

УДК 621.337

Дослідження динаміки систем електроприводу для шахтних електровозів в умовах залізорудних підприємств

Сьомочкин А. Б., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-3592-7899](https://orcid.org/0000-0002-3592-7899)e-mail syomochkyn@gmail.comФедотов В. О., ORCID [0000-0002-6536-5591](https://orcid.org/0000-0002-6536-5591)e-mail vladfa@gmail.comКальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)e-mail dmitriy_kalmus@ukr.netДВНЗ «Криворізький національний університет»
Кривий Ріг, Україна

Реферат—У статті наведені результати дослідження трьох систем електроприводу шахтного електровозу типу 14КА – штатної системи релейно-контакторного керування швидкістю двигуна постійного струму, системи широтно-імпульсний перетворювач – двигун постійного струму з релейним регулятором, і системи перетворювач частоти – асинхронний двигун з векторним керуванням. Важливим критерієм при визначенні ефективності роботи електровозу є точність стабілізації його швидкості відповідно заданої трикутної тахограми руху. Дослідження проводились за допомогою імітаційного моделювання. При моделюванні був врахований вплив властивостей зчіпних пристроїв – значна величина зазору (до 0,2 м), і наявність пружних амортизаторів. Було встановлено, що через зазори, які спочатку були зімкнуті, при розгоні (гальмуванні) у зчіпних пристроях виникають значні пружні зусилля. Найбільший прояв дії цих пружних зусиль можна побачити на прикладі системи з релейно-контакторним керуванням, оскільки швидкість електровозу значно відхиляється від заданої. При використанні системи векторного керування швидкість електровозу відхиляється незначно, а при використанні релейного регулятора швидкість електровозу практично збігається із заданою тахограмою руху. Останнє дає підставу при частковій модернізації електроприводу електровозу, без необхідності заміни тягового двигуна, рекомендувати впровадження релейного регулятора швидкості, як рішення, що дозволяє досягти високої точності стабілізації швидкості.

Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова — шахтний електровоз; зчіпний пристрій; точність; стабілізація швидкості.

I. ВСТУП

Робота шахтних електровозів відбувається у специфічних умовах [1] – [4]. Також слід зазначити, що вагонетки з'єднані з електровозом та одна з однією зчіпними пристроями зі значними зазорами (до 0,2 м кожний) та пружними амортизаторами [5]. Схематичне зображення рухомого складу зі зчіпними пристроями наведено на рис. 1.

Така конструкція зчіпних пристроїв призначена для забезпечення перевертоту вагонеток при розвантаженні в шахтному перекидачі. З іншого боку, наявність зазорів у зчіпних пристроях ускладнює умови дослідження перехідних процесів при роботі шахтного рухомого складу. По-перше, пружні удари в зчіпних пристроях можуть значно перевищувати номінальні значення [6], по друге, наявність зазорів ускладнює процес позиціонування вагонеток при розвантаженні (завантаженні), коли вагонетки рухомого складу пересуваються електровозом на короткі відстані [7].

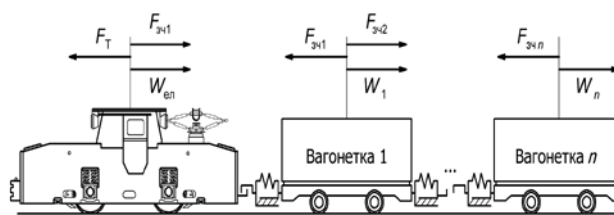


Рис. 1. Шахтний рухомий склад зі зчіпними пристроями

Метою роботи є дослідження різних систем приводу електровозу з погляду відхилення його швидкості від заданої тахограми руху, яка обумовлена точністю переміщення вагонеток на задану відстань, при наявності пружних ударів по електровозу з боку вагонеток.

II. МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводились за допомогою імітаційного моделювання. Між собою порівнювались штатна система електроприводу електровозу з релейно-



контакторним керуванням, система широтно-імпульсний перетворювач - двигун (ШПД) з релейним регулятором швидкості та система перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД) з векторним керуванням.

На рис. 2 наведена імітаційна модель для дослідження динаміки на прикладі рухомого складу з електровозу й чотирьох вагонеток, де: EMS – модель електромеханічної системи електровозу; Sostav1 – модель рухомого складу з чотирьох вагонеток, в якій $Fu1 \div Fu4$ – пружні зусилля в зчіпних пристроях рухомого складу, V – швидкість електровозу, $V1 \div V4$ – швидкості вагонеток, $Zazor1 \div Zazor4$ – величини зазорів в зчіпних пристроях рухомого складу, S – величини переміщень вагонеток разом з електровозом.

Для моделювання електромеханічної системи електровозу використовувались відомі імітаційні моделі для двигунів постійного струму послідовного збудження та асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором [8], [10]. Блок Signal Builder формує задану тахограму руху електровозу. Для формування тахограми руху при дослідженні релейно-контакторної системи керування використовувались алгоритм та програма перемикачів [1]. Для дослідження систем ШПД та ПЧ-АД використовувалась трикутна тахограма швидкості. При моделюванні системи електропривода з ШПД та релейним регулятором швидкості було отримано графік швидкості електровозу, що наведено на рис. 3. Максимальне абсолютне відхилення швидкості електровозу від заданої тахограми на останніх 4 секундах гальмування складає 0,0002 м/с (або 0,09% від поточного значення швидкості).

Якщо в якості електромеханічної системи використовується релейно-контакторна система, як та що встановлена на електровозі 14КА, то в ній сформувати трикутну тахограму швидкості не можливо, оскільки керування в такій системі здійснюється безпосереднім перемиканням додаткових резисторів у колі якоря [8], [9].

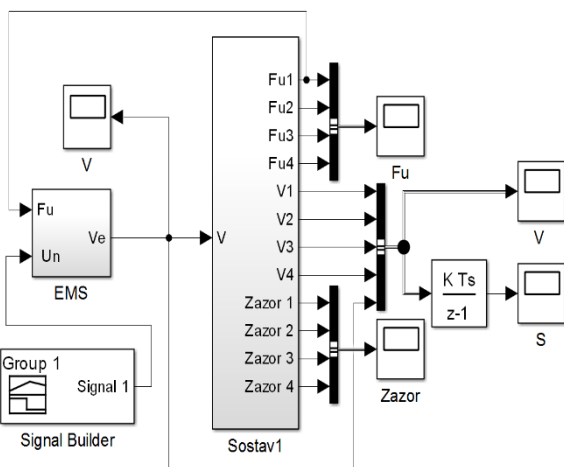


Рис. 2. Імітаційна модель 4-вагонного рухомого складу з електровозом

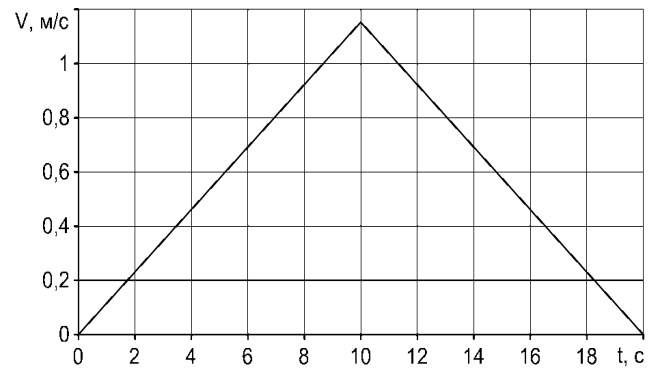


Рис. 3. Графік швидкості електровозу в системі ШПД з релейним регулятором

На рис. 4 наведено графік швидкості електровозу при перемиканні двох щаблів контролера при розгоні та гальмуванні. Слід відмітити значні коливання швидкості електровозу, які ускладнюють точне керування переміщенням вагонеток і пояснюються тим, що при розгоні (гальмуванні) вагонетки рушають із пружними ударами й потім наздоганяють одна одну, також із пружними ударами, що ілюструється графіком пружних зусиль у зчіпних пристроях, який наведено на рис. 5. На графіку суцільна лінія – це пружні зусилля у зчіпних пристроях електровозу, пунктирна лінія відповідають пружним зусиллям у зчіпних пристроях останніх 3-х вагонеток.

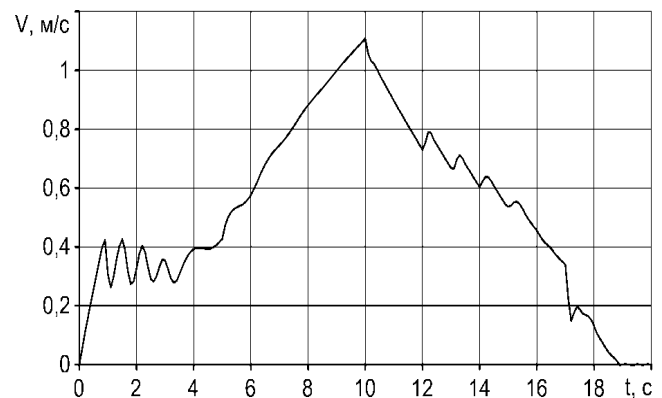


Рис. 4. Графік швидкості електровозу з релейно-контакторною системою

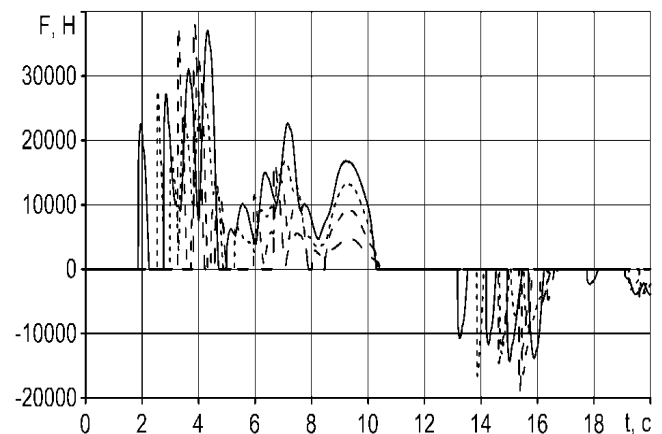


Рис. 5. Графіки пружних зусиль у зчіпних пристроях електровозу й вагонеток

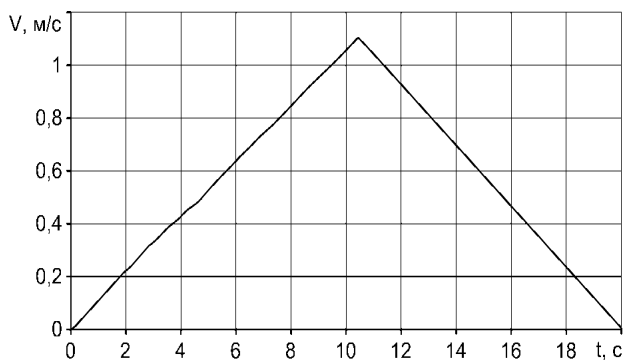


Рис. 6. Графік швидкості електровозу з векторним керуванням за системою ПЧ-АД

Пружні зусилля в зчіпних пристроях розраховуються за виразом [6]:

$$F_u = 7119,6 + 791,9 \cdot J + 0,035 \cdot F_m - 3669 \cdot Z - \\ 15,7 \cdot J^2 + 110,8 \cdot F_m^2 - 640,4 \cdot Z^2 + \\ 110,8 \cdot M^2 - 0,04 \cdot J \cdot F_m - 452,6 \cdot J \cdot Z,$$

де Z , M , J , F_m – у відносних одиницях відповідно значення зазору в зчіпних пристроях, маса вагонетки, прискорення та тягове зусилля електровозу при пуску.

З графіку (рис. 3) видно, що при роботі електроприводу за системою ШПП-Д з релейним регулятором швидкості удари в зчіпних пристроях практично не позначаються на швидкості електровозу, що є перевагою зазначеної системи.

Якщо використовується система ПЧ-АД з векторним керуванням [10], то одержимо графік швидкості електровозу, що показано на рис. 6.

Графік швидкості електровозу при скалярному керуванні у системі ПЧ-АД наведено на рис. 7.

На графіку (рис. 6) абсолютне відхилення швидкості електровозу від заданої тахограми досягає 0,003 м/с у момент часу 4,2 с (або 0,6% від поточного значення швидкості), тобто майже в 15 разів більше ніж у системі ШПП-Д з релейним регулятором.

Як видно з рис. 7, швидкість електровозу, під дією ударів вагонеток, коливається сильніше, чим при векторному керуванні, абсолютне відхилення швидкості досягає 0,05 м/с (або 17 % від поточного значення швидкості), що в 250 разів більше ніж у системі ШПП-Д, та в 15 разів більше, ніж при векторному керуванні.

ВИСНОВКИ

- 1) Встановлено, що через наявність значних зазорів у зчіпних пристроях рухомого складу, виникають пружні зусилля, через що швидкість електровозу відхиляється від заданого значення. Найбільше відхилення швидкості спостерігається у системі з релейно-контакторним керуванням, а у системі ШПП-Д з релейним регулятором швидкість електровозу практично збігається із заданою тахограмою руху.

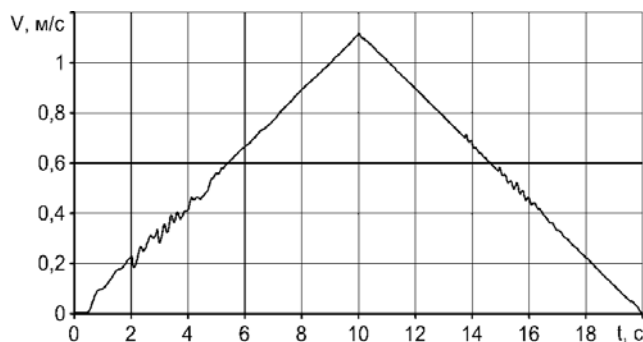


Рис. 7. Графік швидкості електровозу при скалярному керуванні у системі ПЧ-АД

- 2) Рекомендована часткова модернізація електроприводу електровозу з впровадженням релейного регулятора швидкості, як рішення, що дозволяє досягти високої точності стабілізації швидкості без необхідності заміни тягового двигуна.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] S. A. Volotkovskiy, *Rudnichnaya elektrovoznaya tyaga [Mine electric draft]*. Moscow: Nedra, 1981.
- [2] I. O. Sinchuk, I. V. Kasatkina, A. N. Yalovaya, and N. N. Yurchenko, "Otsenka napravleniy povysheniya energoeffektivnosti dobyichi zhelezorudnogo syrya podzemnyim sposobom [Estimation of directions of increase of energy efficiency of extraction of iron ore raw materials by underground method]," *Visn. Krivoriz. natsionalnogo Univ.*, vol. 42, no. Krivoy Rog, pp. 145–151, 2016, URL: <http://visnykknknu.com.ua/wp-content/uploads/file/42/BKHY-42.pdf>.
- [3] I. O. Sinchuk and D. O. Kalmus, "Doslidzhennya vplivu kolivan ta korotkochasnihih zniknen naprugi zhivlennya rudnikovogo elektrovoza na robotu elektrichnogo privoda v rezhimi galmuvannya [Investigation of the influence of oscillation and short-term power supply of the mine electric locomot]," *Elektronika ta zv'yazok. Nauk. zhurnal*, vol. 21, no. 5, pp. 31–37, 2016, DOI: <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.5.81917>.
- [4] I. O. Sinchuk, "Analiz anomalnyih situatsiy v asinhronnyih tyagovyih elektroprivodah rudnichnyih kontaktnyih elektrovozov [Analysis of abnormal situations in asynchronous traction electric drives of mine contact electric locomotives]," *Visn. Natsionalnogo Teh. Univ. «HPI» Zh. Nauk. Pr.*, vol. 30, no. Harkiv, pp. 365–367, 2008.
- [5] I. O. Sinchuk, E. S. Guzov, V. L. Debelyiy, and L. L. Debelyiy, *Shahtnyiy elektrovoznyyi transport. Teoriya, konstruktstii, elektrooborudovanie [Shaft electric transport. Theory, construction, electrical equipment]*. Kremenchug, 2015, ISBN: 978-617-639-081-7.
- [6] O. N. Sinchuk, A. B. Syomochkin, and V. A. Fedotov, "Otsenka vliyaniya faktorov na predelnuyu velichinu udarnogo usiliya v stepnom ustroystve pri peremeschenii paryi «elektrovoz-vagonetka» pri razlichnyih sposobah upravleniya elektrovozom [Estimation of the influence of factors on the limiting value of the]," *Visn. Natsionalnogo Teh. Univ. «Harkivskiy Politeh. institut»*, vol. 12, no. Harkov, pp. 251–256, 2015, URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/20492/1/vestnik_KhPI_2015_12_Synchuk_Otsenka.pdf.
- [7] I. O. Sinchuk, A. B. Syomochkin, and V. A. Fedotov, "O printsipah minimalno so-udaryaemogo i maksimalno tochnogo upravleniya peremescheniem vagonetok rudnichnyih elektrovozostavov [On the principles of minimally collision and the most accurate control of the movement of trolleys of mine electric locomoti]," *Visn. Krivoriz. natsionalnogo Univ.*, vol. 42, no. Krivoy Rog, pp. 73–77, 2016, URL: <http://visnykknknu.com.ua/wp-content/uploads/file/42/BKHY-42.pdf>.
- [8] O. N. Sinchuk et al., *Kombinatorika preobrazovately napryazheniya sovremennyih tyagovyih elektroprivodov*



- rudnichnykh elektrovozov [Combinatorics of voltage converters of modern traction electric drives of mine electric locomotives]. Kyiv: IEDNANU, 2006, ISBN: 966-02-4067-8.
- [9] B. N. Tihmenev and L. N. Trahtman, Podvizhnyiy sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Rolling stock of electrified railways]. Moscow: Transport, 1980.
- Надійшла до редакції 25 травня 2018 р.
- [10] V. A. Eliseev, Sistemy nepreryivnogo upravleniya elektroprivodov peremennogo toka [Systems of continuous control of AC drives]. Moscow: MEI, 1985.

УДК 621.337

Исследование динамики систем электропривода для шахтных электровозов в условиях железорудных предприятий

Семочкин А. Б., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-3592-7899](https://orcid.org/0000-0002-3592-7899)

e-mail syomochkyn@gmail.com

Федотов В. А., ORCID [0000-0002-6536-5591](https://orcid.org/0000-0002-6536-5591)

e-mail vladfa@gmail.com

Кальмус Д. О., ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7604-8631>

e-mail dmitriy.kalmus@ukr.net

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

Кривой Рог, Украина

Реферат—В статье приведенные результаты по исследованию трех систем электропривода шахтного электровоза типа 14КА – штатной системы релейно-контакторного управления скоростью двигателя постоянного тока, системы широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока с релейным регулятором, и системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель с векторным управлением. Важным критерием при определении эффективности работы электровоза является точность стабилизации его скорости в соответствии с заданной треугольной тахограммой движения. Исследования проводились с помощью имитационного моделирования. При моделировании было учтено влияние свойств сцепных устройств – значительная величина зазора (до 0,2 м), и наличие упругих амортизаторов. Было установлено, что из-за зазоров, которые в начале сомкнуты, при разгоне (торможении) в сцепных устройствах возникают значительные упругие усилия. Самое заметное проявление действия этих упругих усилий можно видеть на примере системы с релейно-контакторным управлением, поскольку скорость электровоза значительно отклоняется от заданной. При использовании системы векторного управления скорость электровоза отклоняется незначительно, а при использовании релейного регулятора скорость электровоза практически совпадает с заданной тахограммой движения. Последнее дает основание при частичной модернизации электропривода электровоза, без необходимости замены тягового двигателя, рекомендовать внедрение релейного регулятора скорости, как решение, которое позволяет достичь высокой точности стабилизации скорости.

Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова — шахтный электровоз; сцепляющее устройство; точность, стабилизация скорости.



UDC 621.337

Research of Dynamics of the Systems of Electric Drive for Mine Electric Locomotives in the Conditions of Iron-Ore Enterprises

A. B. Somochkyn, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-3592-7899](https://orcid.org/0000-0002-3592-7899)

e-mail syomochkyn@gmail.com

V. O. Fedotov, ORCID [0000-0002-6536-5591](https://orcid.org/0000-0002-6536-5591)

e-mail vladfa@gmail.com

D. O. Kalmus, ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)

e-mail dmitriy_kalmus@ukr.net

State institution of higher education «Kryvyi Rih National University»
Kryvyi Rih, Ukraine

Abstract—In the article it is marked that work of mine electric locomotives takes place in specific terms. It is related to that the presence of gaps in coupling devices complicates the terms of flowing of transients in mine composition, and resilient shots in coupling devices can considerably exceed basic values. It is similarly marked that the presence of gaps complicates positioning of trolleys at unloading - loading, when the trolleys of composition move an electric locomotive on short distances. In the article the brought results of research of three systems of electric drive of mine electric locomotive of type of 14KA - regular system of the Relanium management by speed of engine of direct-current, systems an impulsive transformer is an engine of direct-current with a relay regulator, and systems a transformer of frequency is an asynchronous engine with a vectorial management. Exactness of support of speed of electric locomotive is select the criterion of comparison according to the set three-cornered diagram of motion. A research was conducted by facilities of mathematical design. At a design influence of properties of the coupled devices - considerable size of gap(to 0,2 meters), and presence of resilient shock absorbers was taken into account. The considerable shuttles of electric locomotive are explained by that at an acceleration - braking of trolley leave with resilient shots and then go after each other, and also with resilient shots. It was taken into account that engine of electric locomotive - direct-current series-wound, id est has soft electromechanics description. It was set that gaps that at first were serried, at an acceleration - braking create considerable resilient efforts. The greatest influence these resilient efforts render on the system with the Relanium management, considerably revolting speed of electric locomotive. It is set that stabilizing of speed mine to the electric locomotive in the dynamic modes worse in the system of vectorial management, what in the system with the relay regulator of speed. At the use of the systems of vectorial management speed of electric locomotive is indignant insignificantly, and at the use of relay regulator speed of electric locomotive is not indignant practically. The last grounds at a necessity partial modernisation of electric drive of electric locomotive without re-engining to recommend introduction of relay regulator of speed, as decision that allows to attain high exactness of stabilizing of speed.

Bibl. 10, pic. 7.

Keywords — mine electric locomotive; coupling device; exactness, stabilizing of speed.

