

# До питання ефективності функціонування тягового електромеханічного комплексу шахтного електровозу в режимі гальмування

Сінчук І. О., к.т.н, доц., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)

e-mail: [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net)

Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)

e-mail: [dmitriy\\_kalmus@ukr.net](mailto:dmitriy_kalmus@ukr.net)

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

**Реферат**—В статті розглянуті питання підвищення ефективності процесу гальмування тягових електродвигунів постійного струму з імпульсними системами регулювання напруги живлення. Розглянуто електромагнітні процеси в електроприводі шахтного електровозу при електродинамічному гальмуванні тягових двигунів, коли швидкість шахтного електровозу та напруга на його пантографі прямують до нульових значень, і конденсатор вхідного фільтра підзаряджається за рахунок енергії гальмування в кожному імпульсному циклі. Встановлено залежності між величиною накопичувальної ємності конденсатора, що згладжує, індуктивності вхідного фільтра й граничними значеннями відхилень напруги живлення оперативних кіл імпульсної системи керування. Отримано залежності максимально допустимої потужності, що споживає система керування, що забезпечується енергією гальмування тягових електричних двигунів. Розроблено математичну модель, що дозволяє оцінити роботу системи електродинамічного гальмування при низькій швидкості руху шахтних електровозів й тимчасовій несанкціонованій відсутності напруги в мережі живлення.

Бібл. 9, рис. 5.

**Ключові слова** — тяговий електропривод; гальмування; математична модель; потужність.

## I. Вступ

Контакторно-резисторні тягові електромеханічні системи шахтних електровозів, які експлуатуються, не відповідають сучасним потребам по енергетиці та за потенціалом можливостей очікуваного підвищення рівня функціонування можливостей даних видів потягів [1, 2]. В останні роки в Україні відновились дослідження в напрямку створення сучасних ефективних тягових електромеханічних комплексів (ТЕМК) на основі імпульсних перетворювачів електричної енергії з мікропроцесорними системами керування, в тому числі для контактних — основних видів шахтних електровозів [3-5]. Між тим, якісне функціонування таких систем значною мірою залежить від рівнів коливань напруги живлення в тяговій контактній мережі і особливо при несанкціонованому зникненні електроживлення через порушення контакту між контактним дротом (КД) та пантографом електровоза. На жаль, можна констатувати, що в режимі функціонування внутрішньошахтного транспорту (ВШТ) спостерігаються постійні коливання напруги живлення в контактній мережі в діапазонах 15-35 % від номінальної та значні за кількістю відриви пантографа від КД [7]. При цьому деякий час (8-10 s) система керування «живиться» за рахунок енергії заряду конденсатора вхідного фільтра. Однак тривалі зник-

нення напруги ведуть до втрати керованості електропривода, виключаючи таким чином в цей момент можливість переведення тягових електричних двигунів (ТЕД) у режим гальмування, що у випадку екстреного гальмування може привести до аварійної ситуації.

На практиці, в силу специфіки технології ведення гірничих робіт, повністю усунути це негативне явище — втрату контакту зі струмоприймачем електровозу — неможливо. Тут мається на увазі, що в будь-якому випадку не виключається можливість наявності однієї або декількох причин зниження рівня напруги живлення.

Таким чином зникнення та зниження напруги живлення, що виникають під час руху шахтних електровозів, в цілому можуть служити і служать причиною неможливості переведення електропривода в режим гальмування, що суттєво знижує надійність і ефективність гальмування тягового електропривода з імпульсними системами живлення ТЕД [8].

Як відзначалось, для короткочасної підтримки рівня напруги на вході схеми ТЕМК при втраті контакту КД — пантограф електровозу як в режимі тяги, так і в режимі гальмування застосовують конденсатори [9]. При цьому важливо правильно вибрати ємність конденсатора, особливо для режиму гальмування. Пов'язано це з тим, що найбільші труднощі при



здійсненні гальмування контактних шахтних електровозів виникають при низькій частоті обертання тягових двигунів і за відсутності напруги на струмознімачі. Відомі декілька шляхів розв'язання вищепоставленого завдання [9]. Проте існуючі системи гальмування тягового приводу шахтних електровозів з імпульсним регулюванням напруги живлення не повною мірою відповідають вимогам, що накладаються специфікою ВШТ. Так, наприклад, розв'язок багатьох питань по автоматизації процесів керування, забезпеченню безпеки руху, підвищенню ефективності й надійності на електричних потягах з важкими шахтними електровозами (зчїпна вага 28 т і більше) зводиться до установки дроселів, що згладжують, автономних джерел живлення оперативних кіл та системи керування (акумуляторів, спеціальних генераторів напруги) тощо.

На шахтних видах і типах електровозів відсутній вільний простір для розміщення додаткового електроустаткування. Це спонукає до пошуку відповідних шляхів підвищення ефективності функціонування систем керування шахтних електровозів, розробки нових прогресивних способів керування [9].

Тому надалі слід враховувати, що підвищення ефективності функціонування приводу шахтних електровозів в режимі гальмування не повинно супроводжуватися значним збільшенням габаритів системи, а також що перехід тягових двигунів у режим гальмування й сам процес гальмування повинні здійснюватися з мінімальними втратами часу.

Звести до мінімуму негативний ефект від провалів напруги живлення на струмознімачі шахтних електровозів можна шляхом вдосконалення, а також розробки нових способів керування, побудованих на використанні енергії накопичувальних конденсаторів вхідних фільтрів, енергії електричних машин, що обертаються (наприклад, у цьому випадку енергії тягових двигунів). Такий напрямок розв'язку питання є досить економічним, тому що не вимагає застосування додаткового силового електроустаткування та збільшення пов'язаних із цим експлуатаційних і питомих капітальних витрат.

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Час, впродовж якого система керування ТЕМК електровозу працює за рахунок енергії, запасеної конденсатором  $C_f$ , при зниженні напруги на ньому від деякого рівня  $U_c$  до рівня  $U_1$  (рис.1), повинен вибиратися з умов забезпечення працездатності системи керування при зникненні напруги на струмоприймачі, що виникають при проїздах ізольованих частин КД, а також інших короточасних порушеннях контакту "струмознімач – контактна мережа".

На сучасних контактних шахтних електровозах в системі вторинного електроживлення у якості джерела оперативної напруги використовують імпульсні перетворювачі, які стабілізують постійну напругу [9]. Тому при зниженні напруги струм розряду конденсатора (струм, що споживає система керування) підтримується на постійному рівні. Зміну напруги на конденсаторі можна визначити з виразу:

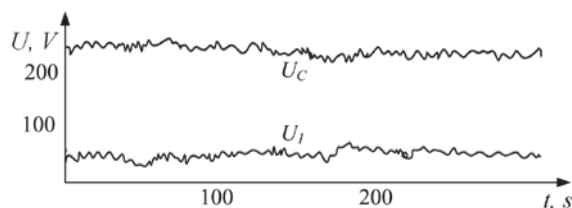


Рис. 1 Діаграма напруги на конденсаторі вхідного фільтру шахтного електровозу під час його руху магістральними шляхами

$$U_c(t) = U_c - \frac{1}{C_f} \cdot \int i_n dt, \quad (1)$$

де  $C_f$  – ємність конденсатора вхідного фільтру.

З рівняння (1) можна визначити час роботи системи керування за рахунок енергії конденсатора  $C_f$  при його розряді від одного рівня напруги до іншого:

$$t_{d1} = \frac{C_f \cdot (U_c - U_1)}{i_n}. \quad (2)$$

Значення другого рівня напруги обирається з розрахунку, що система керування не повинна реагувати на максимальні коливання напруги  $\Delta U_{cf \max}$ , що є результатом імпульсного регулювання тягових двигунів і зниження напруги в рейках та контактному дроті при піковому навантаженні під час пуску електровозів, що перебувають наприкінці лінії. Отже:

$$U_1 = (k_1 \cdot U_n - \frac{\Delta U_{cf \max}}{2}) \cdot k_2, \quad (3)$$

де  $k_1 = 0,6 \div 0,7$  – коефіцієнт, що враховує зниження напруги в рейках та контактному дроті для випадку максимального пікового навантаження при пуску електровозів, що перебувають наприкінці лінії;  $U_n$  – номінальна напруга на шинах підстанцій;  $k_2$  – коефіцієнт, що дозволяє виключити неправильні спрацювання системи керування по здійсненню вільного вибігу тягових двигунів при нижньому рівні пульсацій напруги. Визначається експериментально.

За даними лабораторних і промислових випробувань шахтних електровозів з імпульсним регулятором,  $k_2$  перебуває в межах:  $0,95 \div 1$ .

Значення рівня  $U_1$  обирається з огляду на технічні характеристики джерела оперативної напруги, комутаційної апаратури (проміжні реле схеми керування, силові контактори тощо) і повинно відповідати умові:

$$U_1 \leq U_c - \frac{t_{d1} \cdot i_n}{C_f}, \quad (4)$$

$t_{d1}$  стосовно до шахтного електровозного відкочування приймається в межах:  $3 \div 5$  s [7].

Ємність конденсатора, як і індуктивність вхідного фільтру, визначаються по одній з відомих методик [6], в залежності від обраного критерію.



У цей час найбільш широко застосовується Г-подібний індуктивно-ємнісний LC-фільтр, який встановлюється на вході перетворювача. Згладжування пульсацій первинної складової струму необхідно, щоб уникнути впливу на лінії зв'язку.

Індуктивність та ємність вхідного фільтра обирають з таким розрахунком, щоб пульсації струму навантаження й струму мережі живлення були незначними, тому ними можна знехтувати при визначенні пульсацій напруги на конденсаторі  $C_f$ .

Ємність  $C_f$  повинна бути достатньою, щоб забезпечити такий рівень пульсацій напруги на обкладках, при якому не виникає перегрів конденсатора. При заданих максимальних коливаннях напруги і струму на вході фільтра мінімальна ємність фільтра [7, 9]:

$$C_f \geq \frac{I}{4 \cdot f \cdot \Delta U_{cf \max}}, \quad (5)$$

а також мінімальна індуктивність:

$$L \geq \frac{I}{32 \cdot C_f \cdot f^2 \cdot \Delta I_{\max}}, \quad (6)$$

де  $f$  – частота імпульсного регулювання.

При цьому власна частота фільтра:

$$f_{cf} \leq 0,9 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{\Delta I_{\max}}{I}}.$$

З (4) і (5) маємо максимальне значення рівня напруги для мінімально припустимої ємності  $C_f$ :

$$U_1 \leq U_c - \frac{t_{d1} \cdot i_n \cdot 4 \cdot f \cdot \Delta U_{cf \max}}{I}. \quad (7)$$

Для реалізації ефективного режиму електричного гальмування двигунів доцільним є спільне використання противмикання й електродинамічного гальмування, при цьому необхідною умовою є наявність основного джерела живлення. Тому в умовах контактної електровозного відкочування, де можливі значні відхилення рівня напруги живлення від номінального значення, доцільним є резервування відзначеного способу гальмування електродинамічним, досить ефективним для електричної тяги.

У даній ситуації необхідно розглянути електромагнітні процеси в електроприводі при електродинамічному гальмуванні тягових двигунів, коли швидкість шахтного електровозу прямує до нульової, напруга на струмомірячі  $U_p = 0$  і конденсатор вхідного фільтра  $C_f$  заряджається за рахунок енергії гальмування в кожному імпульсному циклі.

Для цього імпульсний стабілізатор напруги кіл керування й його навантаження представимо як нелінійний опір, що змінюється у функції напруги на конденсаторі вхідного фільтра при заданій потужності, що споживає система керування. Також будемо вважати, що конденсатор вхідного фільтра не розряджається на мережу живлення.

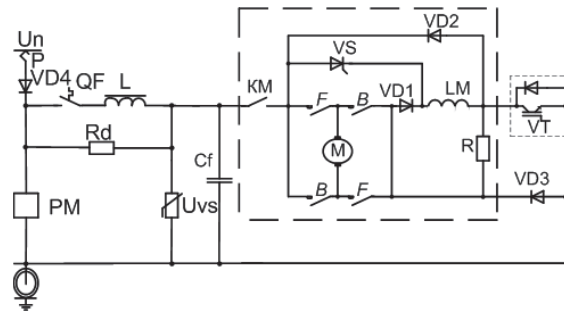


Рис. 2 Схема тягового електроприводу з імпульсним регулюванням напруги

Для опису електромагнітних процесів при використанні енергії гальмування двигунів для живлення кіл керування електроприводу (рис.2) треба скласти схему заміщення.

Схема (рис. 2) містить автоматичний вимикач QF; діоди: VD1, що розділяє, зворотний VD2, шунтовий VD3, VD4, що блокує; контакти реверсу F та B; обмотку збудження LM та якоря M електродвигуна; додатковий резистор R; контактор KM; гальмівний тиристор VS; розрядний резистор Rd; датчик напруги Uvs; блок живлення PM та силовий транзистор VT. Схема підвищує надійність та безпеку роботи тягового приводу за рахунок виключення зарядного контактору та безпосереднього з'єднання зарядно-розрядного резистора через струмоприймач з контактною мережею, що унеможливило підключення розрядженого конденсатора мережевого фільтра до контактної мережі, що є причиною скорочення строку служби конденсатора мережевого фільтра, навіть при порушенні контакту струмоприймача з контактною мережею, а також розширює функціональні можливості мережевого фільтра за рахунок підключення блоку живлення допоміжних кіл до конденсатора мережевого фільтра паралельно з мережею, що дає змогу конденсатору мережевого фільтра розряджатись через зарядно-розрядний резистор та блок живлення допоміжних кіл. Виключення зарядного контактору та безпосереднє з'єднання зарядно-розрядного резистора через струмоприймач та зворотний діод з контактною мережею дозволяє підвищити надійність роботи схеми для управління тяговим двигуном, а підключення блоку живлення допоміжних ланцюгів до конденсатора мережевого фільтра паралельно з мережею не тільки розширює функціональні можливості мережевого фільтра, а ще й підвищує безпеку роботи [9].

На рис. 3 представлена розрахункова схема заміщення першого інтервалу імпульсного циклу, яка є двома незалежними контурами.

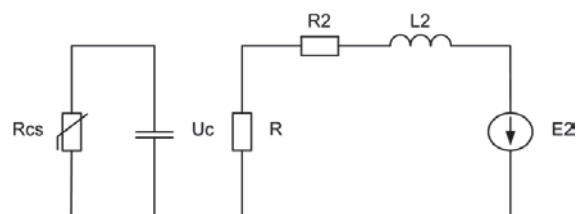


Рис. 3 Схема заміщення першого інтервалу імпульсного циклу

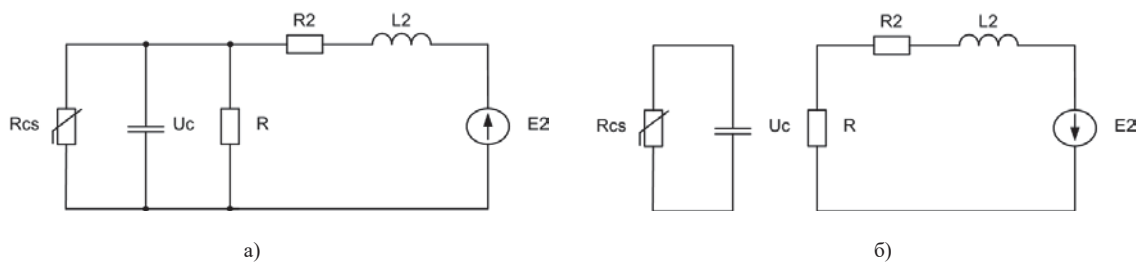


Рис. 4 Схема заміщення другого інтервалу імпульсного циклу

а) при  $i_R \cdot R \geq U_c$  або  $i_R \cdot R < U_c$  та  $\frac{dU_c}{dt} > 0$ ; б) при  $i_R \cdot R < U_c$  та  $\frac{dU_c}{dt} \leq 0$

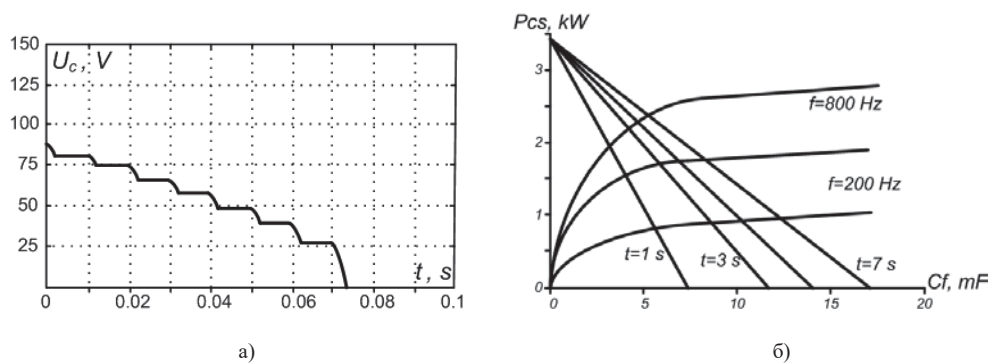


Рис. 5 Зміна напруги на конденсаторі вхідного фільтру (а) та залежності максимально припустимої потужності, що забезпечується енергією гальмування (б)

У схемах заміщення  $L_2$ ,  $R_2$ ,  $R$  та  $E_2$  відповідно індуктивний, активний, додатковий опори та проти-ЕРС електродвигуна,  $U_c$  – напруга на конденсаторі вхідного фільтру,  $R_{cs}$  – опір кола системи керування.

Запишемо диференційні рівняння, що характеризують цей процес:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{E_2 - i_1 \cdot R_2}{L_2}, \\ \frac{dU_c}{dt} &= -\frac{U_c}{R_{cs} \cdot C}. \end{aligned} \quad (8)$$

Другий інтервал імпульсного циклу характеризують дві схеми заміщення (рис. 4): а) при  $i_R \cdot R \geq U_c$ ;

б) при  $i_R \cdot R < U_c$  та  $\frac{dU_c}{dt} > 0$ . У першому випадку диференційні рівняння, складені за схемою заміщення, матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} E_2 &= i_1 \cdot (R_2 + R) - i_3 \cdot R - i_2 \cdot R + L_2 \cdot \frac{di_1}{dt}, \\ -U_c &= i_2 \cdot R - i_1 \cdot R - i_3 \cdot R, \\ 0 &= i_3 \cdot (R_{cs} + R) + i_2 \cdot R - i_1 \cdot R. \end{aligned} \quad (9)$$

З врахуванням, що  $i_2 = C \cdot \frac{dU_c}{dt}$ ,

$$\begin{aligned} E_2 &= i_1 \cdot (R_2 + R) - i_3 \cdot R - C \cdot R \cdot \frac{dU_c}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_1}{dt}, \\ -U_c &= C \cdot R \cdot \frac{dU_c}{dt} - i_1 \cdot R - i_3 \cdot R, \\ 0 &= i_3 \cdot (R_{cs} + R) + C \cdot R \cdot \frac{dU_c}{dt} - i_1 \cdot R. \end{aligned} \quad (10)$$

Позначимо  $\frac{dU_c}{dt} = z$  і одержимо систему рівнянь, прийнятну для розв'язку у програмному пакеті MathCAD®:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{E_2 - i_1 \cdot (R_2 + R) + i_3 \cdot R - C \cdot R \cdot z}{L_2}, \\ \frac{dU_c}{dt} &= z, \\ 0 &= U_c + C \cdot R \cdot z - i_1 \cdot R - i_3 \cdot R, \\ 0 &= i_3 \cdot (R_{cs} + R) + C \cdot R \cdot z - i_1 \cdot R. \end{aligned} \quad (11)$$

Для другого випадку отримаємо систему двох рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{E_2 - i_1 \cdot (R_2 + R)}{L_2}, \\ \frac{dU_c}{dt} &= -\frac{U_c}{R_{cs} \cdot C}. \end{aligned} \quad (12)$$



Динаміку зміни напруги на конденсаторі вхідного фільтру при початковому її значенні нижче граничного рівня  $U_1$  та імпульсному регулюванні наведено на рис. 5 (а). На рис. 5 (б) представлені статичні залежності максимально припустимої потужності, яку споживає система керування  $P_{CS}$ , що забезпечується енергією гальмування при наступних умовах:  $\omega \rightarrow 0$ ;  $\gamma \rightarrow 0$ ;  $R = 1,5 \Omega$ ;  $U_P = 0$ . А також представлені обмеження величини рівня потужності за часом та за мінімальним значенням напруги з розрахунку, що номінальна напруга живлення системи керування не перевищує 150 V. Область значень  $C_f$ , мF для прийнятого інтервалу  $3 \div 5$  s розташована всередині.

#### ВИСНОВКИ

- 1) Розроблена математична модель дозволяє оцінити роботу системи електродинамічного гальмування ТЕД ТЕМК при низькій швидкості руху шахтних електровозів й тимчасовій несанкціонованій відсутності напруги в мережі живлення.
- 2) Встановлені залежності між величиною ємності конденсатора, що згладжує, та індуктивності вхідного фільтру й граничними значеннями відхилень напруги живлення оперативних кіл імпульсної системи керування дозволяють розрахувати мінімальні значення  $L_f$  й  $C_f$ , у той час як остаточний вибір останніх рекомендується здійснювати, керуючись вимогами до мінімальної маси, габаритів фільтра, а також за пульсаційними втратами потужності в навантаженні. При цьому величина ємності  $C_f$  може бути збільшена, що сприяє обмеженню перенапруги на фільтрі при миттєвому розмиканні кіл, а також дозволяє розширити область обмежень за часом.
- 3) Зникнення напруги на струмознімачі контактних шахтних електровозів можливі тривалістю  $3 \div 5$  s, необхідних для проїзду ізолюваних частин КД, система керування повинна відповідно реагувати при зниженнях напруги  $U_c$  до рівня  $U_1$ , щоб забезпечити в такій ситуації можливість безвідмовного гальмування тягових двигунів. Інакше кажучи, під час руху шахтних електровозів напруга на обкладках конденсатора  $C_f$  не повинна знижуватися нижче рівня  $U_1$ .

Надійшла до редакції 14 липня 2017 р.

УДК 621.337.52

## К вопросу эффективности функционирования тягового электромеханического

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] O. Sinchuk, E. Guzov, V. Debelyiy and L. Debelyiy, Shahtnyiy elektrovoznyy transport. Teoriya, konstruktzii, elektrooborudovanie [Mine electric locomotive transport. Theory, constructions, electrical equipment], Krivoy Rog – Donetsk: ChP Scherbatyih A. V., 2015, p. 296.
- [2] S. V. Leb'odkin, «Vuhil'na promyslovist' i perspektivny napryamky rozvytku tyahovykh elektroprivodiv rudnykovykh elektrovoziv (Problemy i perspektivy) [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'*, no. 4, pp. 12-15, 2004.
- [3] O. Sinchuk, I. Kozakevich, D. Kalmus та R. Siyanko, «Doslidzhennya energoefektivnih 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*, vol. 1, no. 1 (85), pp. 50-56, 2017. DOI: [10.15587/1729-4061.2017.91912](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91912)
- [4] D. Shokarev и V. Fedotov, «Issledovanie maketnogo obraztsa tyagovogo asinhronnogo elektroprivoda rudnichnogo kontaktno-akkumulyatornogo elektrovoza [Research of model standard of hauling asynchronous drive of mine pin-storage-battery electric locomotive],» *Vestnik NTU "KhPI"*, no. 12 (1121), p. 234–237, 2015. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/20447>
- [5] I. Sinchuk, I. Kasatkina, A. Yalovaya и N. Yurchenko, «Otsenka napravleniy povyisheniya energoefektivnosti dobyichi zhelezorudnogo syrira podzemnym sposobom [Estimation of directions of increase of efficiency of booty of iron-ore raw material by an underground method],» *Visnik DVNZ KNU*, no. 42, p. 155–161, 2016.
- [6] B. Tihmeneev and L. Trakhtman, *Podvizhnyy sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Movable composition of the electrified railways], Moscow: Transport, 1980, p. 471.
- [7] I. Sinchuk, «Analiz anomalnykh situatsiy v asinhronnykh tyagovykh elektroprivodakh rudnichnykh kontaktnykh elektrovozov [An analysis of anomalous situations is in the asynchronous hauling drives of mine pin electric locomotives],» *Vistnyk NTU "KhPI"*, no. 30, p. 365–367, 2008.
- [8] I. Sinchuk та D. Kalmus, «Doslidzhennya vplyvu kolyvan' ta korotkochasnykh znyknen' napruhy zhyvlennya rudnykovoho elektrovoza na robotu elektrychnoho pryvoda v rezhymy hal'muvannya [Research of influence of vibrations and brief disappearances of tension of feed of mine electric locomotive to work of electric drive in the mode of braking],» *Electronics and Communications*, vol. 21, no. 5 (94), pp. 31-37, 2016 DOI: [10.20535/2312-1807.2016.21.5.81917](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.5.81917).
- [9] O. N. Sinchuk, *ombinatorika preobrazovateley napryazheniya sovremenykh tyagovykh elektroprivodov rudnichnykh elektrovozov* [Combinatorics of transformers of tension of modern hauling electromechanics of mine electric locomotives], Kyiv: IEDNANU, 2006, p. 252.



# КОМПЛЕКСА ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ

Синчук И. О., к.т.н, доц., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)

e-mail: [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net)

Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)

e-mail: [dmitriy\\_kalmus@ukr.net](mailto:dmitriy_kalmus@ukr.net)

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

*Реферат*—В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности процесса торможения тяговых электродвигателей постоянного тока с импульсными системами регулирования напряжения питания. Рассмотрены электромагнитные процессы в электроприводе шахтного электровоза при электродинамическом торможении тяговых двигателей, когда скорость шахтного электровоза и напряжение на его пантографе стремятся к нулевым значениям, и конденсатор входного фильтра подзарядается за счет энергии торможения в каждом импульсном цикле. Установлены зависимости между величинами накопительной емкости сглаживающего конденсатора, индуктивности входного фильтра и предельными значениями отклонений напряжения питания оперативных цепей импульсной системы управления. Получены зависимости максимально допустимой мощности, которую потребляет система управления, обеспечиваемой энергией торможения тяговых электрических двигателей. Разработана математическая модель, позволяющая оценить работу системы электродинамического торможения при низкой скорости движения шахтных электровозов и временном несанкционированном отсутствии напряжения питающей сети.

Библ. 9, рис. 5.

*Ключевые слова* — тяговый электропривод; торможение; математическая модель; мощность.

UDC 621.337.52

## To the question of efficiency of functioning of hauling electromechanics complex of mine electric locomotive in the mode of braking

I. O. Sinchyk, PhD, Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)

e-mail: [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net)

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

e-mail: [dmitriy\\_kalmus@ukr.net](mailto:dmitriy_kalmus@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 considered questions of increase of efficiency of process of braking of hauling electric engines of direct-current are with the impulsive systems of adjusting of tension of feed. Electromagnetic processes are considered in the electric drive of mine electric locomotive at the electric dynamic braking of hauling electric engines, when speed of mine electric locomotive and tension on his pantograph aspire to zero values, and the condenser of entrance filter revives due to energy of braking in every impulsive loop. Dependences are set between by the size of story capacity of the smoothed condenser, inductances of entrance filter and by the maximum values of rejections of tension of feed of operative chains of impulsive control system. Dependences of maximally possible power that is consumed by control system are got, provided by energy of braking of hauling electric engines. A mathematical model allowing to estimate work of the system of the electrodynamic braking at the subzero rate of movement of mine electric locomotives and temporal unauthorized absence of tension is worked out.

Ref. 9, fig. 5.

*Keywords* — hauling electric drive; braking; mathematical model; power.

