

УДК 621.337.52

І.О. Сінчук, Д.О. Кальмус

ДВНЗ «Криворізький національний університет»,  
вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна, E-mail: [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net).

## Дослідження впливу коливань та короточасних зникнень напруги живлення рудникового електровоза на роботу електричного привода в режимі гальмування

У статті проведено аналіз можливих причин зниження рівня напруги живлення контактного рудникового електровозу. Встановлено фактори, що впливають на роботу електроприводу в режимі тяги та в режимі гальмування. Проаналізовано характер електромагнітних процесів у тягових двигунах рудникового електровозу при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування. З аналізу були встановлені вирази, що дозволяють зробити оцінку граничних умов переходу з режиму тяги у режим гальмування в залежності від ряду факторів, які враховують конструктивні особливості системи електроприводу та початкові умови у колі гальмування. Запропоновано рішення щодо зменшення впливу коливань напруги живлення на працездатність системи електропривода рудникового електровозу. Бібл. 7, рис. 2.

**Ключові слова:** коливання напруги живлення; електропривод; тяговий двигун; гальмування.

### Вступ

В процесі руху рудникового електровоза напруга на його струмознімачах може змінюватись в широких межах відносно номінального значення. Виникаючі під час цього, так звані, зникнення і зниження напруги живлення можуть служити причиною втрати керованості та неможливості переведення електроприводу в гальмівний режим, що істотно знижує надійність і ефективність гальмування тягового електроприводу, що у свою чергу не тільки погіршує продуктивність електровозного відкочування, але й може привести до виникнення аварійних ситуацій.

В даний час є ряд технічних рішень, спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу рудникових контактних електровозів в умовах коливань і короточасних зникнень напруги живлення [2-5]. До таких рішень відносяться установка на електровозах спеціальних генераторів напруги, гальмування тягових двигунів при порушенні нормального режиму живлення, застосування сенергетичного електроприводу, в тому числі

для контактних-акумуляторних електровозів та інше. І все ж, відмічені шляхи вирішення цього завдання не є достатньо ефективними, тому що для досягнення поставленої мети вимагають застосування додаткового електрообладнання. Але на важких, а також середнього і легкого типу рудникових електровозах відсутній вільний простір для розміщення додаткового електроустаткування. Це викликає необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності функціонування систем управління аналізованих видів рудникових електровозів, розробки нових прогресивних засобів управління, що базуються на використанні енергії накопичувальних конденсаторів вхідних фільтрів, енергії обертання електричних машин (наприклад, в даному випадку енергії обертання ТД). Такий напрямок вирішення питання є достатньо економічним, так як не потребує використання додаткового силового обладнання, збільшення пов'язаних з цим експлуатаційних витрат.

Мета роботи – провести аналіз можливих причин зниження рівня напруги живлення контактного рудникового електровозу; встановити фактори, що впливають на роботу електроприводу в режимі тяги та гальмування; запропонувати рішення щодо зменшення впливу коливань напруги живлення на працездатність системи електропривода, для чого провести дослідження електромагнітних процесів у ТД рудникового електровозу при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування.

### Основний матеріал

Порівняльний аналіз основних відомих схем електричного гальмування ТД рудникових електровозів показує, що основними причинами зниження рівня напруги є відключення напруги живлення на підстанції; посадка напруги в результаті зосередження навантаження на окремих секціях контактної мережі; порушення контакту між струмознімачем електропривода і контактним проводом мережі живлення [6].

На рис. 1 представлено фотографії максимального (а) та мінімального (б) за часом рівнів відриву пантографа електровоза від контактного дроту.



Рис. 1. Фотографії відриву пантографа електровоза

На осцилограмах рис. 2 а), б) показано перехідний процес, що виникає у ТД в момент разриву лінії живлення. Канал 1 (верхній) показує значення струму двигуна. Канал №2 (нижній) показує стан входу системи (імітація відриву пантографа на ділянці 0,5с).

Спад напруги з рівня 230В до рівня нижче 30В відбувається за час менший ніж 150 мс.

«Підхоплення» швидкості руху здійснюється через 1,5 с після встановлення напруги живлення.

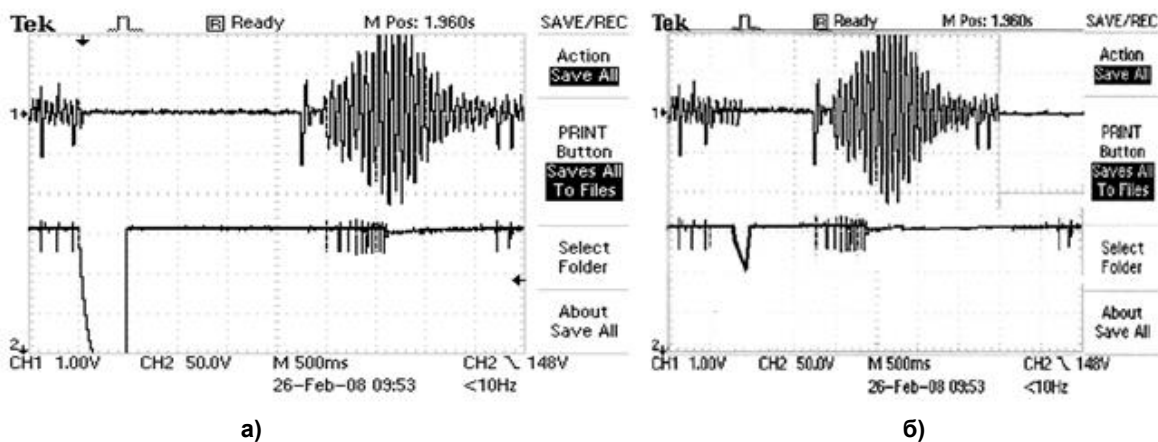


Рис. 2. Осцилограма перехідного процесу в тяговому електроприводі в момент відриву пантографа електровоза К-14 від контактної мережі живлення від контактного дроту: а) – максимальний час що фіксується – 4 сек, б) – мінімальний час що фіксується – 0,02 сек (гор. 980 м., ш. Родина, Криворізький залізорудний комбінат)

Зменшення ефективності будь-якої системи зазвичай вимірюється функцією досяжності максимального значення в "ідеальних" умовах (відсутність відмов, перешкод, збоїв і т.п.). При цьому прийнятна повноцінність функціонування системи забезпечується виконанням закладених в її функціональну схему заданої кількості властивостей, які визначаються накладеними вимогами експлуатації, безпеки і т.п.

Так, для прискорення процесу збудження двигунів і розширення діапазону швидкостей, при якому забезпечується їх надійне гальмування, в силовому ланцюзі електроприводу необхідний початковий гальмівний струм. При цьому витрати часу для перевodu двигунів в режим гальмування зводяться до мінімуму і стають порівнянними з часом спрацьовування контакторів гальмівного режиму.

Робота контактних рудникових електровозів пов'язана з частими зниженнями і зникненнями напруги живлення на струмознімачах електроприводу. Останнє накладає вимоги реалізації надійного гальмування ТД незалежно від знижень рівня напруги на конденсаторі вхідного фільтра до якогось критичного значення, нижче якого елементна база системи управління втрачає свою працездатність. Після зникнення напруги живлення на струмознімачах рудникових електровозів протягом деякого часу (кілька секунд), установлений на вході системи імпульсного регулювання конденсатор вхідного фільтра працює в якості джерела живлення зі змінною напругою. Якщо при цьому відбувається перемикання схеми електроприводу в режим гальмування, не виключена можливість втрати керування IP, що, безсумнівно, веде до зниження ефективності гальмування ТД.

Для знаходження оптимального рішення стохастичних задач використовуються багатетапні методи. При цьому вектор стану системи визначається різноманітними незалежними факторами, що впливають. В донному випадку визначуючим вектором вхідних змінних є:

$$\bar{V} = (\omega_{\delta}, U_{cf}, i_f) \quad (1)$$

де  $U_{cf}$  - напруга на конденсаторі  $C_f$  електроприводу РЕ з IP;  $i_f$  - початковий струм збудження.

Перш ніж прийняти рішення про вибір раціонального критерію ефективності функціонування системи, необхідно проаналізувати стан вектора вхідних обурюючих впливів і відгуку системи на деякому етапі  $N$  та вибрати допущення, необхідні для побудови математичної моделі [2-4].

Таким чином, маючи вектор вхідних незалежних змінних  $\bar{V}$ , необхідно відзначити, що параметр  $i_f$  є неявно вираженою функцією від змінних:

$$i_f = F(U_{cf}, S) \quad (2)$$

де  $S$  - стан імпульсного регулювання IP, при цьому мається на увазі його нормальне функціонування і виникнення аварійних режимів (тобто зривів комутацій в IP).

У свою чергу  $S$  є неявно вираженою функцією від змінних:

$$S = F(U_{cf}, i_f, P) \quad (3)$$

де  $P$  - принципи і методи регулювання IP і т.п.

Для вибору критерію ефективності надійного функціонування приводу рудникових електровозів в режимі гальмування  $E_b$ , в загальному випадку необхідно враховувати вище розглянуті впливаючі фактори, т, е .:

$$E_b = F(\omega_{\delta}, U_{cf}, i_f, S) \quad (4)$$

Найбільші труднощі при здійсненні гальмування контактних РЕ виникають при низькій частоті обертання ТД і відсутності напруги на струмознімачах  $U_{tc}$ . В даний час відомий ряд шляхів рішення вище поставленого завдання. Проте існуючі системи гальмування тягового приводу рудникових електровозів з IP, не в повній мірі задовольняють вимоги накладені специфікою рудничної електровозної відкатки. Так, наприклад, рішенням багатьох питань по автоматизації процесів управління, та забезпечення безпеки руху, підвищення ефективності та надійності може бути встановлення згладжуючих дроселів, автономних джерел живлення оперативних ланцюгів системи ( акумуляторів, спеціальних генераторів напруги) і т.п. Однак, ця задача ускладнена відсутністю вільного простору для розміщення додаткового електроустаткування. Це викликає необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності функціонування систем управління рудникових електровозів, та зводиться до розробки нових прогресивних засобів управління.

Тому, в подальшому слід враховувати, що підвищення ефективності функціонування приводу рудникових електровозів в режимі гальмування не повинно супроводжуватися значним збільшенням габаритів системи, а також переводу ТД в режим гальмування і сам процес гальмування повинен здійснюватися з мінімальними витратами часу. При цьому загальний критерій з урахуванням необхідних обмежень може бути писаний як:

$$E_b = \sum F(\bar{V}_i) \text{ при } t_{pb}, t_b, G \rightarrow \min \quad (5)$$

де  $t_{pb}$  - час переключення ТД в режим гальмування;  $t_b$  - час гальмування ТД;  $G$  - габарити системи, тобто за допомогою варіювання складових вектора  $\bar{V}_i$  йде аналіз поведінки системи і оцінюється ступінь зниження (підвищення) ефективності досліджуемого процесу. Надалі виробляється стратегія поведінки системи, забезпечуючи її безвідмовне функціонування з урахуванням вище накладених обмежень.

Як вже зазначалось, в силу ряду причин, електричний опір між контактним дротом і струмознімачем в процесі руху удникового електровозу може змінюватися випадковим чином від мінімального до нескінченно великих величин. На практиці повністю усунути це негативне явище не представляється можливим. Тут мається на увазі, що в будь-якому випадку не виключається можливість наявності однієї або декількох причин зниження рівня напруги живлення.

Під час тривалих відривів струмоznімача від контактного проводу, енергії конденсатора, після зниження напруги на ньому до другого контрольованого рівня, має бути достатньо для створення ініціюючого струму, що забезпечує надійне самозбудження двигуна при перекладі його в режим електродинамічного гальмування. Крім того, так як напруга на конденсаторі залежить від напруги на конденсаторі і від комутуючого ініціюючого струму, що зменшується, напруга на конденсаторі комутуючого не повинно знизитися до граничного значення, при якому конденсатор не може зарядитися до напруги, що забезпечує надійну комутацію ініціюючого струму.

При цьому є очевидним, що мінімально допустима напруга накопичувального конденсатора фільтра, що згладжує за умови створення ініціюючого струму, повинно мати запас, що буде забезпечувати роботу електроприводу з початковим збудженням ТД в режимі електродинамічного гальмування.

У разі невиконання цієї умови, має формуватися керуючий вплив, що забезпечує умови безаварійного функціонування системи електроприводу рудникових електровозів.

Дійсно, в імпульсних СК тяговим приводом транспортних засобів, які живляться від контактної мережі, цілком резонно, в періоди можливих порушень нормальних умов струмоznімання, використовувати для живлення ланцюгів заряд, що накопичується в конденсаторах вхідних фільтрів, що застосовуються для згладжування пульсацій змінної складової струму мережі. ТД в цьому випадку необхідно переводити в режим вільного вибігу.

У міру зниження напруги на обкладках конденсатора від початкового рівня до якогось критичного рівня, нижче якого окремі вузли СК втрачають працездатність, забезпечується безвідмовне функціонування електроприводу.

Час, протягом якого система управління працює за рахунок енергії, запасеної конденсатором, при зниженні напруги на ньому до критичного рівня, має вибиратися з умов забезпечення працездатності СК при зникненні напруги на струмоznімачі, що виникають при проїздах ізоляторів, а так само інших короткочасних порушеннях контакту "струмоznімач - контактна мережа", та може досягати декількох секунд.

Найбільш важкі умови переходу до гальмування утворюються при низькій швидкості обертання ТД, коли е.р.с. якоря менше рівня  $U_{2nCf}$ . Створення початкового гальмівного струму в обмотці LM відбувається в короткий відрізок ча-

су (час перемикання силових контакторів, рівний кілька сотих секунди). При цьому, під час провідного стану IP конденсатор  $C_f$  розряджається на активний опір обмотки LM. Зміна напруги на конденсаторі  $C_f$  і струму в обмотці LM відбувається відповідно з рівняннями

$$L_{LM} \cdot \frac{di_{LM}}{dt} + i_{LM} \cdot R_{LM} + U_{Cf} = 0 \quad (6)$$

$$i_{LM} = C_f \cdot \frac{dU_{Cf}}{dt} \quad (7)$$

Як зазначено [7], струм, що протікає в розглянутому контурі можна визначити з виразу

$$i(t) = C_f \cdot U_0 \cdot e^{-\delta t} (\delta \cdot \cos(\omega_z \cdot t + \psi) + \omega_z \cdot \sin(\omega_z \cdot t + \psi)) \quad (8)$$

Таким чином, під час привідного стану IP, конденсатор  $C_f$  розряджається на активний опір обмотки збудження і створює в ній струм який змінюється відповідно до виразу (8).

Після виключення IP ланцюг обмотки LM шунтується зворотнім діодом VD1. Запасена індуктивністю LM енергія гаситься в активному опорі обмотки збудження  $R_{LM}$ . Струм в контурі  $L_{LM}$ - $R_{LM}$ -VD1 може бути визначений з рівняння

$$L_{LM} \cdot \frac{di_{LM}}{dt} + i_{LM} \cdot R_{LM} = 0 \quad (9)$$

Беручи початкове значення струму рівним  $I_0$ , тобто кінцевому значенню струму в обмотці збудження під час провідного стану, рішення рівняння (9) запишемо у вигляді

$$i_{LM}(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R_{LM}}{L_{LM}} t} \quad (10)$$

Для того щоб проаналізувати час розряду  $t_{r2}$  конденсатора  $C_f$  до рівня  $U_{2n}$  при різних значеннях його ємності, початкового рівня напруги, частоти і шпаруватості регулювання, необхідно виробляти послідовність розрахунків для кожного імпульсного циклу, так як кінцеві значення напруги в конденсаторі  $C_f$  і струму в LM одного стану IP є початковим для іншого. При цьому необхідно враховувати, що для забезпечення безаварійного переключення електроприводу в гальмівній режим має виконуватися умова

$$t_{r2} \geq t_{psk} \quad (11)$$

де  $t_{psk}$  - час перемикання силових контакторів ходу і гальмування.

В іншому випадку, коли не виконується умова (11), відбувається повний розряд конденсатора  $C_f$  і зниження струму в LM. Тоді, якщо швидкість обертання ТД  $\omega_d < \omega_{kr1}$  і струм в обмотці

LM  $i_{LM} < 0.05 \cdot I_n$ , після завершення перемикачів контакторів електродинамічне гальмування не настає, а при  $\omega_d < \omega_{kr1}$  виникає струм понад номінального значення.

Перш ніж здійснити пошуки оптимальних значень факторів, що впливають на час розряду конденсатора  $C_f$  до граничного рівня  $U_2$  початковим струмом збудження, визначимо межі варіювання цих факторів.

Стосовно до розглянутих умов створення в обмотці LM початкового гальмівного струму, важливим є спосіб регулювання IP. Причому, необхідно враховувати, що для даного випадку доцільно стабілізувати струм збудження, забезпечив тим самим економічні витрати енергії накопиченої в конденсаторі  $C_f$ .

Жорстку стабілізацію струму можна здійснити при регулюванні струму за заданими рівнями або при обмеженні верхнього рівня його пульсацій  $I_{ogr}$ . Останній спосіб регулювання більш простий при реалізації. При цьому мінімально допустиме значення верхнього рівня пульсацій ініціюючого струму в обмотці LM вибирається виходячи з того, що значення нижнього рівня його пульсацій не повинно бути менше граничного значення  $I_{kr1}$ . Якщо ж ця умова не виконується, то при закінченні переходу схеми в режим гальмування, в момент закінчення імпульсного циклу, при  $\omega_d < \omega_{kr1}$  гальмування не настає.

Як показано у [7], максимально допустиме значення  $I_{ogr}$  визначається з розрахунку, що середнє значення струму не повинно перевищувати  $0,75I_n$ . Остаточні межі допустимих значень  $I_{ogr}$  обмежуються нерівністю

$$K \cdot I_n \cdot e^{\frac{R_{LM}}{f_{ip} \cdot L_{LM}}} \leq I_{ogr} \leq 0,75 \cdot I_n + \frac{\Delta I}{2} \quad (12)$$

де  $K = 0,05 \div 0,13$ .

Стосовно до конкретних параметрів тягового електроприводу, час розряду  $t_{r2}$  конденсатора  $C_f$  до напруги  $U_{2nCf}$  відбувається в період ініціації гальмівного режиму, залежить від початкової напруги  $U_{2n}$  на конденсаторі  $C_f$ , його ємності, комутованого струму  $i_k$ , робочої частоти  $f_{ip}$  перетворювача. Причому для забезпечення безаварійного переключення електропривода в гальмівний режим має виконуватися умова (11).

Таким чином, отримано математичні вирази для визначення параметрів системи при початковому збудженні ТД в режимі гальмування зарядом конденсатора вхідного фільтра, що дозволить оцінити тривалість часу ефективного регулювання струму збудження, в залежності

від ємності конденсатора, комутованого струму збудження, початкової напруги на конденсаторі.

## Висновки

1. Аналіз можливих причин зниження рівня живлячої напруги на конденсаторі вхідного фільтра електроприводу рудникових електровозів висуває завдання подальшого розширення і поглиблення досліджень, спрямованих на покращення ефективності функціонування приводу рудникових електровозів. У цьому випадку питання підвищення ефективності функціонування електричного приводу доцільно вирішувати за допомогою автоматизації процесів керування електроприводом рудникових електровозів.

2. З проведеного аналізу можливих причин зниження рівня напруги живлення контактного рудникового електровозу встановлено, що найбільш впливовими факторами, що впливають на роботу електроприводу в режимі тяги та гальмування є порушення контакту між струмоприймачем та дротом мережі живлення під час виконання гальмування електровозу та початкова швидкість гальмування. Запропоновано рішення щодо зменшення впливу коливань напруги живлення на працездатність системи електропривода, що полягає у розробці системи, яка має здійснювати аналіз початкових умов гальмування, та виконувати його найбільш ефективним із зазначених методів.

3. З аналізу електромагнітних процесів у ТД рудникових електровозів при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування була встановлена залежність, що дозволяє зробити оцінку граничних умов переходу з режиму тяги у режим гальмування в залежності від ряду факторів, які враховують конструктивні особливості системи електроприводу та початкові умови у колі гальмування.

## Список використаних джерел

1. *Волотковский С. А.* Рудничная электровозная тяга. -М.: Недра, 1981. - 389с.
2. *Синчук О. Н.* Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАУ, 2006. – 252с.
3. *Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н.* Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - .М.: Транспорт, 1980. - 471 с.

4. *Алексеев Н. И.* Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
5. *Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В.* Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.
6. *Синчук И.О.* Анализ аномальных ситуаций в асинхронных тяговых электроприводах рудничных контактных электровозов / И.О. Синчук И.О. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 30. – С. 365-367.
7. Дослідження граничних умов ефективного переходу тягового електроприводу рудничних електровозів з режиму тяги у режим гальмування / Кальмус Д.О., Грачов М.М. // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – Вип. 42. – С. 188-192.

Поступила в редакцію 07 августа 2016 г.

УДК 621.337.52

**И.О. Синчук, Д.О. Кальмус**

ДВНЗ «Криворожский национальній университет»,

ул. XXII Партсъезда, 11, м. Кривой Рог, 50027, Украина, E-mail: [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net).

## **Исследование влияния колебаний и кратковременных исчезновений напряжения питания рудничного электровоза на работу привода в режиме торможения**

*В статье проведен анализ возможных причин снижения уровня напряжения питания контактного рудничного электровоза. Установлены факторы, влияющие на работу электропривода в режиме тяги и в режиме торможения. Проанализирован характер электромагнитных процессов в тяговых двигателях рудничного электровоза при переходе системы электропривода из режима тяги в режим торможения. Из анализа были установлены выражения, позволяющие сделать оценку граничных условий перехода из режима тяги в режим торможения в зависимости от ряда факторов, которые учитывают конструктивные особенности системы электропривода и начальные условия в цепи торможения. Предложено решение относительно уменьшения влияния колебаний напряжения питания на работоспособность системы электропривода рудничного электровоза. Библ. 7, рис. 2.*

**Ключевые слова:** колебания напряжения питания; электропривод; тяговый двигатель; торможение.

UDC 621.337.52

**I. Sinchyk, D. Kalmus**

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

11, XXII Partz'yizdu str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, E-mail: [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net).

## **Research of influence of vibrations and brief disappearances of tension of feed of mine electric locomotive is to work of electric drive in the mode of braking**

*The analysis of possible reasons of decline of level of tension of feed a pin mine to the electric locomotive is conducted in the article. Factors that influence to work of electromechanic in the mode of traction and in the mode of braking are set. Character of electromagnetic processes is analysed in hauling engines mine to the electric locomotive in transition the system of electromechanic from the mode of traction in the mode of braking. From an analysis expressions, that allow to make the estimation of maximum terms of transition out of the mode of traction in the mode of braking depending on the row of factors that take into account the structural features of the system of electromechanic and initial conditions*

*in the circle of braking solution Offers in relation to reduction to influence of vibrations of tension of feed on the capacity of the system of електропривода mine to the electric locomotive, were set. Referense 7, Figures 2.*

**Keywords:** *oscillation of tension of feed; electromechanic; hauling engine, braking.*

#### Reference

1. *Volotkovsky, S. A. (1981). Mine locomotive traction. Nedra, P. 389. (Rus)*
2. *Sinchuk, O. N., Sinchuk, I. O., Yurchenko, N. N., Chernyshov, A. A., Udoenko, O. A., Pasko, O. V., Guzov, E. S. (2006). Combinatorics converters voltage modern electric traction mine locomotive / O.N. Sinchuk, Scientific publication. IEDNANU, P. 252. (Rus)*
3. *Tihmeneev, B. N., Trakhtman, L. N. (1980). The movable part of the electrified railways. Transport, P.471. (Rus)*
4. *Alekseev, N. I. (1979). Optimization of electric traction systems in underground mines. Nedra, P. 252. (Rus)*
5. *Sinchuk, O. N., Chumak, V. V. Jerzhov, O. V. (1998). Impulse control and protection system for mine locomotive transport. Monograph ADEF Ukraine, P. 280. (Rus)*
6. *Sinchuk, I. O. (2008). Analysis of abnormal situations in asynchronous traction drive of miner contact electric. VIsnik Natslionalnogo tehnlchnogo unlvrsitetu «HPI». Kharkiv: NTU «HPI», No. 30. Pp. 365-367. (Rus)*
7. *Kalmus, D. O., Grachev, M. M. (2016). Research limiting the effective transfer of traction electric mine locomotives mode traction in braking mode. VIsnik Krivorlzkogo natslionalnogo unlvrsitetu. No. 42. Pp. 188-192. (Rus)*