзування колісної пари.

Рівняння руху потягу при гальмуванні

$$J_\Sigma \cdot \frac{d\omega_w}{dt} = -\rho \cdot (\kappa \Phi \cdot I + \frac{D}{2 \cdot \rho} \cdot (P + Q) \cdot (W - i)), \quad (12)$$

де J_Σ – сумарний момент інерції потягу; P – вага електровоза; Q – вага завантаженого складу; W – основний питомий опір руху складу; i – опір руху від ухилу.

Відомо, що аналіз фізичних процесів, що протікають в електромеханічних тягових передачах електро-возів взагалі, а двохосьових зокрема, викликає ряд

ускладнень, тому при аналізі таких складних комплексів з імпульсними системами регулювання напруги живлення ТЕД систем з нелінійним навантаженням застосовують методи імітаційного моделювання. При створенні математичної моделі навантаження ТЕД зазвичай задаються значенням коефіцієнта зчеплення коліс із рейками Ψ залежно від швидкості ковзання V_s . Функціональний зв'язок між величинами Ψ і V_s є нелінійною залежністю. Зі збільшенням швидкості проковзування колісної пари V_s в невеликому інтервалі її зміни ($0 \leq V_s \leq V_{s1}$) відбувається лінійне зростання коефіцієнта зчеплення. Далі в інтервалі $V_{s1} < V_s \leq V_{s2}$ коефіцієнт зчеплення Ψ підвищується до максимального значення Ψ_0 . Сукупна ділянка характеристики зчеплення, що складається із двох перших інтервалів ($0 < V_s \leq V_{s2}$), становить стійку частину залежності $\Psi = f(V_s)$. При подальшому збільшенні кутової швидкості проковзування колісної пари в інтервалі $V_{s2} < V_s \leq V_{sb}$ відбувається інтенсивне зниження коефіцієнта зчеплення. Темп його зниження зі зростанням V_s падає (нестійка частина характеристики). Зазвичай залежність $\Psi = f(V_s)$ апроксимують. Відомо апроксимація двома та трьома ділянками [7]. Авторами пропонується цю залежність представити одним виразом, що суттєво спрощує побудову алгоритму керування гальмуванням:

$$\Psi = \Psi_0 \frac{V_{s2} \cdot V_s}{V_s^2 + V_{s2}^2}. \quad (13)$$

Момент опору, що діє з боку колісної пари й входить до рівняння коливачів кручення, визначається за виразом:

$$M_s = 0,5PD\Psi, \quad (14)$$

в якому P – навантаження на вісь колісної пари.

У якості ілюстрації на рис. 1 наведені характеристики зчеплення $\Psi = f(V_s)$ при двох потенційних (максимальних) значеннях коефіцієнта зчеплення Ψ_0 : при нормальному $\Psi_0=0,25$ (що відповідає доброму стану поверхні рейок і бандажів коліс) і зниженому $\Psi_0=0,11$ (рейки забруднені). Описана модель навантаження ТЕД дозволяє аналізувати процеси зчеплення при різних значеннях потенційного коефіцієнта Ψ_0 й імітувати процеси зриву зчеплення коліс електровозу із рейками.

Цікавим моментом в оцінці динаміки тягової системи електропотягу є визначення часу припинення проковзування коліс більш 0,1 m/s за умови сталості швидкості потяга. Це обумовлено тим, що зведені маси поступального руху потягу в порівнянні зі зведеною масою частин, що обертаються, становлять близько 95% [7].

Дослідження математичної моделі проводилось за допомогою відомих прикладних програм, таких, як MathCAD®, MATLAB®. Моделювання виконувалось стосовно обладнання конкретного типу електровозу — К14 з вагонетками ВГ9, які найчастіше використовуються на виробництві.

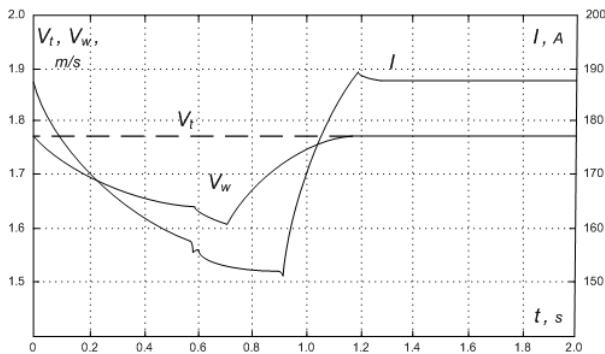


Рис. 2. Графік зміни швидкості поїзда, колісної пари й струму ТЕД при роботі в зоні надлишкового ковзання

Параметри електровозу, до яких відносяться: маса електровозу, тривале й годинне тягове зусилля, тривала й конструкційна швидкість, діаметр колеса, тривалий і годинний струм електровозу, постійні ТЕП. Зміна коефіцієнта зчеплення коліс електровозу з рейками приймалась відповідно до рис. 1, для різних умов експлуатації. Отримані залежності зміни швидкості поїзда при проковзуванні колісних пар та струму ТЕД в залежності від часу, при стрибкоподібному зменшенні коефіцієнта зчеплення коліс електровоза з рейками, при роботі в зоні надлишкового ковзання представлені на рис. 2.

Як видно з представлених графіків (рис. 2), при різкому зменшенні коефіцієнта зчеплення коліс електровоза з рейками відбувається зниження струму тягових двигунів і швидкості колісної пари при постійній швидкості поїзда. Відпрацьовування алгоритму гальмування призводить до зменшення навантаження на ТЕД. Внаслідок чого швидкість колісних пар електровозу зростає. При цьому час роботи повинен бути більшим або дорівнювати часу перехідного процесу.

На основі вищенаведених теоретичних міркувань був розроблений дослідницький макет ТЕП двоохосьових електровозів з пропонуємою структурою підсистеми гальмування ТЕД.

Підсистема керування електричним гальмуванням являє собою дискретну систему, алгоритм роботи якої полягає у фіксації мінімальної величини струму при роботі привода на заданій штучній електромеханічній характеристиці й фіксації максимального значення у момент переходу на суміжні штучні електромеханічні характеристики. При реалізації коефіцієнта зчеплення в зоні пружного ковзання це здійснюється по заданій програмі з контролем мінімального струму.

ВИСНОВКИ

- 1) Математичне моделювання підтвердило, що обраний напрямок розбудови системи електричного гальмування є ефективним і перспектив-

Надійшла до редакції

ним, тому що дозволяє максимально використувати технічні можливості ТЕД при реалізації зчіпних властивостей двоохосьових електровозів при гальмуванні в області низьких швидкостей руху.

- 2) Отримані математичні моделі режимів електричного гальмування ТЕД дозволяють оцінити доцільність і ефективність застосування того чи іншого алгоритму електричного гальмування для умов двоохосьових електровозів в різних експлуатаційних ситуаціях.
- 3) Розроблена математична модель електричного гальмування ТЕД для динамічних режимів може бути використана для складання взаємозалежних рівнянь динаміки потяга та формування необхідних характеристик гальмування із визначенням струму фіксації проковзування та величини швидкості проковзування.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] S. V. Leb'odkin, «Vuhil'na promyslovist' i perspektyvni napryamky rozvytku tyahovykh elektroprivodiv rudnykovykh elektrovoziv (Problemy i perspektyvy) [Coal industry and perspective directions of development of hauling electromechanics of mine electric locomotives(Problems,» *Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu. Zbirnyk naukovykh prats'*, vol. 4, pp. 12-15, 2004.
- [2] V. P. Stepanenko, «Povyshenie energoeffektivnosti i resursoberezheniya rudnichnogo elektrovoznogo transporta [Coal industry and perspective directions of development of hauling electromechanics of mine electric locomotives(Problems and prospects)],» *Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu. Zbirnyk naukovykh prats'*, т. 42, pp. 20-25, 2016.
- [3] O. Sinchuk, «Doslidzhennya energoeffektivnih rezhimiv rekuperativnogo galmuvannya tyagovykh asinhronnih chastotno-kerovanih elektroprivodiv [Examining energy-efficient recuperative braking modes of traction asynchronous frequency-controlled electric drives],» *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, т. 1, № 85, pp. 50-56, 2017. DOI : [10.15587/1729-4061.2017.91912](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91912)
- [4] O. N. Sinchuk, *Kombinatorika preobrazovateley napryazheniya sovremenyh tyagovykh elektroprivodov rudnichnykh elektrovozov [Combinatorics of transformers of tension of modern hauling electromechanics of mine electric locomotives]*, Kyiv: IEDNANU, 2006, p. 252.
- [5] «Zavod Amplituda LLC,» [В Інтернеті]. Available: <http://amplituda.com.ua/>.
- [6] M. Y. Vyigodskiy, *Spravochnik po vyishey matematike [Reference book on higher mathematics]*, Moscow, 1977, p. 871.
- [7] D. A. Shokarev, «Kontaktно-akkumulyatornyiye shahtnyiye elektrovoz s tyagovym elektrotehnicheskim kompleksom IGBT – inverter – asinhronnyy dvigatel [A Pin-storage-battery mine electric locomotive with a hauling electrical engineering complex IGBT is a negator - asynchronous,» *Visnyk ShkldnoukraYinskogo natsionalnogo unIversitetu ImenI V. Dalya. Naukoviy zhurnal*, т. 158, № 4, pp. 172-178, 2011.

УДК 621.337.52

Исследование работы системы торможения с учетом изменения коэффициента сцепления колес электровоза с рельсами

Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)e-mail: speet@ukr.net

Кафедра автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»
Кривой Рог, Украина

Реферат—В статье рассмотрены вопросы поиска направлений повышения эффективности процесса функционирования тяговых электроприводов с импульсными системами регулирования напряжения питания тяговых электродвигателей постоянного тока в режимах торможения двухосных электровозов с минимизацией проскальзывания колес электровоза с рельсами. Предложен многофункциональный алгоритм работы системы электрического торможения, который эффективно функционирует до нулевой скорости электровоза с максимальным использованием тормозных свойств тягового электропривода. Разработано и рекомендовано для практических исследований математическую модель электрического торможения, необходимую для оценки уровня эффективности и целесообразности применения соответствующей структуры в конкретных условиях торможения электрифицированного двухосного транспортного средства. Подтверждена путем моделирования эффективность предложенного варианта развития структуры тягового электропривода анализируемого вида электропоезда.

Библ. 7, рис 2.

Ключевые слова — тяговый электропривод; система торможения; математическая модель; электровоз.

UDC 621.337.52

Research of work of retrosystem taking into account the change of coefficient of coupling of wheels of electric locomotive with rails

D. O. Kalmus, ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)e-mail: speet@ukr.net

Department of automation electromechanical systems in the industry and vehicles
State institution of higher education «Kryvyi Rih National University»
Kryvyi Rih, Ukraine



Abstract—In the article the questions of increase of efficiency of work of hauling electric drives are considered with the impulsive systems of adjusting of tension of hauling electric engines of direct-current in the modes braking of electric locomotives with two axes during minimization of slipping of wheels of electric locomotive with rails. The algorithm of work of the system of the electric braking is offered, that effectively functions to a zero speed of electric locomotive with the maximal use of brake properties of hauling electric drive. It is worked out and recommended for practical researches mathematical model of the electric braking, necessary for the estimation of level of efficiency and expediency of application of corresponding structure in the concrete terms of braking of the electrified transport vehicle. Efficiency of the offered variant of development of structure of hauling electric drive is confirmed by a design.

Ref. 7, fig. 2.

Keywords — hauling electric drive; braking system; mathematical model; electric locomotive.