

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.11

УДК 621.313.322

В.Б. Нізімов, д.т.н., професор, vikbor36@gmail.com

Д.В. Чугунов, здобувач вищої освіти, davidchugunov00@gmail.com

К.Р. Дехтяр, здобувач вищої освіти, karinadehtyar@icloud.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ЗАСТОСУВАННЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПІДЙОМНОЇ СКІПОВОЇ УСТАНОВКИ

У роботі розв'язана актуальна наукова задача, яка полягає в розробці економічного електропривода за схемою асинхронного вентильного каскаду для шахтних скіпових підйомних установок. Значна частина шахтних скіпових підйомних установок обладнана асинхронними двигунами з фазним ротором потужністю до 1000 кВт. Суттєвим недоліком АД при реостатному керуванні є наявність додаткових втрат електричної енергії ковзання при роботі на зниженій, у порівнянні із синхронною швидкістю, насамперед під час пуску і у режимі так званого «дотягування» підйомних скіпів. Крім того велика кількість контакторів веде до зниження надійності роботи скіпової підйомної установки. Метою роботи є теоретичне та експериментальне дослідження електропривода за схемою АВК для зменшення часу циклу роботи підйомної скіпової установки. Виконаний розрахунок механічних характеристик АВК у режимі двигуна та рекуперативного гальмування. Розроблена структурна схема АВК та виконаний розрахунок діаграми швидкості скіпової підйомної установки. Наведені діаграми швидкості існуючої та розробленої систем електропривода.

Ключові слова: асинхронно-вентильний каскад; асинхронний двигун; рекуперативне гальмування; діаграма швидкості.

The work solves an actual scientific problem, which consists in the development of an economical electric drive according to the scheme of an asynchronous valve cascade for mine skip lifting units. A significant part of mine skip lifting installations is equipped with asynchronous motors with a phase rotor with a capacity of up to 1000 kW. A significant disadvantage of AD with rheostat control is the presence of additional losses of sliding electrical energy when operating at reduced, compared to synchronous speed, primarily during start-up and in the mode of so-called "stretching" of lifting skips. In addition, a large number of contactors leads to a decrease in the reliability of the skip lifting installation. The purpose of the work is theoretical and experimental research of the electric drive according to the AVK scheme to reduce the cycle time of the lifting skip installation. The calculation of the mechanical characteristics of the AVK in the engine and regenerative braking mode was carried out. The structural diagram of the AVK was developed and the calculation of the speed diagram of the skip lifting installation was performed. Speed diagrams of existing and developed electric drive systems are given.

Keywords: asynchronous-valve cascade; asynchronous motor; regenerative braking; speed diagram.

Постановка проблеми

Сучасне енергозбросення машин та механізмів викликає збільшення енергоспоживання промисловими підприємствами та сільським господарством. Значним джерелом електричної енергії є теплові електростанції, які споживають 340...400 г/кВт-год. вугільного пилу. Тому необхідно збільшити видобуток вугілля шахтним підприємством, однак видобуток вугілля обмежують шахтні скіпові установки.

Шахтні підйомні скіпові установки займають особливе місце серед усього гірничошахтного обладнання, оскільки являються єдиною транспортною артерією, яка пов'язує підземний виробіток з поверхнею, і в цей же час, від надійної і безперебійної роботи підйомних установок більшою мірою залежить продуктивність роботи гірничого підприємства у цілому.

Тому актуальною технічною задачею є розробка електропривода, який забезпечить підвищення продуктивності шахтної скіпової підйомної установки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Значна частина шахтних скіпових підйомних установок обладнана асинхронними двигунами з фазним ротором потужністю до 1000 кВт.

Однією із важливих задач електропривода скіпових підйомних установок являється виконання діаграми швидкості. Швидкість руху скіпів при підході і виході із розвантажувальних кривих не повинна перевищувати 1,5 м/сек. Максимальна швидкість руху скіпової установки не повинна перевищувати значень [1]

$$U_{\max} = (0,4 \div 0,5)\sqrt{H},$$

де H — висота підйому, м. При ревізії стану підйомних канатів швидкість руху не повинна перевищувати 0,3 м/с.

Керування пуском АД виконується вмиканням в коло ротора активного опору. Вимикання пускових резисторів здійснюється у функції часу з коректування за струмом статора. Уповільнення підйомних посудин здійснюється при переведенні двигуна у режим динамічного уповільнення або механічного гальмування [2].

Суттєвим недоліком АД при реостатному керуванні є наявність додаткових втрат електричної енергії ковзання при роботі на зниженій, у порівнянні із синхронною, швидкістю, насамперед під час пуску і у режимі так званого «дотягування» підйомних скіпів.

Крім того, велика кількість контакторів веде до зниження надійності роботи скіпової підйомної установки.

Формулювання мети дослідження

Теоретичне та експериментальне дослідження електропривода за схемою асинхронного вентильного каскаду (АВК) для зменшення часу циклу підйомної скіпової установки.

Виклад основного матеріалу

Найбільш простими поширеними схемами АВК являються схеми з проміжним колом постійного струму (рис. 1), в яких ЕРС ротора випрямляється трифазним мостовим випрямлячем і в коло випрямленого струму вмикається добавочна ЕРС від вентильного перетворювача (інвертора). Головними елементами схеми являються:

- АМ — асинхронний двигун з фазним ротором;
- В — некерований напівпровідниковий випрямляч;
- І — керований тиристорний перетворювач для інвертування випрямленого струму ротора;

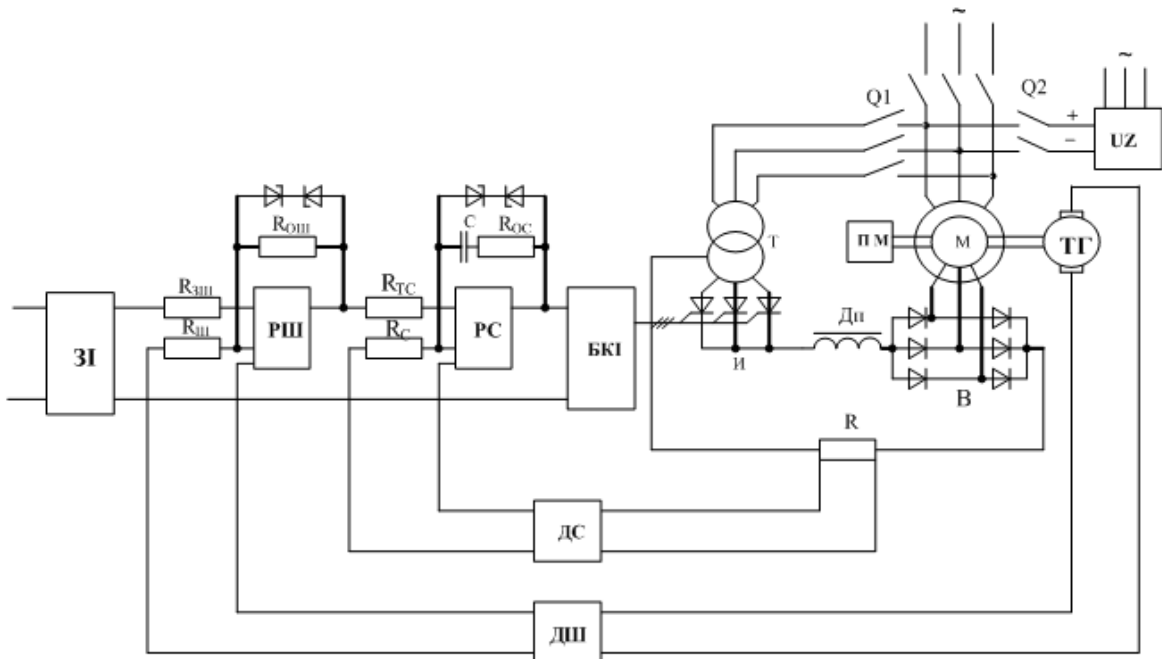


Рис. 1. Принципова схема АВК

Т — трансформатор для узгодження напруги ротора з напругою мережі;

ДС — згладжувальний дросель для згладжування пульсацій.

Розрахунок механічних характеристик виконано на підставі наступних виразів [3]. Рівняння механічної характеристики АВК має вигляд:

$$M_{ABK} = 3,82 \cdot k_M \cdot \left(\frac{S - S_0}{S(1+q) + \rho} - \left(\frac{S - S_0}{S(1+q) + \rho} \right)^2 \right), \quad (1)$$

де k_M — коефіцієнт перевантаження асинхронного двигуна; S — ковзання ротора в режимі двигуна $S = \frac{\omega_0 - \omega_p}{\omega_0}$; в режимі динамічного гальмування $S = \frac{\omega_p}{\omega_0}$; S_0 — ковзання холостого руху для зазначеного кута інвертування β ;

$$S_0 = \varepsilon \cdot \cos \beta + \lambda; \quad \lambda = \frac{\Delta U}{K_1 E_p}; \quad \varepsilon = \frac{K_2 E_{2T}}{K_1 E_p}; \quad q = \frac{2\pi r_1^1}{3x_p};$$

$$\rho = \frac{x_T}{x_p} + \frac{2\pi r_2}{3x_p} + \frac{\pi r_{CD}}{3x_p}; \quad Z_T = \frac{E_{2T} \cdot U_k \%}{100 \cdot I_{2HT}}; \quad r_T = \frac{\Delta P_{K3} \cdot 10^3}{3 \cdot I_{2HT}^2};$$

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2}; \quad r_{CD} = (0,15 \dots 0,3)r_T.$$

Критичне ковзання можна визначити згідно з формулою

$$S_{nep} = \frac{2\sqrt{2} \cdot S_0 + \rho}{1/82 - q}.$$

Поточне значення ковзання знаходиться в межах $S_0 < S < S_k$ для заданого кута інвертування β . Розрахункові залежності при кутах інвертування 90° ; 60° ; 45° ; 30° наведені на рис. 2.

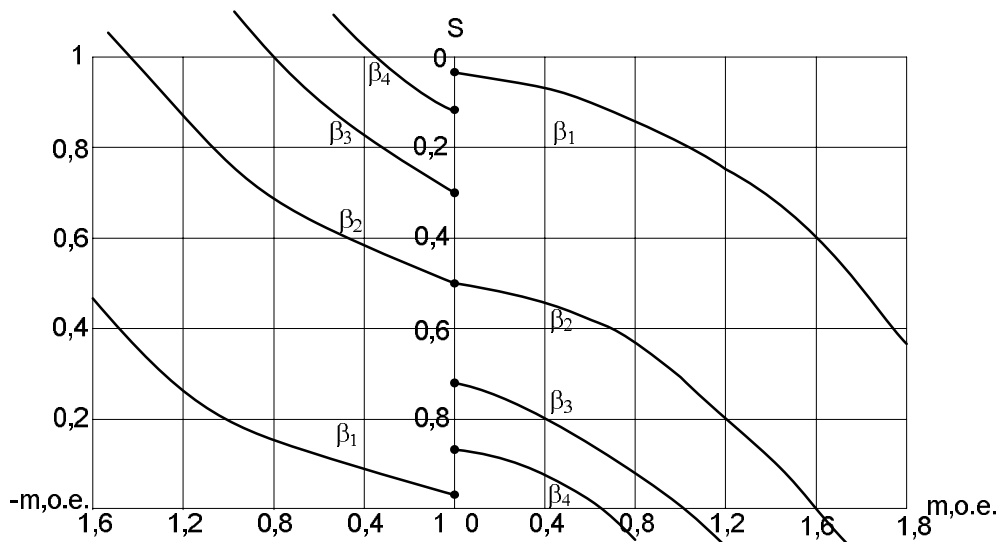


Рис. 2. Механічні характеристики АВК у режимах двигуна та динамічного гальмування при кутах: $\beta_1 = 90^\circ$; $\beta_2 = 60^\circ$; $\beta_3 = 45^\circ$; $\beta_4 = 30^\circ$

Структурна схема системи асинхронного вентиляного каскаду представлена на рис. 3. В схемі регулятор швидкості являє собою пропорційний регулятор; регулятор струму — пропорційно-інтегральний регулятор.

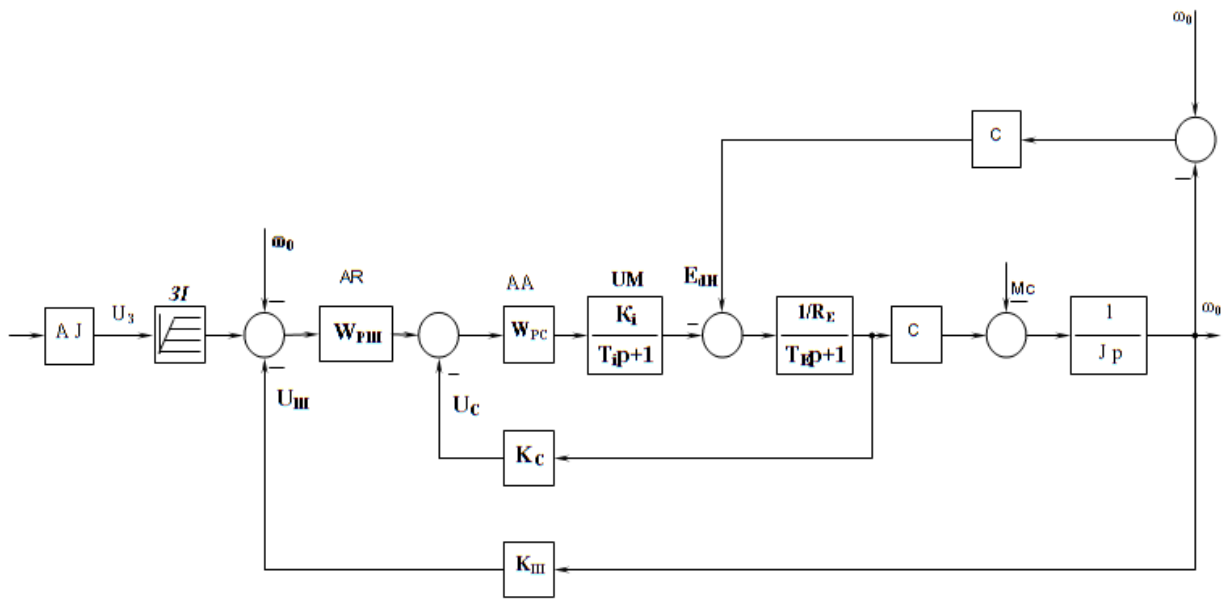


Рис. 3. Структурна схема АВК

Джерело додаткової ЕРС є аперіодичне коло першого порядку.

Перехідні процеси розраховуються через коло випрямленого струму каскаду. Необхідна точність регулювання швидкості двигуна забезпечується зворотними зв'язками за швидкістю і струму.

Розрахункові параметри АВК:

1. Коефіцієнт передачі двигуна

$$c = \frac{k_1 \cdot E_p}{\omega_0}, \quad (2)$$

де $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$.

2. Коефіцієнт підсилення інвертора.

$$k_i = \frac{3 \cdot E_{dMAX}}{2 \cdot U_V}, \quad (3)$$

де U_V — напруга керування, $U_V = 10$ В; T_i — стала часу інвертора, $T_i = 0,001 \dots 0,005$ с.

3. Електромагнітна стала часу кола випрямленого струму:

$$T_e = \frac{L_{dk}}{R_e} = \frac{L_p + L_{CD} + L_{TP}}{R_e}, \quad (4)$$

де L_p — індуктивність обмотки ротора, $L_p = \frac{x_p}{2 \cdot \pi \cdot f_1}$; L_{TP} — індуктивність трансформатора,

$L_{TP} = \frac{x_{TP}}{2 \cdot \pi \cdot f_1}$; L_{CD} — індуктивність згладжувального дроселя, $L_{CD} = (0,15 \dots 0,3) L_p$; R_e — еквівалентний опір кола випрямленого струму,

$$R_e = \frac{3 \cdot x_p \cdot S_{CP}}{\pi} + \frac{3 \cdot x_{TP}}{\pi} + 2 \cdot r_p + 2 \cdot r_1' \cdot S_{CP} + r_{CD} + 2 \cdot r_{TP}, \quad (5)$$

де S_{CP} — середнє ковзання двигуна, $S_{CP} = 0,5$.

4. Електромеханічна стала часу каскаду:

$$T_M = J_{\Sigma} \frac{R_e}{c^2}, \text{ с.} \quad (4)$$

де J_{Σ} — сумарний момент інерції привода, $J_{\Sigma} = J_p + J_{mex.}$; $J_{mex.} = n\% \cdot J_p$

5. Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом

$$k_C = \frac{U_{Tmex.}}{\lambda \cdot I_{dH}}, \quad (5)$$

де $U_{Tmex.}$ — максимальна задаюча напруга, 10 В; λ — коефіцієнт перевантаження за струмом.

6. Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю

$$k_{PII} = \frac{U_{Tmax.}}{\omega_p}. \quad (6)$$

7. Коефіцієнт регулятора швидкості:

$$k_{PII} = \frac{T_M \cdot C \cdot K_T}{4 \cdot T_n \cdot K_C \cdot R_e}. \quad (7)$$

8. Коефіцієнти розрахункової схеми:

$$k_1 = \frac{R_e}{2 \cdot T_{II} \cdot K_{II} \cdot K_T};$$

$$k_3 = \frac{1}{R_e};$$

$$k_4 = \frac{R_e}{C \cdot T_M}.$$

Розрахункова діаграма швидкості АВК наведена на рис. 4.

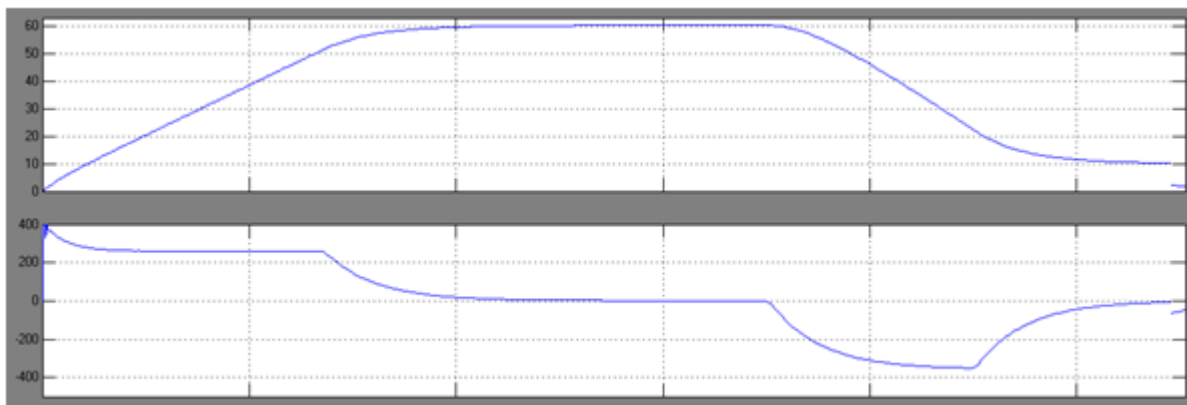


Рис. 4. Розрахункова діаграма швидкості АВК: 1 — швидкість руху скіпа; 2 — випрямлений струм каскаду

З метою підтвердження основних теоретичних положень та розрахункових залежностей були проведені промислові випробування електропривода за схемою АВК для скіпової підйомної установки шахти №42 — Капітальна.

Основні дані підйомної установки:

- 1) призначення підйому — вантажний, двоскіповий;
- 2) висота підйому — 227 м;
- 3) тип підйомних посудин — скіпи із розвантаженням через дно із відхиленням кузова;
- 4) корисна ємність підйомної посудини — 3600 кг;
- 5) вага порожньої посудини — 3120 кг;
- 6) максимальна швидкість руху посудини — 5,8 м/сек;
- 7) тип підйомної машини — 2БМ 3000/1520;
- 8) Вага одного п.м. канату — 3,5 кг п.м.;
- 9) підйомний електродвигун АК-12-52-8:
- номінальна потужність — 320 кВт;

- номінальна швидкість — 740 об/хв.;
 - номінальна напруга статора — 6000 В;
 - номінальний струм статора — 39 А;
 - номінальна напруга ротора — 595 В;
 - номінальний струм ротора — 335 А;
- 10) роторна група вентилів:
- тип вентилів – ВКД-200/700;
 - номінальний струм вентиля — 200 А;
 - номінальна зворотна напруга — 700 В;
 - схема з'єднання вентилів — трифазна мостова;
 - охолодження повітряне примусове;
- 11) інверторна група вентилів:
- тип ртутного випрямляча — РМВ-250×6-У;
 - номінальний випрямлений струм — 750 А;
 - номінальна випрямлена напруга — 825 В;
 - схема з'єднання — трифазна нульова;
- 12) трансформатор інвертора:
- тип трансформатора — ТМРУ-600-10;
 - потужність — 343 кВА;
 - лінійна первинна напруга — 6000 В;
 - фазна вторинна напруга — $532-560 \pm 5\%$ В, дві зворотні зірки із зрівнювальними реакторами;
- 13) Джерело постійного струму динамічного гальмування.
- В якості джерела постійного струму встановлені кремнієві вентиля типу ВК-200, з'єднані по однофазній двонапівперіодній схемі:
- номінальний струм вентиля — 200 А;
 - номінальна зворотна напруга вентиля — 300 В;
 - випрямлена напруга — 209 В;
- 14) добова продуктивність підйомної установки — 3600 т/добу.
- Існуюча скіпова підйомна установка обладнана асинхронним двигуном з пусковим реостатом у колі ротора.
- Режим пуску електропривода виконується в функції часу з обмеженням кидків струму за допомогою реле струмових прискорень. Зниження швидкості забезпечується у режимі вільного ходу. Початок зниження швидкості забезпечується задавачем початку уповільнення, керуючий сигнал якого залежить від ступеня завантаження скіпа. Тому час вільного ходу залежить від вантажу скіпа, що суттєво впливає на час циклу підйому. Режим вибору слабину канату та зазору у зубчастих передачах, а також у режимі «дотягування» скіпа забезпечується першими ступенями пускового реостату.
- На рис. 5 наведена експериментальна діаграма швидкості при релейно-контакторному керуванні ЕП скіповою підйомною установкою.

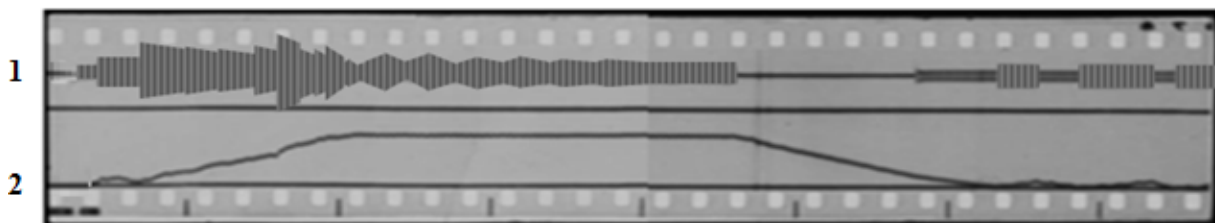


Рис. 5. Діаграма швидкості існуючої установки: 1 — струм статора АД; 2 — швидкість руху скіпа

Аналіз наведеної діаграми показує, що час циклу підйому залежить від нестабільності пускових характеристик. Крім того, у режимі зниженої швидкості привода мають місце втрати енергії ковзання. Час циклу підйому посудини знаходиться в межах 53...55 сек у залежності від завантаження скіпа.

Автоматизований електропривод, що досліджується, виконаний за схемою АВК із явно-вираженим колом постійного струму (рис. 6). Роторна група вентилів виконана за трифазною мостовою схемою на півпровідникових вентилях. Інверторна група вентилів виконана за трифазною нульовою схемою на одноанодних екситронах.

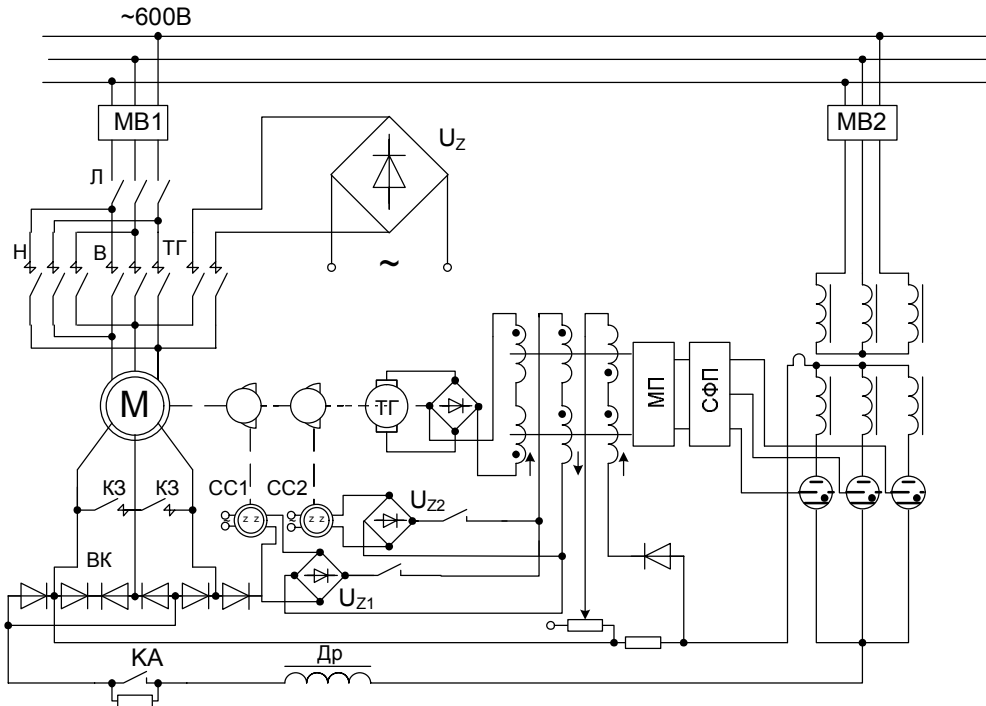


Рис. 6. Принципова схема АВК привода скіпової підйомної установки: СС1, СС2 — сельсинні командоапарати, МП — магнітний підсилювач, СФП — статичний фазообертовий пристрій, МВ1, МВ2 — масляні вимикачі, Л — лінійний контактор, В, Н — контактори для руху вперед і назад, ДГ — контактор динамічного гальмування, КЗ — контактори для замикання кола ротора, ВК — кремнієві випрямлячі, ТГ — тахогенератор, РВ — ртутні випрямлячі

Пускові та гальмівні режими забезпечуються керуючим сигналом в функції шляху від сельсинних командоапаратів СС1 і СС2, які пов'язані з профілями ретардуючого диска показчика глибини. Підвищення жорсткості характеристик забезпечується негативним зворотним зв'язком за швидкістю. Для зниження швидкості застосовується режим рекуперативного динамічного гальмування.

Експериментальна діаграма швидкості наведена на рис. 7. Час циклу завантаженого скіпа з використанням електропривода за схемою АВК з рекуперативним динамічним гальмуванням складає $t_{\text{ч}} = 50 \dots 53$ сек.



Рис. 7. Діаграма швидкості АВК: 1 — постійний струм динамічного гальмування $i_{\text{дм}}$; 2 — випрямлений струм каскаду $i_{\text{д}}$; 3 — струм завдання; 4 — струм керування СІФК; 5 — струм зворотного зв'язку за швидкістю; 6 — швидкість руху скіпа

Аналіз наведених діаграм швидкості показує, що час циклу підйому скіпа зменшився на 3...5 сек. Тоді продуктивність скіпової підйомної установки зросла на 5 % та склала 3780 т/добу.

Висновки

1. Існуючі схеми релейно-контакторного керування асинхронним двигуном обмежують продуктивність скіпових підйомних установок із-за нестабільності механічних характеристик та мають втрати енергії ковзання.

2. Система електропривода за схемою АВК, яка досліджується, забезпечує зменшення часу циклу підйому скіпової установки та зростання продуктивності на 3...5 %.

Список використаної літератури

1. Малиновский А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахты рудников: Учебник для вузов. М. : Недра, 1987. 277 с.
2. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. Изд. 3-е перераб. и доп. М. : Энергия, 1976. 488 с.
3. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М. : Энергия, 1972. 240 с.
4. Кондратенко В.П., Великовский Я.А., Низимов В.Б. О новой более экономичной схеме автоматизации шахтной подъемной машины. *Уголь*, 1966. №1.

APPLICATION OF RECEIVABLE DYNAMIC BRAKING TO INCREASE THE PRODUCTIVITY OF A LIFTING SKIP INSTALLATION

Nizimov V., Chugunov D., Dekhtyar K.

Abstract

The work solves an actual technical problem — increasing the productivity of the mine skip installation by shifting the lift cycle of the skip loading. The aim of the work is to provide a theoretical and experimental study of the electric drive according to the scheme of the asynchronous valve cascade (AVK) to reduce the cycle time of the lifting skip installation.

The task of the work is the development of an economical electric drive according to the scheme of an asynchronous valve cascade for mine skip lifting installations. To increase the productivity of the lifting installation, an automated electric drive according to the scheme of an asynchronous valve cascade is proposed. Calculated and constructed static and mechanical characteristics of the cascade for engine and regenerative braking modes. The structural diagram of the cascade is given, on the basis of which the speed diagram is constructed. Industrial tests of the electric drive according to the cascade scheme were carried out on an operating mine skip unit. It is proven that the proposed scheme will ensure a reduction in the lifting cycle time of the skip installation and an increase in productivity by 3...5 %.

The developed electric drive system is recommended for the modernization of existing mine skip lifting installations equipped with a relay-contactor control scheme.

References

- [1] Malinovskij A.K. (1987) *Avtomatizirovannyj elektroprivod mashin i ustanovok shaht i rudnikov. [Automated electric drive of machines and installations of coalpits and mines].* Uchebnik dlya vuzov . Moscow. Nedra. 277 p. [in Russian].
- [2] Sokolov M.M. (1976) *Avtomatizirovannyj elektroprivod obshchepromyshlennyh mekhanizmov. [Automated electric drive of general industrial mechanisms]* Izd. 3-e pererab. i dop. Moscow. Energiya, 488 p. [in Russian].

- [3] Onishchenko G.B. & Yun'kov M.G. (1972) *Elektroprivod turbomekhanizmov.*[*Electric drive of turbomechanisms*]. Moscov. Energiya, 240 p. [in Russian].
- [4] Kondratenko V.P. & Velikovskij YA.A. & Nizimov V.B. (1966) «*O novej bolee ekonomichnoj skheme avtomatizacii shahtnoj pod"yomnoj mashiny*» [*About the new more economical scheme automation of mine hoisting machine*]. Ugol', №1. [in Russian].