

# Дослідження пуско-гальмівних режимів роботи системи групового електроприводу шахтного електровозу з різними типами тягових електричних двигунів

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

Криворізький національний університет, ROR [02md2kv66](https://ror.org/02md2kv66)

Кривий Ріг, Україна

**Анотація**—У статті наведені результати дослідження роботи шахтного електровозу за умови стійкості системи «колесо - рейка» за зчепленням. Відзначено, що робота шахтного електровозного транспорту обумовлена рядом специфічних умов. Зазначено, що для реалізації електромеханічних систем шахтних електровозів використовуються структури з тяговими двигунами постійного та змінного струму. При роботі шахтного електровозу важливим є питання зчеплення коліс електровозу з рейками. Наслідком втрати стійкості зчеплення колеса з рейкою є виникнення процесів буксування у режимі тяги або юзу у режимі гальмування, які негативно впливають на інші вузли тягового електроприводу. У свою чергу стійкість системи «колесо - рейка» залежить від типу тягового електроприводу. За умови стійкості електроприводу по зчепленню ключову роль відіграє жорсткість характеристик тягових електродвигунів. Чим вища жорсткість, тим більша стійкість системи «колесо – рейка». Більш жорсткі характеристики можна отримати у системі електроприводу з тяговим асинхронним двигуном, що дає можливість використовувати цей факт для реалізації пропорційного розподілу зусиль між колісними парами електровозу. Для чого достатнім є обмеження струмів тягових електродвигунів на заданому рівні.

**Ключові слова** — шахтний електровоз; стійкість за зчепленням; двигун постійного струму; тяговий асинхронний двигун; жорсткість; пропорційний розподіл зусиль.

## I. ВСТУП

Робота шахтного електровозного транспорту обумовлена рядом специфічних умов [1], [2].

Також слід зазначити, що для реалізації електромеханічних систем шахтних електровозів використовуються структури з тяговими двигунами постійного [3] та змінного [4], [5] струму.

При роботі шахтного електровозу важливим є питання зчеплення коліс електровозу з рейками [6]. Річ у тім, що для максимального використання тягових властивостей електровозів виникає необхідність роботи у зонах тягових та гальмівних характеристик, які близькі до обмеження по зчепленню. Але перехід при реалізації цих зусиль на частину характеристики, що спадає, буде супроводжуватись збільшенням надлишкового ковзання й призведе до буксування коліс у режимі тяги, або їх юзу у режимі гальмування. Розвиток таких процесів багато у чому визначає стійкість системи «колесо - рейка».

Метою роботи є визначення того, яким чином відбувається розподіл тягових та гальмівних зусиль відносно кожної вісі шахтного електровозу, для чого необхідно розглянути взаємодію сил при русі коліс по рейках та умови стійкості системи «колесо - рейка» за

зчепленням, а також, за допомогою імітаційної моделі, дослідити перехідні процеси у системі групового тягового електроприводу шахтного електровозу з різними типами електричних двигунів у режимах пуску та гальмування.

## II. МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Найбільш просту картину утворення сили зчеплення дає модель з представленням моменту, що обертає колесо, яке діє на рейку з силою нормального тиску у вигляді пари сил, одна з яких прикладена

у точці контакту колеса з рейкою (рис. 1) [7]. У такому випадку сила зчеплення є сила тертя, зовнішня по відношенню до колеса й така що має реактивний характер, тобто спрямована протилежно. Виникаючи, як протидія ковзанню колеса відносно рейки, вона утворює силу тяги, яку й реалізує колесо.

Наслідком втрати стійкості зчеплення колеса з рейкою є виникнення процесів буксування у режимі тяги або юзу у режимі гальмування, які негативно впливають на інші вузли тягового електроприводу. У свою чергу стійкість системи «колесо - рейка» залежить від типу тягового електроприводу.



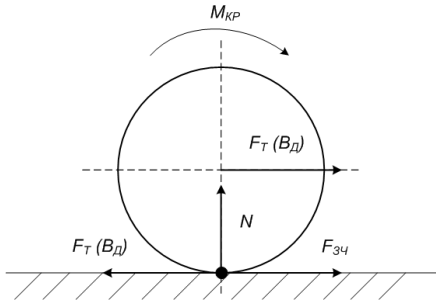


Рис. 1 Модель утворення сили зчеплення:  $M_{кр}$  – крутний момент, Н·м;  $N$  – нормальна реакція рейок у точці контакту з колесом, Н.

Реалізацію тягових й гальмівних зусиль можна описати нерівностями:

- для режиму тяги:

$$F_{\dot{\theta}} \leq F_{\dot{\chi}}, \quad (1)$$

де  $F_{\dot{\theta}}$  – сила тяги, Н;  $F_{\dot{\chi}}$  – сила зчеплення, Н;

- для режиму гальмування:

$$B_{\dot{\alpha}} \leq F_{\dot{\chi}}, \quad (2)$$

де  $B_{\dot{\alpha}}$  – сила гальмування електродвигуном, Н.

З нерівностей виходить, що реалізація зусиль за зчепленням можлива тільки в умовах, коли сила тяги або гальмування, що передається на вісь колісної пари, не перевищує силу зчеплення. Однак, така умова не завжди виконується, що є наслідком різної природи сил, які взаємодіють, а також проявляється вплив зовнішніх факторів на цю взаємодію.

Запишемо умову стійкості електроприводу по зчепленню [8]:

- для режиму тяги:

$$\frac{dF_{\dot{\chi}}}{dV_K} > \frac{dF_{\dot{\theta}}}{dV_K}, \quad (3)$$

де  $V_K$  – швидкість проковзування коліс;

- для режиму гальмування:

$$\frac{dF_{\dot{\chi}}}{dV_K} > \frac{dB_{\dot{\alpha}}}{dV_K}. \quad (4)$$

З виразів видно, що у питанні стійкості електроприводу за зчепленням колеса з рейкою, ключову роль відіграє жорсткість характеристик тягових електродвигунів. Чим вища жорсткість, тим більша стійкість системи «колесо - рейка».

Як вже відзначалось, на шахтних електровозах використовується електропривод з двигунами постійного та змінного струму. Зробимо порівняння цих систем. На рис. 2 зображено механічні характеристики електроприводу шахтного електровозу з двигуном постійного струму послідовного збудження та з тяговим асинхронним двигуном у режимах тяги й гальмування. Можна побачити, що більш жорсткі характеристики у системі електроприводу з тяговим асинхронним двигуном. У сучасних системах управління шахтними електровозами цей факт використовується для реалізації пропорційного розподілу зусиль між колісними парами електровозу.

Слід зазначити, що системи зі зворотнім зв'язком за швидкістю дозволяють здійснювати розподіл тягових й гальмівних зусиль, які прикладені до колісних пар електровозу, у відповідності до розподілу навантаження від цих колісних пар на рейки, тільки після зриву у буксування або юз. Для вирішення цієї проблеми достатнім є обмеження струмів тягових електродвигунів на заданому рівні. У зв'язку з цим з'являється можливість розподілу тягових й гальмівних зусиль у будь-який момент часу.

Для вирішення задачі раціонального розподілу зусиль електровозу, проаналізуємо розподіл навантажень між його колісними парами у функції сумарної сили тяги на зчипці (рис. 3).

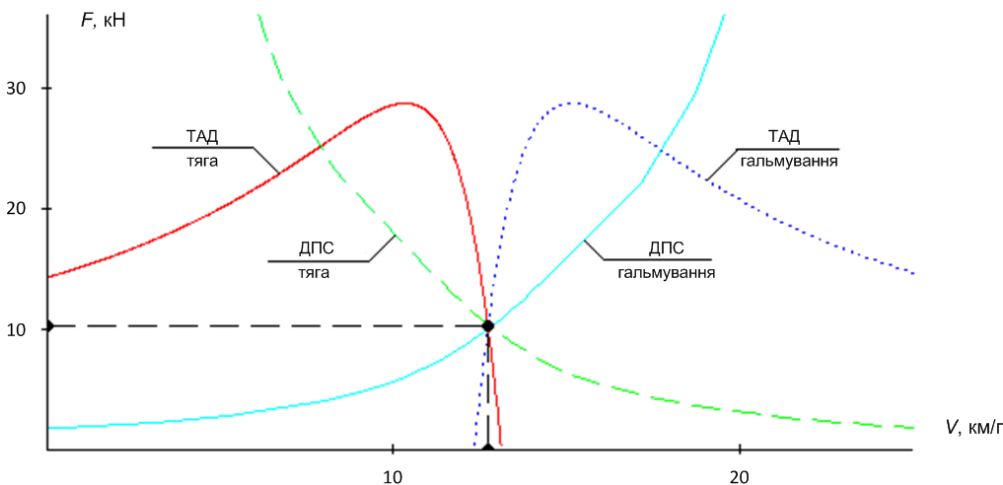


Рис. 2 Механічні характеристики електроприводу шахтного електровозу з двигуном постійного струму (ДПС) послідовного збудження та з тяговим асинхронним двигуном (ТАД) у режимах тяги й гальмування

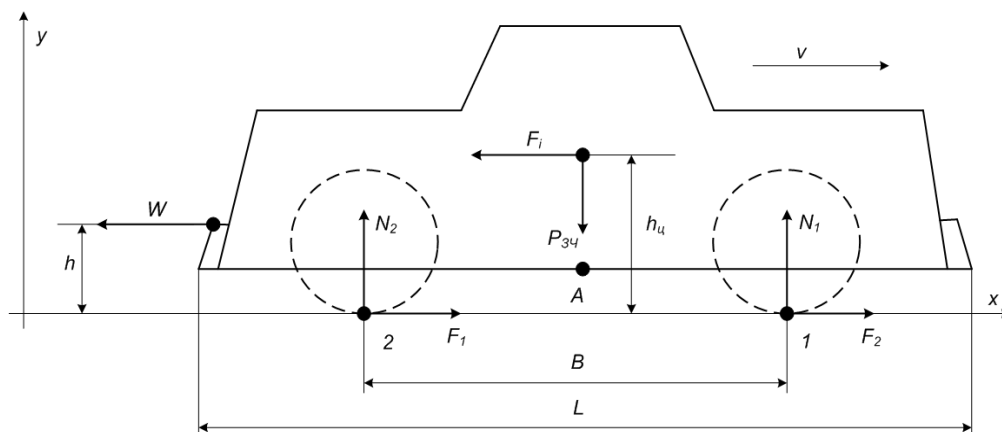


Рис. 3 Розподіл навантажень між колісними парами шахтного електровозу:  $P_{3ч}$  – зчіпна вага електровозу, Н;  $N_1$ ,  $N_2$  – нормальна реакція рейок у точках 1 та 2 контакту з колесами, Н;  $F_1$ ,  $F_2$  – тангенціальна реакція рейок у точках 1 та 2 контакту з колесами, Н;  $V$  – швидкість руху, м/с;  $B$  – жорсткість бази, м;  $L$  – довжина електровозу, м;  $F_i$  – сила інерції, Н;  $W$  – опір руху, Н;  $h_{ц}$  – висота центру ваги, м;  $h_{ц}$  – висота зчіпки, м;  $x$ ,  $y$  – вісі проєкції.

Для визначення навантажень на вісі електровозу скористаємось рівняннями проєкцій сил на вісь  $y$ :

$$\sum y_i = 0; \quad (5)$$

$$N_1 + N_2 - P_{3ч} = 0. \quad (6)$$

При цьому рівняння рівноваги сил за умови, що сума моментів усіх сил відносно точки  $A$  дорівнює нулю, буде мати вигляд:

$$\sum M_i = 0; \quad (7)$$

$$\pm(F_i \cdot h_{ц} + W \cdot h) + \frac{N_1 \cdot B}{2} - \frac{N_2 \cdot B}{2}. \quad (8)$$

Вирішуючи сумісно рівняння (5 – 8) знайдемо вирази для навантажень на вісі електровозу, з урахуванням зміни напрямку його руху й режиму роботи тягових електродвигунів:

$$N_1 = \frac{P_{3ч}}{2} \mp \frac{W \cdot h + F_i \cdot h_{ц}}{B}; \quad (9)$$

$$N_2 = \frac{P_{3ч}}{2} \pm \frac{W \cdot h + F_i \cdot h_{ц}}{B}. \quad (10)$$

З (9) та (10) виходить, що перерозподіл навантаження на вісі електровозу прямо пропорційний до його сумарної сили тяги та висоти зчіпки й обернено пропорційний до жорсткості бази. Як наслідок, для дотримання тягових та гальмівних зусиль на вісі електровозу у відповідності з навантаженням колісних пар на рейки, необхідно підтримувати однакове співвідношення навантажень й зусиль на вісі електровозу.

Проведемо моделювання перехідні процеси у системі групового тягового електроприводу шахтного електровозу у режимі пуску та гальмування. Моделювання виконано у програмі MATLAB® [9], [10].

Моделювання виконано для двигуна постійного струму послідовного збудження (потужність 45 кВт, номінальна напруга, струм та частота обертання — 250 В, 204 А та 1320 об/хв відповідно) та тягового асинхронного двигуна (потужність 45 кВт, номінальна напруга, струм та ковзання – 250 В, 180 А та 0,12 відповідно) [11]. На рис. 4 та 5 наведено графіки перехідних процесів у системі групового тягового електроприводу шахтного електровозу у режимі пуску та гальмування.

На рис. 4 та 5 червоним кольором зображено графіки перехідних процесів тягового електроприводу більш навантаженої вісі шахтного електровозу, чорним кольором зображено графіки перехідних процесів тягового електроприводу менш навантаженої вісі, а синім кольором зображено графіки перехідних процесів при рівномірному розподілі навантажень системи групового тягового електроприводу, пропорційному до зусиль, які необхідно прикладати на вісі електровозу у відповідності з навантаженням колісних пар на рейки.

#### ВИСНОВКИ

За умови стійкості електроприводу по зчепленню ключову роль відіграє жорсткість характеристик тягових електродвигунів. Чим вища жорсткість, тим більша стійкість системи «колесо - рейка». Більш жорсткі характеристики можна отримати у системі електроприводу з тяговим асинхронним двигуном, що дає можливість використовувати цей факт для реалізації пропорційного розподілу зусиль між колісними парами електровозу. Для чого достатнім є обмеження струмів тягових електродвигунів на заданому рівні.

Імітаційне моделювання показало відсутність процесів буксування та юзу при застосуванні запропонованого принципу керування.

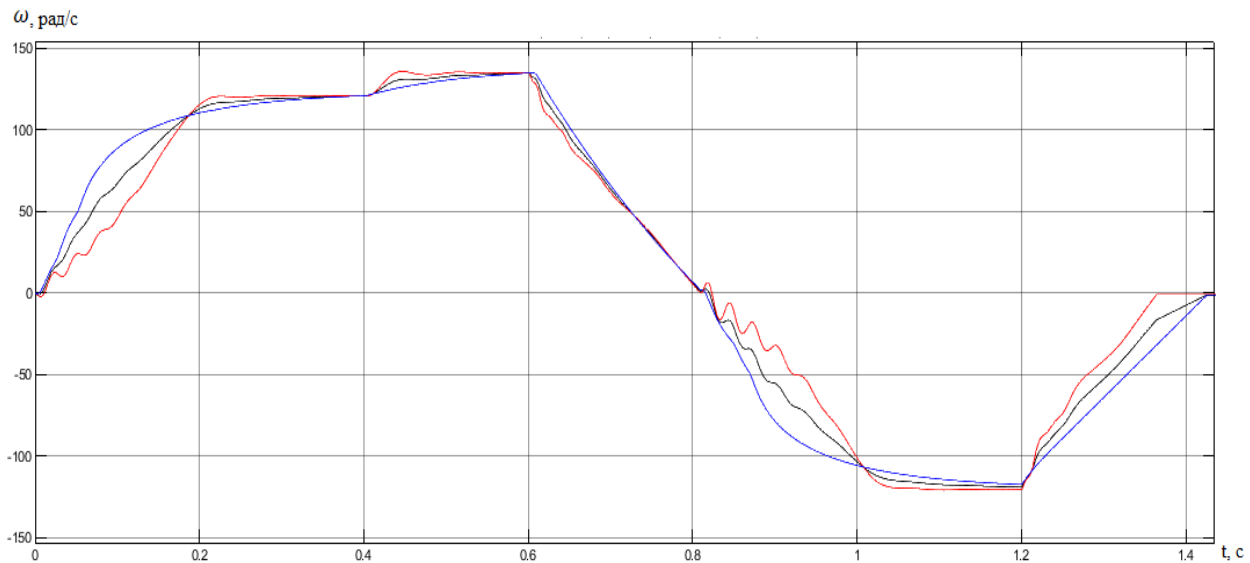


Рис. 4 Графіки зміни у часі частоти обертання тягових електродвигунів у режимах пуску та гальмування

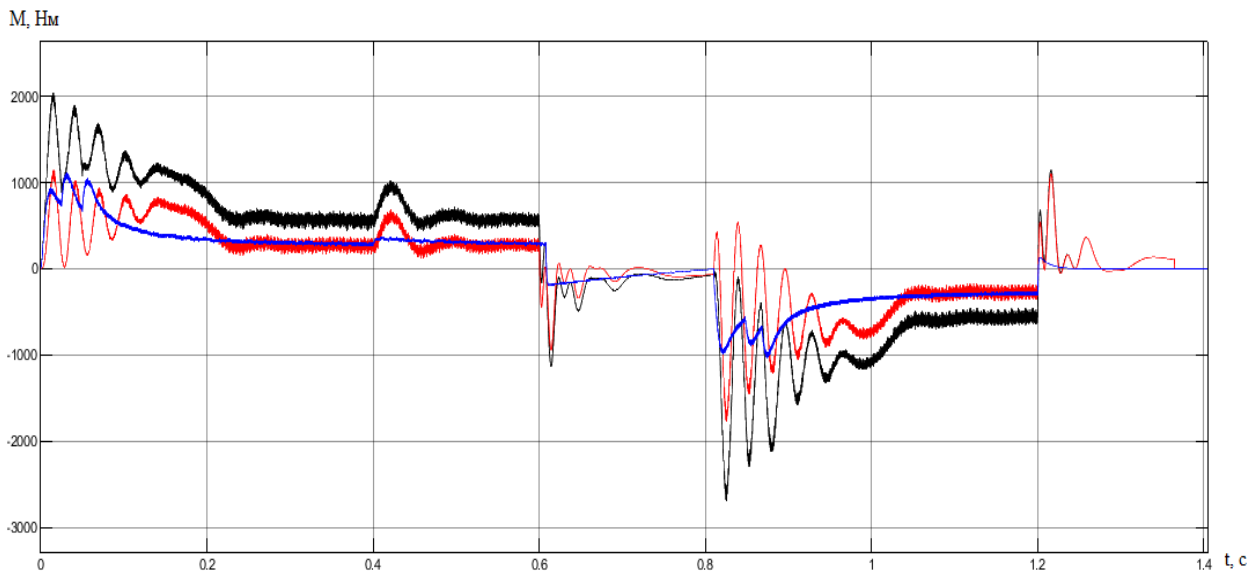


Рис. 5 Графіки зміни у часі моменту тягових електродвигунів у режимах пуску та гальмування

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A. B. Somochkin, V. O. Fedotov, and D. O. Kalmus, "Research of Dynamics of the Systems of Electric Drive for Mine Electric Locomotives in the Conditions of Iron-Ore Enterprises", *Microsyst., Electron. & Acoust.*, vol. 23, no. 3, pp. 25–29, Jun. 2018. DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.3.132148](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.3.132148)
- [2] I. O. Sinchuk, I. V. Kasatkina, A. N. Yalovaya, and N. N. Yurchenko, "Otsenka napravleniy povyisheniya energoeffektivnosti dobyichi zhelezorudnogo syrya podzemnyim sposobom," *J. Kryvyi Rih Natl. Univ.*, vol. 42, pp. 145–151, 2016, URL: <http://visnykknpu.com.ua/wp-content/uploads/file/42/BKHV-42.pdf>.
- [3] O. N. Sinchuk et al., *Kombinatorika preobrazovateley napryazheniya sovremennykh tyagovykh elektropriwodov rudnichnykh elektrozovoz [Combinatorics of voltage converters of modern traction electric drives of mine electric locomotives]*, ISBN: 966-02-4067-8.
- [4] O. N. Sinchuk, E. S. Guzov, I. O. Sinchuk, A. V. Omelchenko, D. A. Shokarev, and E. I. Skapa, "K voprosu strategii sozdaniya energoeffektivnogo i bezopasnogo v ekspluatatsii dvukhosnogo elektrovoza dlya rudnykh shakht [To the question of the strategy of creating an energy-efficient and safe in operation two-axle electric locomotive for ore mines]," *Hirnychyy visnyk*, vol. 95, pp. 139–143, 2012.
- [5] O. Sinchuk, A. B. Syomochkin, and V. A. Fedotov, "Perekhodnyye protsessy asinkhronnogo elektroprivoda shakhtnogo elektrovoza pri yego pitanii ot real'noy sistemy elektrosnabzheniya [Transients of an asynchronous electric drive of a mine electric locomotive when it is powered from a real power supply syst.," *Electrotech. Comput. Syst.*, vol. 91, no. 15, pp. 201–204, 2014, DOI: [10.15276/etks.15.91.2014.46](https://doi.org/10.15276/etks.15.91.2014.46).
- [6] D. O. Kalmus, "Research of work of retrosystem taking into account the change of coefficient of coupling of wheels of electric locomotive with rails", *Electronics and Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 40–45, Jun. 2017. DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.3.107102](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.3.107102)
- [7] I. O. Sinchuk, E. S. Guzov, V. L. Debelyiy, and L. L. Debelyiy, *Shakhtnyiy elektrozovnyiy transport. Teoriya,*



- konstruktsii, elektrooborudovanie [Shaft electric transport. Theory, construction, electrical equipment]*. 2015.
- [8] Lisunov V. P., *Ispol'zovaniye sil vzaimodeystviya dvizhushchikh koles s rel'sami v rezhimakh tyagi i tormozheniya: Uchebnoye posobiye [Using the forces of interaction of driving wheels with rails in traction and braking modes: a tutorial]*. Omskaya gos. akad. putey soobshcheniya, 1994.
- [9] I. V. Chernykh, *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink]*. Moscow, Russian Federation: DMK Press, 2007.
- [10] V. M. Perel'muter, *Pakety rasshireniya MATLAB. Control System Toolbox i Robust Control Toolbox*. M.: SOLON-Press, 2008.
- [11] B. A. Gryadushchiy, Y. F. Butt., V. B. Gryadushchiy, and V. L. Debelyy, *Shakhtnyy podzemnyy transport: spravochnoye izdaniye [Mine underground transport]*. Donetsk, Ukraine: VIK, 2011.

Надійшла до редакції 14 липня 2021 р.  
Прийнята до друку 07 серпня 2021 р.

UDC 621.33

# Research of the Modes of Starting and Braking during Work of the Systems of Group Electric Drive of Mine Electric Locomotive with the Different Types of Electric Engines

D. O. Kalmus, ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)  
Kryvyi Rih National University, ROR [02md2kv66](https://ror.org/02md2kv66)  
Kryvyi Rih, Ukraine

**Abstract**—In the article the results of research of work of mine electric locomotive are driven on condition of stability of the system "A wheel is a rail" on coupling of wheels of electric locomotive with rails. It is marked that work of mine electric locomotive transport is conditioned by the row of specific terms. It is indicated that for realization of the electromechanics systems of mine electric locomotives structures are used with the hauling electric engines of direct and variable current.

During working as of mine electric locomotive an important question there is coupling of wheels of electric locomotive with rails. Investigation of worsening of coupling of wheel with a rail is an origin of processes of skidding in the mode of creation of tractive or юза force in the mode braking of electric locomotive, that influence negatively for other knots of hauling electromechanic. In turn stability of the system "A wheel is a rail" depends on the type of hauling electromechanic. At consideration condition of stability of electromechanic on coupling of wheels of electric locomotive with rails important is inflexibility of descriptions of hauling electric motors. What more inflexibility, the higher stability of the system "A wheel is a rail". More hard descriptions can be got in the system of electromechanic with hauling asynchronous engines that give an opportunity to use this fact for realization of proportional distribution of efforts between the wheelpairs of electric locomotive.

The systems ticker-coil on speed allow to carry out distribution of hauling and brake efforts that is attached to the wheelpairs of electric locomotive, in accordance with distribution of efforts from these wheelpairs on rails, only after the beginning of processes of skidding or skidding. For the decision of this problem a sufficient condition there is a limit of currents of hauling electric motors on the set level. In this connection possibility of distribution of hauling and brake efforts appears at any moment to time.

For the decision of task of rational distribution of efforts of electric locomotive, distribution of forces was analysed between his wheelpairs in the function of total force that pulls an electric locomotive on his coupling. On the basis of analysis an idea was got about the redistribution of loading on the axes of electric locomotive. This distribution is in direct ratio to his total tractive force and coupling height, and in inverse ratio to inflexibility of corps. As a result, in order that propelling and brake forces on the axes of electric locomotive corresponded to distribution of weight on rails on wheelpairs, it is necessary to support identical correlation of weight and efforts on the axes of electric locomotive.

The design of transients was conducted in the system of group electric hauling drive of mine electric locomotive in the mode of starting and braking. A design is executed for the engine of direct-current with successive connection of poles and hauling asynchronous engine. The charts of transients in the system of group electric hauling drive of mine electric locomotive in the mode of starting and braking showed absence of processes of skidding and slipping at application of the offered principle for the control system.

**Keywords** — mine electric locomotive; coupling stability; engine of direct-current; hauling asynchronous engine; inflexibility; proportional distribution of efforts.

