

УДК 622.3.002.5

**В.М. Ставицький (канд. техн. наук, доц.)**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Красноармійськ,  
кафедра гірничої електротехніки та автоматики ім. Р.М. Лейбова  
E-mail: dis\_stv@ukr.net**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЯТОРА ЗМІННОЇ НАПРУГИ  
ДЛЯ ВИРІВНЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

*Представлено результати аналізу можливості застосування тиристорного пристрою регулювання змінної напруги для вирівнювання навантажень асинхронних двигунів двоходвигового електропривода конвеєра. Вказано на недосконалість даного способу. Визначений напрямок вирішення задачі.*

**Ключові слова:** конвеєр, асинхронний двигун, ковзання, навантаження, регулятор змінної напруги, ефективність, параметри обмоток двигуна.

**Проблема та її зв'язок з науковими задачами.** Основою транспортної системи сучасного вугледобувного підприємства є скребкові та стрічкові конвеєри. Задача підвищення їхньої надійності відіграє першочергову роль у забезпеченні безперебійного функціонування шахти.

Низька вартість, простота конструкції і висока надійність обумовили оснащення електроприводів шахтних конвеєрів в більшості випадків асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором (АД). При цьому значний рівень навантаження, що припадає на скребкові конвеєри очисних вибоїв, а також велика довжина і суттєва завантаженість магістральних стрічкових конвеєрів, потребують застосування багатодвигових електроприводів. З енергетичного та економічного погляду використання 2 – 4 двигунів малої потужності замість одного потужного електродвигуна є виправданим, оскільки дозволяє покращити динамічні показники привода, зменшити механічні навантаження на тяговий орган (в разі розподілення двигунів по довжині конвеєра), знизити споживання енергії у випадку неповного завантаження конвеєра, а також забезпечує зменшення капітальних і експлуатаційних витрат.

В той же час описаному типу привода властиві деякі недоліки. Зокрема, внаслідок неідентичності механічних характеристик АД, обумовленої розбіжностями їхніх конструктивних параметрів, особливо, активного опору обмотки ротора, статичне навантаження з боку тягового органу розподіляється між електродвигунами нерівномірно, а саме - зворотно пропорційно їхнім номінальним ковзанням [1]. В найгіршому випадку (див. рис. 1) – коли номінальні ковзання двигунів двоходвигового привода становлять  $0,8s_{\text{ном}}$  і  $1,2s_{\text{ном}}$ , що відповідає вимогам діючих ГОСТ 183-74 [8], ГОСТ 28173-89 [9], та в разі завантаження конвеєра до рівня, що створює статичний момент  $2 M_{\text{ном}}$  – один з двигунів (з меншим номінальним ковзанням – характеристика 1) буде перевантажений на 20%, в той час як інший (характеристика 2), відповідно, матиме навантаження на 20 % менше за номінал. Час роботи двигуна 1 в такому режимі за критерієм припустимого нагрівання обмежується (40...50) хв. [2], в той час як номінальний режим роботи привода S1, виходячи з якого обирається потужність приводних електродвигунів, не передбачає подібного обмеження. Спрацьовування захисту від перевантажень, що є наслідком ситуації, яка склалася, в результаті обмежує продуктивність виробничої ділянки шахти.

Отже, забезпечення рівномірного розподілу навантаження між двигунами асинхронного багатодвигового привода конвеєра є актуальною задачею.

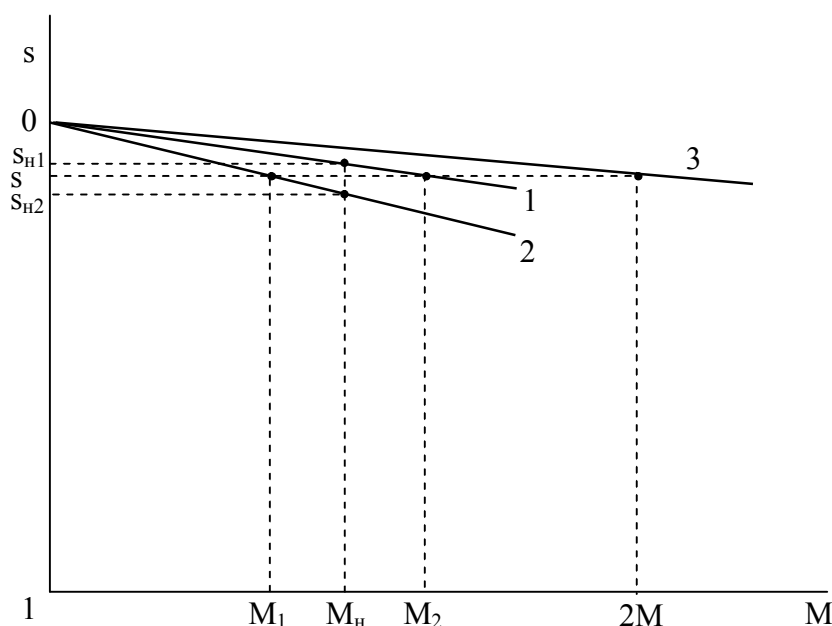


Рисунок 1 – Розподіл статичних навантажень між електродвигунами двохдвигунного привода (1, 2 – характеристики приводних електродвигунів, 3 – характеристика привода)

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідженню і розробці засобів вирівнювання навантажень двигунів багатодвигуневих систем електропривода присвячені роботи В.І.Шевченка [5], П.Х. Коцегуба, О.І. Толочко [6], Б.В. Віноградова [7] та ін. Стосовно асинхронного електропривода основні напрямки вирішення поставленої задачі зводяться до наступного:

- 1) введення в кінематичну схему приводного блоку елемента, ковзання якого може змінюватись в широких межах (використання керованих муфт);
- 2) вплив на найбільш завантажений приводний двигун з метою зменшення жорсткості механічної характеристики (регулювання критичного ковзання або критичного моменту).

Перший напрямок є найбільш поширеним. Спосіб його реалізації полягає у введенні в кінематичну схему приводного блоку конвеєра елемента, ковзання якого може змінюватись в широких межах. Прикладом цього є застосування в складі приводного блоку гідродинамічної муфти (ГМ) [1], що дозволяє регулювати ковзання шляхом зміни об'єму емульсії. Головним недоліком вказаного способу є неможливість оперативного керування приводом з ГМ. В цьому відношенні більш привабливим є застосування електромагнітної муфти (ЕМС), ковзання якої визначається струмом збудження індуктора [1]. До недоліків ЕМС можна віднести значні габарити і вартість, що не поступаються відповідним показникам приводного АД. До того ж стандартний приводний блок конвеєра комплектується ГМ і для своєї модернізації потребує значних капітальних вкладень. Загальним недоліком застосування як гідродинамічних, так і електромагнітних муфт є додаткові втрати енергії ковзання в цих елементах, що призводить до зменшення ККД привода і необхідності вирішення задачі їхнього охолодження. Другий напрямок полягає в безпосередньому впливі на двигун. Відомо [3], що жорсткість робочої ділянки МХ АД визначається наступним чином:

$$\beta = \frac{2M_{\kappa}}{\omega_0 s_{\kappa}}; \quad (1)$$

$$M_{\kappa} = \frac{3U_s^2}{2\omega_0 \left( R_s + \sqrt{R_s^2 + X_{\kappa}^2} \right)}; \quad (2)$$

$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + X_k^2}}, \quad (3)$$

де  $M_k$ ,  $s_k$  – критичні момент і ковзання;  $\omega_0$  – синхронна частота обертання;  $U_s$  – напруга статора АД;  $R_s$ ,  $R'_r$ ,  $X_k$  – параметри схеми заміщення АД.

З наведених співвідношень випливає, що за умови незмінності частоти напруги живлення поставлена мета може бути досягнута шляхом регулювання критичних значень моменту або ковзання. Реалізація цієї ідеї дозволяє спростити кінематичну схему привода конвеєра, зменшити його вартість, підвищити надійність.

В приводах, оснащених АД з фазним ротором, знаходить застосування спосіб вирівнювання навантажень за рахунок імпульсного регулювання активного опору в колі ротора найбільш завантаженого АД [1]. Необхідна жорсткість МХ досягається зміною критичного ковзання (3) при збереженні незмінної переважувальної спроможності АД (рис.2.а). Даний спосіб забезпечує ідентичність робочих ділянок МХ за рахунок усунення початкової невідповідності параметрів обмотки ротора і характеризується можливістю вирівнювання механічних навантажень і струмів, що споживаються приводними двигунами. Галузь застосування даного способу обмежується приводом на основі АД з фазним ротором, в той час, як в переважній більшості випадків електропривод конвеєра комплектується короткозамкненими АД.

**Обґрунтування напрямку досліджень.** Макіївським заводом шахтної автоматики свого часу запущений в серійне виробництво удосконалений апарат управління електроприводом гірничої машини АПМ1уд. Пристрій, як заявлено виробником, характеризується окрім стандартного набору функцій [2, 10] можливістю застосування в двохдвигуновому приводі конвеєра с метою вирівнювання навантажень АД з короткозамкненим ротором. На відміну від розглянутого вище способу регулювання жорсткості характеристики АД шляхом зміни його критичного ковзання (який передбачає збільшення активного опору в колі ротора, а відповідно і зменшення ККД двигуна, що є одним з недоліків) в апараті АПМ1уд здійснена спроба досягти потрібної жорсткості за рахунок впливу на критичний момент АД.

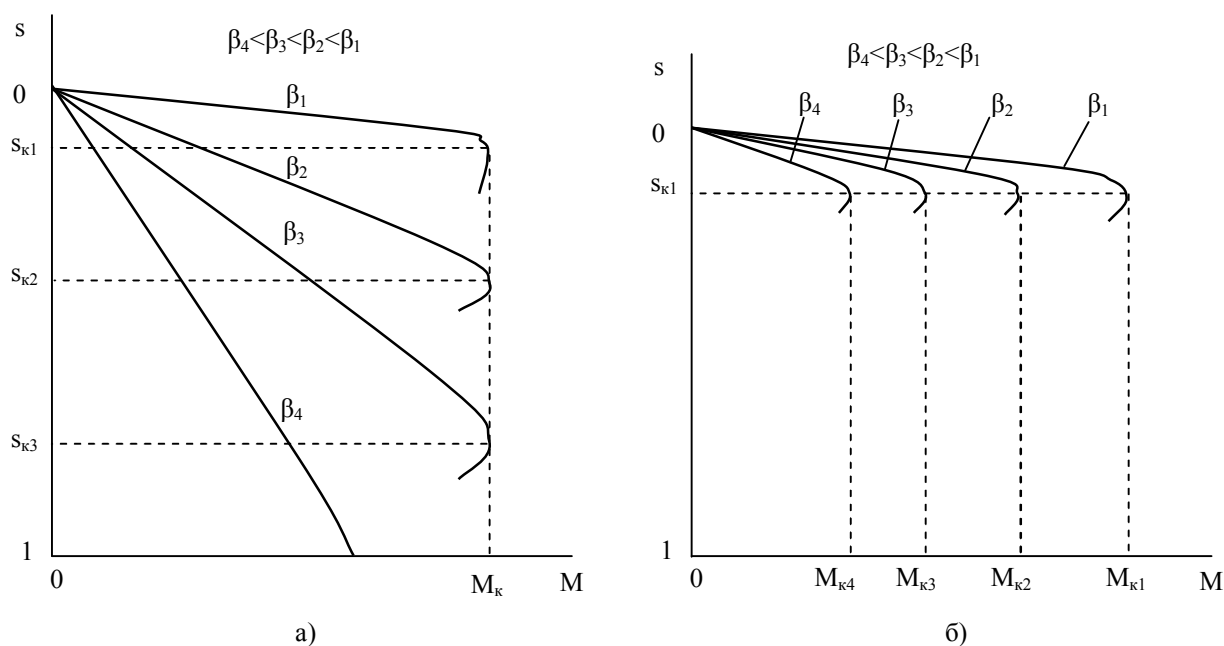


Рисунок 2 – Регулювання жорсткості механічної характеристики АД за рахунок зміни критичного ковзання (а) і критичного моменту (б)

В основу даного пристрою покладена схема тиристорного імпульсного регулятора з фазовим управлінням величиною вихідної напруги. Регулювання жорсткості МХ двигуна і критичного моменту (2) здійснюється за рахунок управління напругою, що подається на статор (рис.2.б). Відповідність синхронних частот обертання і жорсткостей робочих ділянок МХ забезпечує рівність механічних моментів на валу АД. Але ефективність вирівнювання навантажень визначається зменшенням струму статора двигуна, в зв'язку з чим необхідно дослідити вплив на розподіл струмових і механічних навантажень зміни напруги живлення найбільш навантаженого АД.

**Мета досліджень.** Таким чином, метою роботи є аналіз ефективності і визначення доцільності застосування напівпровідникових імпульсних регуляторів змінної напруги (ІРЗН) для забезпечення рівномірного розподілу навантажень між двигунами асинхронного багатодвигунового привода шахтного конвеєра.

**Методи і результати досліджень.** Для аналізу процесів в двохдвигуновому асинхронному електроприводі конвеєра може бути застосована класична теорія, що описує статичний режим роботи АД на основі Г-образної схеми заміщення [3]. Передбачається, що обидва приводних двигуна живляться синусоїдальною напругою. Реальна картина на виході апарата АПМ за умов фазового регулювання напруги живлення може бути врахована введенням додаткових гармонік, а також зсувом струму живлення по відношенню до напруги мережі на кут, величина якого відповідає куту управління тиристорами [4].

Початкова відмінність номінальних ковзань приводних АД, що є причиною нерівності механічних і струмових навантажень, обумовлена відхиленням від номіналу активних опорів роторних обмоток:

$$\frac{R_r}{R_{r\text{ ст}}} = \frac{s_H}{s_{H,\text{ст}}}, \quad (4)$$

де  $s_H$ ,  $s_{H,\text{ст}}$  – реальне і паспортне значення ковзання при номінальному навантаженні АД;  $R_r$ ,  $R_{r\text{ ст}}$  – реальне і паспортне значення активного опору ротора АД.

Інші параметри схеми заміщення АД, як правило, відрізняються від паспортних значень в значно меншій мірі. Цим обумовлена відсутність відмінностей в перевантажувальних спроможностях двигунів одного типу, що мають різні номінальні ковзання.

За наявності жорсткого механічного зв'язку між двигунами двохдвигунового привода, а також за умови апроксимації робочої ділянки МХ лінійною функцією з коефіцієнтом нахилу  $\beta$  статичні моменти на валу кожного АД ( $M_1$ ,  $M_2$ ) розподіляються зворотно-пропорційно до номінальних ковзань [1]:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{s_{H2}}{s_{H1}}. \quad (5)$$

В даних умовах для забезпечення рівності жорсткостей МХ приводних АД єдиним можливим варіантом є зменшення жорсткості МХ найбільш навантаженого (першого) двигуна за рахунок зменшення його критичного моменту (2). Застосування апарату АПМ1уд дозволяє досягти цього шляхом зміни напруги, що подається на статор двигуна. За умови лінійності робочої ділянки МХ ковзання двигуна при номінальному навантаженні визначається співвідношенням (6):

$$s_{H1}(u^*) = \frac{s_{H1}}{u^{*2}}, \quad (6)$$

де  $u^*$  – відносна напруга на статорі АД.

Результуюче ковзання ( $s$ ) і статичні моменти на валу кожного АД ( $M_1, M_2$ ) при сумарному навантаженні на привод, що дорівнює  $2M_n$ , та варіюванні напруги живлення визначаються співвідношеннями (7) – (9) [1]:

$$s(u^*) = \frac{2 \cdot s_{H1}(u^*) \cdot s_{H2}}{s_{H1}(u^*) + s_{H2}}; \quad (7)$$

$$M_1(u^*) = \frac{2 \cdot M_n \cdot s_{H2}}{s_{H1}(u^*) + s_{H2}}; \quad (8)$$

$$M_2(u^*) = \frac{2 \cdot M_n \cdot s_{H1}(u^*)}{s_{H1}(u^*) + s_{H2}}. \quad (9)$$

Струм, що споживається кожним з двигунів за даних умов, визначається з Г-образної схеми заміщення [3]:

$$I_{s1}(u^*) = \frac{U_s \cdot u^*}{\sqrt{\left[ R_s + \frac{R'_{r1}}{s(u^*)} \right]^2 + X_k^2}}; \quad (10)$$

$$I_{s2}(u^*) = \frac{U_s}{\sqrt{\left[ R_s + \frac{R'_{r2}}{s(u^*)} \right]^2 + X_k^2}}, \quad (11)$$

де  $R_{r1}, R_{r2}$  – фактичні значення активних опорів роторів АД.

Співвідношення (6) – (11) були використані для аналізу залежності статичних моментів і струмів, що споживаються, двохдвигунового привода від величини напруги живлення двигуна з найменшим номінальним ковзанням. Розрахунки здійснювались з використанням системи MathCAD. Результати, що відповідають роботі двохдвигунового електропривода потужністю  $2 \cdot 55$  кВт за умови початкового відхилення номінальних ковзань від паспортного значення на  $\pm 20\%$ , представлені на рис.3.

З отриманих графічних залежностей випливає, що зменшення напруги на статорі перевантаженого АД в 1.22 рази ( $0.82 U_{s,ном}$ ) забезпечує повне усунення півторакратної розбіжності статичних моментів. Але це не надає на стільки ж відчутного зменшення струмового навантаження, яке при зменшенні напруги практично не змінюється. Подальше зменшення напруги живлення сприяє зворотному перерозподілу механічних і струмових навантажень двигунів. Так, в разі зменшення напруги в 1.41 рази ( $0.71 U_{s,ном}$ ), струм статора початково перевантаженого АД зменшується зі 108А до 104А, що проте в 1.14 рази перевищує номінальне значення для режиму S1 і обмежує припустиму тривалість роботи двигуна інтервалом 60хв. Робота другого двигуна при цьому характеризується аналогічним струмовим перевантаженням. Вищевказане має відношення до основних гармонік напруги живлення і струму статора. Відомо [4], що при фазовому регулюванні змінної напруги значно погіршується гармонічний склад струму споживання. При потужності привода конвеєра 100...200 кВт і потужності підстанції живлення 630 кВт настільки високе споживання струмів високочастотних гармонік викликає суттєве викривлення напруги мережі і, як наслідок, погіршення режиму роботи інших споживачів.

Додатковим негативним фактором, що сприяє зменшенню ефективності застосування ІРЗН з фазовим регулюванням для вирівнювання навантажень двигунів, є властиве даному типу пристроїв зниження коефіцієнта потужності привода від значення, що визначається номінальною величиною  $\varphi_{н,АД}$  вказаного параметра АД, до значення, що відповідає куту керу-

вання тиристорами  $\alpha$  [4]. Зокрема, зменшення напруги на виході апарату в 1.22 рази збільшує споживання приводом реактивної потужності в 1.4 рази. Оскільки номінальним режимом роботи привода конвеєра є довготривалий, то в масштабах підприємства застосування пристроїв, подібних до апарату АПМ1уд, в режимі вирівнювання навантажень, тягне за собою відчутне зменшення загального коефіцієнта потужності. В сукупності перераховані фактори погіршують режим роботи як привода, так і мережі живлення.

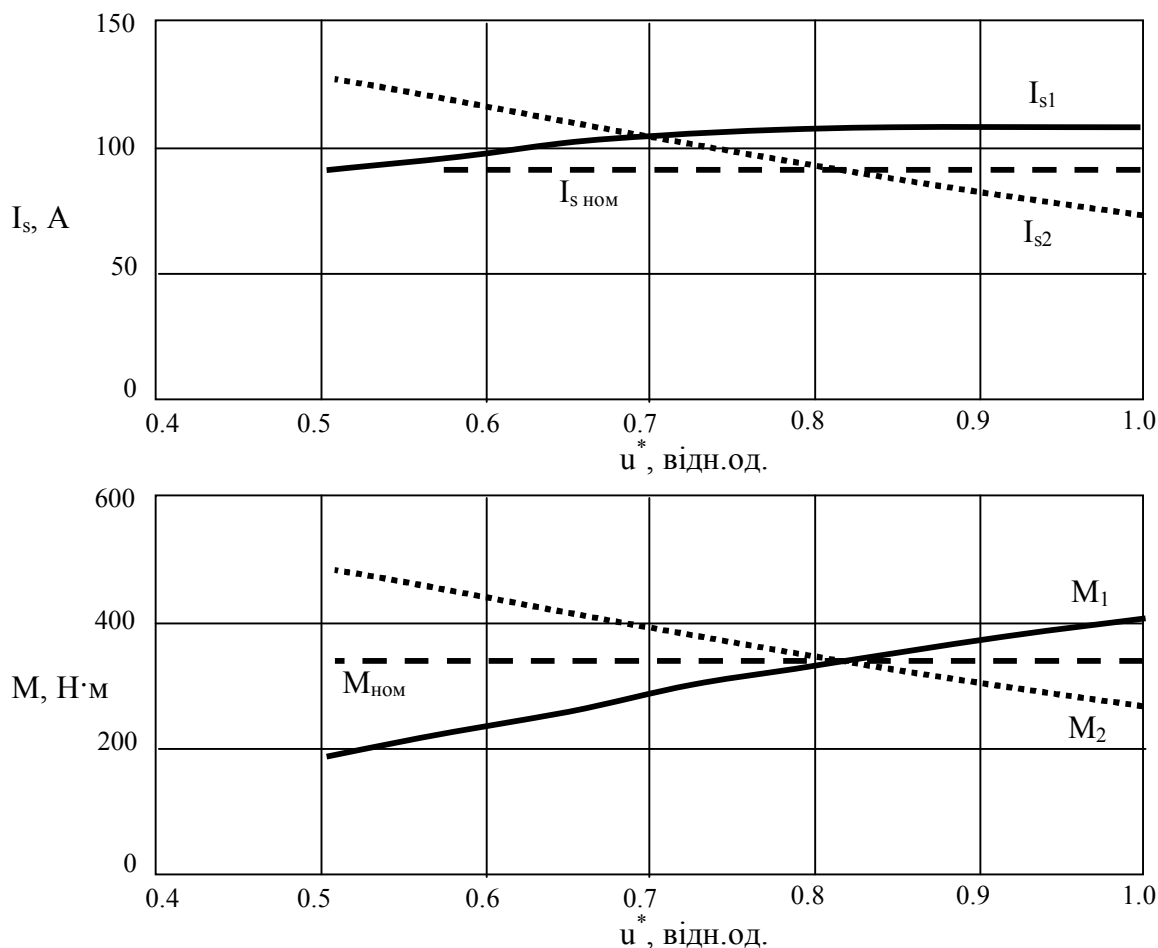


Рисунок 3 – Залежність статичних моментів і струмів АД двохдвигунного привода від напруги на статорі двигуна з найменшим значенням номінального ковзання

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** Таким чином, застосування апарату АПМ1уд не забезпечує ефективного усунення нерівномірності навантажень двигунів двохдвигунного привода шахтного конвеєра в зв'язку зі значною величиною струмів, що споживаються приводними АД, а також в наслідок погіршення енергетичних показників привода і живлячої мережі. Галузь застосування пристроїв, подібних до АПМ, доцільно обмежити пуско-захисними функціями.

Найбільш прийнятним способом обмеження статичних перевантажень АД з короткозамкненими двигунами при роботі в складі двохдвигунного привода конвеєра є удосконалення технології виготовлення обмоток роторів. Результати проведених досліджень вказують на те, що максимально припустимий розбіг номінальних ковзань (активних опорів ротора) не повинен перевищувати  $\pm 10\%$  від паспортного значення. За таких умов в найгіршому випадку забезпечується не більше, ніж 10% струмове перевантаження АД з меншою величиною номінального ковзання, що гарантує роботу двигуна без спрацьовувань теплового захисту на протязі (90...120) хв.

**Список використаної літератури**

1. Малиновский А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: [учебник для вузов] / А.К. Малиновский. – М.: Недра, 1987. – 277 с.
2. Ляшенко Н.И. Некоторые результаты эксплуатации аппарата АПМ управления пуском электропривода ленточного конвейера / Н.И. Ляшенко, А.В. Панасенко, В.Н. Зеленецкий // Уголь Украины. – 1997. – №12. – С. 35–37.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
4. Руденко В.С. Преобразовательная техника / Руденко В.С., В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.
5. Шевченко В.И. Основы теории и разработка средств выравнивания нагрузок в многодвигательных электромеханических системах горных машин: дис. ... доктора техн. наук: 05.09.03 / Шевченко Вячеслав Иванович. – М., 2002. – 340 с.
6. Коцегуб П.Х. Режимы работы двухдвигательного привода постоянного тока с питанием якорей и обмоток возбуждения от общих источников / П.Х. Коцегуб, О.И. Толочко, А.В. Кузьмин // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия «Электротехника, электроника и электропривод». – Харьков: ХПИ. – 2001. – № 10. – С. 52–54.
7. Виноградов Б.В. Проблемы создания двухдвигательных приводов барабанных мельниц / Б.В. Виноградов // Науковий вісник НГУ. Серія «Геотехнічна і гірнична механіка, машинобудування» – Дніпропетровськ: НГУ. – 2012. – № 5. – С. 61 – 65.
8. Машины электрические вращающиеся: Общие технические условия. ГОСТ 183-74. – [Действующий от 1974-12-27]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 26 с.
9. Машины электрические вращающиеся: Номинальные данные и рабочие характеристики. ГОСТ 28173-89. - [Действующий от 1989-06-29]. – М.: Стандартиформ, 2007. – 43 с.
10. Аппарат управления пуском электропривода горной машины АПМ1у [Электронный ресурс] // Официальный сайт Ростовского завода «Энергоагрегат». - Режим доступа: <http://www.yugenergoprom.ru/content/view/58/11>.

**References**

1. Malinovskiy, A.K. (1987), *Avtomatizirovannyy elektroprivod mashin i ustanovok shakht i rudnikov : Uchebnik dlya vuzov*, Nedra, Moskva, USSR.
2. Lyashenko, N.I., Panasenko, A.V., Zelenetskiy, V.N. (1997), “Some results of the use of the apparatus APM for controlling start of belt conveyor’s electric drive”, *Ugol Ukrainy*, no. 12, pp. 35-37.
3. Klyuchev, V.I., (1998), *Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov*, Energoatomizdat, Moskva, Russia.
4. Rudenko, V.S., Sen’ko, V.I., Chizhenko, I.M. (1983), *Preobrazovatel'naya tekhnika*, Vyshcha shkola, Kiyev, USSR.
5. Shevchenko, V.I., (2002), “Fundamentals of the theory and development of resources load balancing in multi-motor electromechanical systems of mining machines”, Ph.D. dissertation, 05.09.03, Moskva, Russia.
6. Kotsegub, P.H., Tolochko, O.I., Kuzmin, A.V., (2001), “Modes of operation twin-engine DC drive with the common source supply of the armature and field windings”, *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut». Seriya Elektrotekhnika, elektronika i elektroprivod*, no. 10, pp. 52 – 54.
7. Vinogradov, B.V., (2012), “Problems of development of two-motor tumbling mills drives”, *Naukoviy visnik NGU. Seriya Geotekhnichna i girnichna mekhanika, mashinobuduvannya*, no. 5, pp. 61 – 65.
8. State Committee of Standards Council of Ministers of the USSR (1974), *183:74. Mashiny elek-*

- tricheskiye vrashchayushchiyesya: Obshchiye tekhnicheskkiye usloviya.* [183:74. Rotating electrical machines: General specifications], IPK Izdatel'stvo standartov, Moscow, Russia.
9. State Committee of Standards Council of Ministers of the USSR (1989), 28173:89. *Mashiny elektricheskkiye vrashchayushchiyesya: Nominal'nyye dannyye i rabochiye kharakteristiki.* [28173:89. Rotating electrical machines: Rating data and performance characteristics], Standartinform, Moscow, Russia.
10. Official site of the Rostov plant "Energoagregat" (2014), "The device start control of electric mining machine APM1u", available at: <http://www.yugenergoprom.ru/content/view/58/11>.

Надійшла до редакції:  
30.03.2015

Рекомендовано до друку:  
д-р техн. наук, проф. О.І. Толочко

**В.Н. Ставицкий**

*Донецкий национальный технический университет*

*Анализ эффективности использования регулятора переменного напряжения для выравнивания нагрузок электродвигателей. Представлены результаты анализа возможности применения тиристорного устройства регулирования переменного напряжения для выравнивания нагрузок асинхронных двигателей двухдвигательного электропривода конвейера. Отмечено несовершенство данного способа. Обозначено направление решения задачи.*

**Ключевые слова:** конвейер, асинхронный двигатель, скольжение, нагрузка, регулятор переменного напряжения, эффективность, параметры обмоток двигателя.

**V.M. Stavitskiy**

*Donetsk National Technical University*

*Analysis of the efficiency of using AC voltage regulator to align the motor loads. The object of research is twin-engine asynchronous electric drive of mine conveyor. Scientific and technical problem is providing of load balancing of asynchronous multi-motor drive's engines. The purpose is the analysis of efficiency and advisability of thyristor AC voltage regulator (apparatus APM1ud) to provide equal load distribution between the motors asynchronous multi-motor drive of mine conveyor. Mathematical modeling methods have been used in the research process. The results of the research have been presented. Using the apparatus APM1ud provides a balance of mechanical load of the drive motors, but does not allows to align the consumption current. It causes the engine to overheat and the limited run time of the drive. The way for solving the problem has been defined. The most appropriate way to limit the static overload of induction motors when working as part of a twin-engine electric drive is to improve the technology of rotor windings. The maximum allowable deviation from the nominal slip of the motor's certificate values does not exceed  $\pm 10\%$ . Application area of thyristor AC voltage regulator is confined to starting and protective functions.*

**Keywords** conveyor, induction motor, slip, load, the AC voltage regulator, efficiency, parameters of motor windings.



**Ставицький Володимир Миколайович**, Україна, закінчив Донецький державний технічний університет, канд. тех. наук, доцент, в.о. зав. кафедри гірничої електротехніки та автоматики ім. Р.М. Лейбова ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85300, Україна). Головні напрямки наукової діяльності – силова перетворювальна техніка, автоматизований електропривод, мікропроцесорні засоби автоматизації, ідентифікація та моделювання.