

## Список літератури

1. Малахов Г.М., Безух В.Р., Петренко П.Д. Теория и практика выпуска руды. – М.: Недра, 1968. – 311с.
2. Куликов В.В. Совместная и повторная разработка рудных месторождений. – М.: Недра, 1965. – С. 291.
3. Инструкция по нормированию, прогнозированию и учету показателей извлечения руды из недр при подземной разработке железных месторождений / Бызов В.Ф., Азарян А.А., Колосов В.А., Моргун А.В., Плеханов В.К., Попов С.О. – Кривой Рог: Минерал, 2003. – 117с.
4. Пат. 48630 А Украина, МКИ Е 21 С 41/00. Спосіб розробки рудних покладів / Калініченко В.О., Калініченко О.В. (Україна); Заявл. 26.10.2001; Опубл. 15.08.2002, Бюл.№8. – 2 с.
5. Калиниченко В.А., Калиниченко Е.В. Повышение эффективности извлечения руды при системах с обрушением // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: Изд-во КТУ. - 2001. - Вып.74. – С. 65-68.
6. Куликов В.В. Исследование движения отбитой руды при ее выпуске под налегающими пустыми породами // Московский институт цветных металлов и золота. – Сб.№21. – Metallurgizdat. – 1952. – С.21-25.
7. Куликов В.В., Дейнека А.Г. Методика прогнозирования показателей извлечения руды. – М.- Изд. ИГД им.А.А. Скочинского. – 1969. – 161 с.
8. Куликов В.В. Выпуск руды. – М.: Недра, 1980. – 303с.
9. Дубынин Н.Г. Выпуск руды при подземной разработке. - М. «Недра», 1965. – 267с.
10. Балхавдаров Х.А., Сабаткоев М.М., Габараев О.З. Динамика потерь руды на днище между воронками // Изв. вузов. Горный журнал. – 1991. - №10. - С. 24-26.
11. Балхавдаров Х.А., Сабаткоев М.М. Параметры сферы влияния выработки для выпуска руды // Горный журнал. – 1986. - №2. – С. 14-17.
12. Guy Lauret et Patrice Brasse / Explortation selective des amas uraniferes: evolution de la methode d'exploitation // Mines carrierez – revue de la sosiete de l'industrie minerale. - 1999. – Vol.81. - P. 41-44.
13. Вольфсон П.М., Камбаров В.А. Определение активного размера выпускных отверстий при различных способах выпуска // Горный журнал. – 1984. - №8. – С. 35-39.
14. Кунин И.К. Выпуск и доставка руды при подземной разработке. – М.: Недра, 1964. – 198 с.
15. Протунин Ю.Е. Математическая модель истечения сыпучих материалов // Горный журнал. – 2004. - №10. – С. 82-84.

Рукопис подано до редакції 30.03.2017

УДК 621.382.333

І. А. КОЗАКЕВИЧ, Ю. Г. ОСАДЧУК, кандидати техн. наук, доценти, А. Л. АМІРОВ, студент, Криворізький національний університет

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ ГАЛЬМУВАННЯ ТЯГОВИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

**Мета.** Метою даної роботи є дослідження питання формування сигналу завдання електромагнітного моменту системи векторного керування асинхронним двигуном з метою максимізації обсягу повернутої електроенергії до джерела при рекуперативному гальмуванні. Для досягнення поставленої мети виконано отримання аналітичних залежностей, що пов'язують гальмівний момент, створюваний двигуном у режимі рекуперативного гальмування, з обмеженнями величин напруг та струмів, а також параметрами схеми заміщення двигуна; аналіз функціонування двигуна у режимі рекуперативного гальмування при роботі з кутовою швидкістю, що є меншою за базову, а також при роботі з ослабленням поля асинхронного двигуна. Пошук шляхів оптимізації даного процесу є можливим, і в даній роботі представлено аналітичне вирішення даної задачі, в результаті проведення якого отримані залежності, що дозволяють визначити рекомендовану величину сигналу завдання гальмівного моменту для максимізації кількості поверненої електроенергії до джерела.

**Методи дослідження.** Дослідження виконувалося з використанням рівнянь стану асинхронного двигуна, що отримуються з використанням ідеалізованої електричної машини, у системі координат d-q. Вони слугували підґрунтям для одержання математичних залежностей, що описують можливості максимізації кількості повернутої до автономного джерела живлення енергії.

**Наукова новизна.** Встановлено величину гальмівного моменту у режимі рекуперативного гальмування при роботі з кутовою швидкістю, що є меншою за базову, а також з ослабленням поля, використання якого в системі керування в якості сигналу завдання забезпечує максимальний обсяг повернутої до джерела електроенергії.

**Практична значимість.** Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання представлених залежностей для розробки алгоритмів керування електричними та гібридними транспортними засобами.

**Результати.** Розраховані граничні умови існування режиму рекуперативного гальмування для асинхронного двигуна, що дозволяють знайти мінімальну кутову швидкість для такого режиму.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, рекуперативне гальмування, гальмівний момент, енергоефективність.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Проблема ефективності процесу гальмування електроприводів завжди була і є актуальним напрямком,

котрий необхідно досліджувати як цілому, так і в конкретних реалізаціях [1]. Достатньо ефективним видом гальмування електроприводів, особливо в тяговому варіанті виконання, є рекуперативне [2]. Особливо важливими ці питання стають під час аналізу електричних видів транспортних засобів з автономними джерелами живлення через те, що використання даних режимів дозволяє помітно підвищити шлях [3], що долається від однієї зарядки батареї, за рахунок повернення у неї частини накопиченої у механічній частині приводу енергії при уповільненнях. За останній час найбільшу популярність в якості тягових двигунів набули синхронні двигуни з постійними магнітами, що пояснюється їх високою щільністю потужності, високим ККД, відсутністю необхідності в електричному контакті з рухомими частинами машинами [4]. Найбільш суттєвим недоліком даного типу двигунів є висока вартість, що пояснюється низькою доступністю рідкоземельних матеріалів. В таких випадках в якості альтернативи синхронним двигунам з постійними магнітами можна розглядати асинхронні двигуни (АД), які, хоча і не досягають настільки високих значень ККД [5] через те, що ЕРС ротора наводиться через повітряний зазор, є набагато більш дешевими при серійному виготовленні. Системи векторного керування АД є своєрідним стандартом в керуванні АД та поділяються на системи з прямим та непрямим полеорієнтуванням [6]. Між тим, при цьому існують проблеми, без вирішення котрих ефективність цього виду двигунів не є задовільною.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідженню параметричних складових та систем керування асинхронних частотно-керованих електроприводів присвячена велика кількість публікацій. При цьому автори, вивчаючи питання побудови бездатчикових систем, в т. ч. з використанням адаптивних алгоритмів, систем керування багаторівневими перетворювачами та принципи побудови систем векторного керування, не достатню увагу приділяють дослідженню режимів рекуперативного гальмування. Це, в свою чергу, не дозволяє в повній мірі реалізувати позитивні ефекти від впровадження у електроприводах транспортних засобів запропонованих у дослідженнях систем. У [7] розглядаються питання систем з двома накопичувачами енергії. Для узгодження величин напруг акумуляторної батареї при певному стані її зарядженості використовується DC-DC перетворювач у ланці постійного струму, що дозволяє згладжувати струм, що споживається від батареї. У роботі [8] дві акумуляторні батареї використовуються для живлення гібридного електричного транспортного засобу, коли стан заряду основної батареї є близьким до мінімально допустимого значення. У даній роботі виконане інтегрування традиційного гібридного електричного транспортного засобу. Більш економічно доцільний варіант структури системи керування представлений у [9]. Він містить суперконденсатор та DC-DC перетворювач, а комутація обмоток здійснюється за допомогою простого бездатчикового алгоритму зі скалярним формуванням величини напруги при зміні частоти, що дозволяє реалізувати плавний перехід з двигунного до генераторного режиму. У роботі [10] система керування асинхронним двигуном розроблена з позицій максимізації втрат потужності у статорних та роторних обмотках при переході в режим гальмування. Дане рішення дозволяє виключити необхідність застосування додаткових схемних рішень у структурі напівпровідникового перетворювача. У роботі [11] було представлено модифікацію інвертора для живлення трифазної машини змінного струму, що дозволяє побудувати його на двох плечах, скоротивши число силових елементів, приймаючих участь у формуванні вихідної напруги. Суттєвим недоліком даного рішення є високе значення напруги ланки постійного струму, а також високі викривлення вхідного струму.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження питання формування сигналу завдання електромагнітного моменту системи векторного керування АД з метою максимізації обсягу повернутої електроенергії при рекуперативному гальмуванні.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: 1) отримання аналітичних залежностей, що пов'язують гальмівний момент, створюваний двигуном у режимі рекуперативного гальмування, з обмеженнями величин струмів та напруг, а також параметрами схеми заміщення двигуна; 2) аналіз функціонування двигуна у режимі рекуперативного гальмування при роботі з кутовою швидкістю, що є меншою за базову, а також при роботі з ослабленням поля; 3) виявлення граничних умов існування режиму рекуперативного гальмування, знаходження аналітичної залежності для мінімальної величини кутової швидкості, при роботі на якій можлива віддача енергії від двигуна до джерела живлення.

**Викладення матеріалу та результати.** Розглянемо математичний опис асинхронного дви-

гуна з короткозамкненим ротором у системі координат  $d$ - $q$ , що обертається синхронно з вектором живлячої напруги статора

$$\frac{\Psi_{sd}}{dt} = u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_e \Psi_{sq}; \quad \frac{\Psi_{sq}}{dt} = u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_e \Psi_{sd};$$

$$\frac{\Psi_{rd}}{dt} = -R_r i_{rd} - (p\omega - \omega_e) \Psi_{rq}; \quad \frac{\Psi_{rq}}{dt} = -R_r i_{rq} + (p\omega - \omega_e) \Psi_{rd},$$

де  $R_s$  та  $R_r$  – активні опори обмоток статора й ротора двигуна,  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$  – складові вектору напруги, що прикладена до статора двигуна,  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  – складові статорного струму,  $\Psi_{sd}$ ,  $\Psi_{sq}$ ,  $\Psi_{rd}$ ,  $\Psi_{rq}$  – складові векторів потокозчеплення статора й ротора,  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора,  $\omega_e$  – кутова швидкість обертання поля машини, що відповідає швидкості обертання системи координат  $d$ - $q$ ,  $p$  – кількість пар полюсів.

При цьому потокозчеплення можна розраховувати за наступними залежностями

$$\Psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}; \quad \Psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}; \quad \Psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd}; \quad \Psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq},$$

де  $L_s$ ,  $L_r$  – індуктивності обмоток статора й ротора,  $L_m$  – взаємна індуктивність статора й ротора.

Крутний момент при цьому може бути розрахований так

$$M_e = L_m p (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

Скомбінувавши дані рівняння та виразивши з них складові векторів напруги, маємо

$$u_{sd} = \frac{\Psi_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_e L_s i_{sq} - \omega_e L_m i_{rq}; \quad u_{sq} = \frac{\Psi_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + \omega_e L_s i_{sd} + \omega_e L_m i_{rd};$$

$$0 = \frac{\Psi_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} + (p\omega - \omega_e) L_r i_{rq} + (p\omega - \omega_e) L_m i_{sq}; \quad 0 = \frac{\Psi_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} - (p\omega - \omega_e) L_r i_{rd} - (p\omega - \omega_e) L_m i_{sd}.$$

З метою дослідження межі між рекуперативним та нерекуперативним гальмуванням асинхронного двигуна, розглянемо залежність для споживаної асинхронним двигуном потужності

$$p = M_e \omega + i_{sd}^2 R_s + i_{sq}^2 R_s + i_{rd}^2 R_r + i_{rq}^2 R_r + p_{cm},$$

де  $p_{cm}$  – втрати в сталі машини.

Розглядаючи лише усталений режим роботи, тобто нехтуючи наявністю похідних потокозчеплення у осях системи координат, що обертається синхронно з полем машини, отримуємо наступні залежності для складових вектору роторного струму

$$i_{rd} = -\frac{(p\omega - \omega_e)^2 L_m L_r}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} i_{sd} - \frac{R_r (p\omega - \omega_e) L_m}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} i_{sq}; \quad i_{rq} = \frac{(p\omega - \omega_e) L_m R_r}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} i_{sd} - \frac{(p\omega - \omega_e)^2 L_m L_r}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} i_{sq}.$$

Для оцінки величини напруги статора виконаємо піднесення до квадрату та додавання даних рівнянь. Отримуємо

$$u_{sd}^2 + u_{sq}^2 = \left( \left( R_s - \frac{\omega_e L_m^2 R_r (p\omega - \omega_e)}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 + \left( L_s - \frac{L_m^2 (p\omega - \omega_e)^2}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 \omega_e^2 \right) i_{sd}^2 +$$

$$+ \left( \left( \frac{L_m^2 (p\omega - \omega_e)^2 L_r}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} - L_s \right)^2 \omega_e^2 + \left( R_s - \frac{\omega_e L_m^2 R_r (p\omega - \omega_e)}{(p\omega - \omega_e)^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 \right) i_{sq}^2.$$

Введемо величину ковзання двигуна у даний вираз та, виконавши ряд спрощень, маємо

$$u_{sd}^2 + u_{sq}^2 = \left( \left( R_s - \frac{\omega_e^2 s L_m^2 R_r}{s^2 \omega_e^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 + \left( L_s - \frac{L_m^2 s^2 \omega_e^2 L_r}{s^2 \omega_e^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 \omega_e^2 \right) (i_{sd}^2 + i_{sq}^2).$$

Розглядаючи питання максимізації крутного моменту при рекуперативному гальмуванні, доцільніше спочатку проаналізувати процеси у машині при роботі у нижній частині діапазону керування, для якої допустимо розглядати лише обмеження величини струму  $i_{\max} = \sqrt{i_{sq}^2 + i_{sd}^2}$  при вільній зміні величини напруги в межах до номінальної. Тоді крутний момент може бути оцінений так

$$M_e = \frac{p\omega_s L_m^2 R_r}{\omega_s^2 L_r^2 + R_r^2} i_{\max}^2.$$

Виконаємо знаходження екстремуму у поданій залежності з метою визначення величини максимального моменту

$$\frac{dM_e}{d\omega_s} = 0; \quad \frac{dM_e}{d\omega_s} = pL_m^2 R_r \frac{R_r - \omega_s^2 L_r^2}{(\omega_s^2 L_r^2 + R_r^2)^2} i_{\max}^2; \quad \omega_s = \frac{R_r}{L_r}.$$

Тоді максимальна величина гальмівного моменту для роботи на низькій кутовій швидкості може бути записана так

$$M_{\max} = \frac{pL_m^2 R_r^2}{2R_r^2 L_r} i_{\max}^2.$$

Розглянемо основні залежності, що описують процеси у асинхронному двигуні, при кутовій швидкості, що є вищою за базову. Базовою кутовою швидкістю називається така максимальна швидкість, при якій можливо отримати максимальну величину крутного моменту. При аналізі роботи двигуна у такому діапазоні необхідно розглядати також обмеження за напругою, що подається на статор двигуна, і не може перевищувати номінальну  $u_{\max} = \sqrt{u_{sq}^2 + u_{sd}^2}$ .

Виразимо максимальний струм через максимальну напругу

$$i_{sd}^2 + i_{sq}^2 = \frac{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}{\left( R_s + \frac{\omega_e^2 L_m^2 s R_r}{s^2 \omega_e^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 + \left( L_s - \frac{L_m^2 s^2 \omega_e^2 L_r}{s^2 \omega_e^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 \omega_e^2}.$$

Крутний момент у такому режимі можна оцінити так

$$M_e = \frac{p\omega_s L_m^2 R_r}{\omega_s^2 L_r^2 + R_r^2} \frac{u_{\max}^2}{\left( R_s + \frac{\omega_e^2 L_m^2 s R_r}{\omega_s^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 + \left( L_s - \frac{L_m^2 s^2 \omega_e^2 L_r}{\omega_s^2 L_r^2 + R_r^2} \right)^2 \omega_e^2}.$$

Підставивши величину крутного моменту у рівняння електромагнітної потужності двигуна, отримуємо

$$p = \frac{i_{\max}^2 (R_s L_r^2 + R_r L_m^2) \omega_s^2}{2R_r^2} + \frac{i_{\max}^2 p \omega \omega_s R_r L_m^2}{2R_r^2} + \frac{i_{\max}^2 R_s R_r^2}{2R_r^2} + p_{cm}.$$

Знайдемо межу існування режиму рекуперативного гальмування, знехтувавши втратами в сталі машини  $p_{cm} = 0$

$$\frac{i_{\max}^2 (R_s L_r^2 + R_r L_m^2) \omega_s^2}{2R_r^2} + \frac{i_{\max}^2 p \omega \omega_s R_r L_m^2}{2R_r^2} + \frac{i_{\max}^2 R_s R_r^2}{2R_r^2} = 0; \quad (R_s L_r^2 + R_r L_m^2) \omega_s^2 + p \omega R_r L_m^2 \omega_s + R_s R_r^2 = 0.$$

Розв'язки даного квадратного рівняння існують за умови невід'ємності його дискримінанту

$$p^2 \omega^2 R_r^2 L_m^4 - 4(R_s L_r^2 + R_r L_m^2) R_s R_r^2 \geq 0; \quad \omega^2 \geq \frac{4(R_s L_r^2 + R_r L_m^2) R_s}{p^2 L_m^4}; \quad |\omega| \geq \frac{2\sqrt{R_s (R_s L_r^2 + R_r L_m^2)}}{p L_m^2}.$$

Отже, рекуперативне гальмування асинхронного двигуна неможливе при невиконанні даної умови. В результаті отримана величина моменту завдання, що забезпечує максимальну кількість рекуперованої електроенергії. З метою подальшого дослідження отриманих аналітичних залежностей була синтезована математична модель електромеханічної системи з частотно-керованим асинхронним двигуном у середовищі Matlab/Simulink (рис. 1). З отриманих графіків (рис. 2) шляхом інтегрування виконувалася оцінка кількості електроенергії, що може бути рекуперована до джерела живлення.

Вивчення результатів моделювання даної електромеханічної системи демонструє залежність між кількістю електричної енергії, що може бути повернута до автономного джерела живлення, та моментом навантаження на валу. При наявності на валу номінального навантаження та зниженні величини гальмівного моменту до рівня 50 % від номінального спостерігається зменшення кількості повернутої енергії на 30 %, а підвищення моменту до

150 % від номінального – збільшення на 22,8 %. Це пояснюється тим, що за таких умов зменшення гальмівного моменту призводить до зростання часу гальмування, причому увесь цей час енергія відбирається навантаженням, що призводить до зниження її обсягів, які можуть бути рекуперовані.

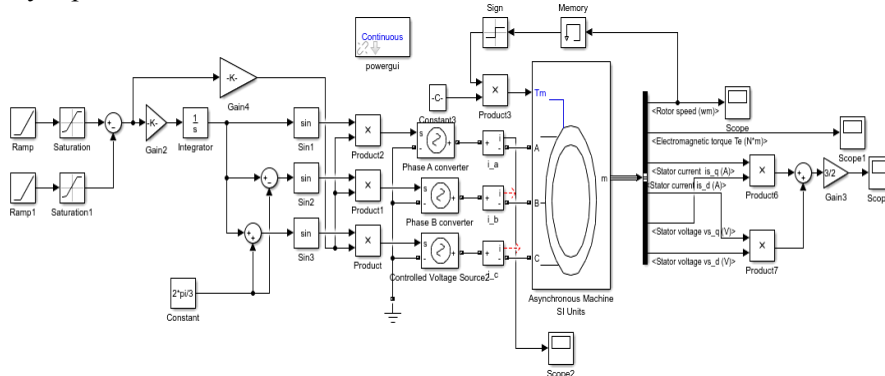


Рис. 1. Структура математичної моделі електромеханічної системи з асинхронним частотно-керуванням двигуном

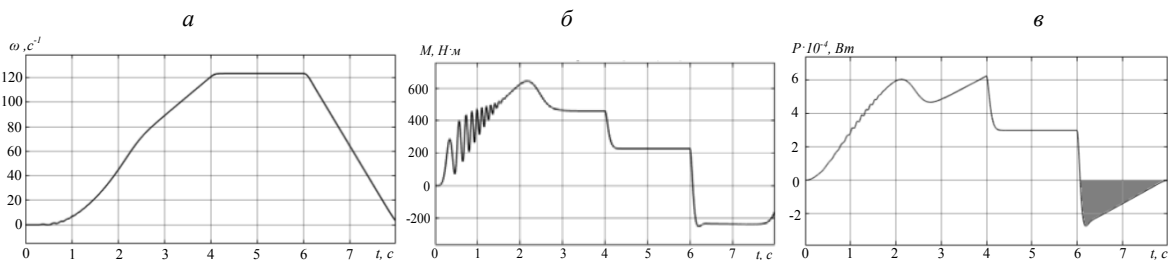


Рис. 2. Графіки процесів у тяговій електромеханічній системі при пуску та гальмуванні: *a* – залежність кутової швидкості  $\omega$  від часу; *б* – крутного моменту  $M$  від часу; *в* – споживаної енергії  $P$  при пуску та подальшому гальмуванні з рекуперацією енергії (сірим кольором зафарбована кількість електроенергії, що повертається у джерело)

За умови відсутності навантаження максимальна кількість електроенергії повертається до джерела при гальмівному моменту, що, згідно отриманих залежностей, для даного типу двигуна складає 47,08 % від номінального значення. При номінальному навантаженні на валу кількість рекуперованої електроенергії зменшується на 2 %, а при гальмуванні з максимальним гальмівним моментом за умови наявності струмообмеження – на 13,4 %, що є суттєвими втратами при русі електричного транспортного засобу у міському циклі.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Проведені дослідження режимів рекуперативного гальмування демонструють, що шляхом впливу на змінні стану асинхронного двигуна є можливість змінювати енергоефективність процесу передачі вивільненої механічної енергії з валу тягового двигуна електричного транспортного засобу до автономного джерела живлення. Отже, пошук шляхів оптимізації даного процесу є можливим, і в даній роботі представлено аналітичне вирішення даної задачі, в результаті проведення якого отримані залежності, що дозволяють визначити рекомендовану величину сигналу завдання гальмівного моменту для максимізації кількості поверненої електроенергії. Перевагою даного дослідження є те, що в силу того, що при роботі з кутовими швидкостями, які є вищими та нижчими за базову, діють різні за своєю природою обмеження змінних стану об'єкту керування, дані діапазони швидкостей аналізуються окремо. Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання представлених залежностей для розробки алгоритмів керування електричними та гібридними транспортними засобами. Розраховано граничні умови існування режиму рекуперативного гальмування, що дозволяють знайти мінімальну кутову швидкість для такого режиму.

Отже, розроблено ряд рекомендацій, що можуть бути використані проектувальниками тягових електромеханічних систем.

#### Список літератури

1. Синчук О.Н. Бездатчиковое векторное управление на основе анизотропных свойств машины [Текст] / О.Н. Синчук, Ю.Г. Осадчук, И.А. Козакевич // Электротехнические и компьютерные системы. - 2014. - № 15. - С. 45-47.
2. Murthy A.S. Regenerative braking capability of converter-controlled induction machines [Text] / A.S. Murthy, D.P. Magee, D.G. Taylor // IEEE Transportation electrification conference and expo. – 2015. – P. 1-6.

3. **Козакевич І.А.** Система бездатчикового векторного керування з використанням релейних регуляторів [Текст] / **І.А. Козакевич** // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. - 2015. - С. 80-82.
4. **Olarescu N.V.** Optimum torque control algorithm for wide speed range and four quadrant operation of stator flux oriented induction machine drive without regenerative unit [Text] / **N.-V. Olarescu, M. Weinmann, S. Zeh, S. Musuroi, C. Sorandaru** / IEEE Energy conversion congress and exposition. – 2011. – P. 1773 – 1777.
5. **Власьєвський С. В.** Повышение эффективности работы электровоза переменного тока с плавным регулированием напряжения в режимах тяги и рекуперативного торможения [Текст] / **С. В. Власьєвський, В. Г. Скорик, Е. В. Бунаєва, Д. С. Фокін** // Електрифікація транспорту. - 2011. - № 1. - С. 30-34.
6. **Висин Н. Г.** Результаты исследований по повышению надежности работы системы автоматического управления в режимах тяги и рекуперативно-реостатного торможения на электропоездах ЭР2Т [Текст] / **Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, С. А. Соколов** // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - 2007. - Вип. 17. - С. 55-58.
7. **Козакевич І.А.** Исследование адаптивного наблюдателя полного порядка для низких угловых скоростей двигателя [Текст] / **И.А. Козакевич** // Перспективи розвитку сучасної науки: Міжнародна науково-практична конференція: матеріали конференції. - Херсон: Видавничий дім "Гельветика". - 2014. - С. 65-67.
8. **Сінчук О.М.** Аналіз способів покращення динамічних властивостей асинхронних електроприводів зі скалярним керуванням [Текст] / **О.М. Сінчук, І.А. Козакевич, Д.О. Швидкий** // Якість мінеральної сировини. Збірник наукових праць. - 2014. - С. 553.
9. **Козакевич І.А.** Дослідження адаптивних систем для бездатчикового керування асинхронними двигунами при роботі на низьких частотах обертів [Текст] / **І.А. Козакевич** // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. - 2014. - С. 29-31.
10. **Осадчук Ю.Г.** Алгоритм компенсації ефекту "мертвого часу" в трьохрівневих інверторах напруги [Текст] / **Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич, І.О. Сінчук** // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2010. – Вип. 1. – С. 38-41.
11. **Козакевич І.А.** Адаптивний спосіб компенсації нелінійних властивостей інвертора напруги для бездатчикового векторного керування на низьких частотах обертів [Текст] / **І.А. Козакевич** // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 1. – С. 19-25.

Рукопис подано до редакції 15.04.17

УДК 621.311.2+621.316.1

В.А. КОЛЬСУН, В.С. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, кандидати техн. наук  
Криворізький національний університет

## РЕЖИМИ СУМІСНОЇ РОБОТИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ТА МЕРЕЖІ ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка методу автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи та включенням в продуктивну роботу початкової ділянки барабана технологічного агрегата. Подрібнення бідних залізних руд у перших стадіях відрізняється великими витратами, що в значній мірі викликано частковою або повною відсутністю інформації відносно деяких технологічних процесів, до яких можливо віднести і транспортування пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора, де недостатньо вивчений рівномірний рух пульпи.

**Методи дослідження.** Не розглядалося автоматичне керування розрідженням пульпи у кульовому млині, яке б сприяло створенню і підтриманню заданого співвідношення тверде/рідке у технологічному агрегаті при забезпеченні якісного перемішування матеріалів на початковій ділянці барабана, що значно підвищує ефективність роботи куль і не допускає перевитрати електричної енергії, куль і футеровки з одночасним підвищенням продуктивності по готовому продукту.

**Наукова новизна.** Розв'язання даної задачі складає актуальність роботи. Її метою є математичне моделювання рівномірного руху пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора з пошуком залежностей між основними параметрами та встановленням меж їх зміни при експлуатації технологічного обладнання.

**Практична значимість.** Отримані аналітичні залежності об'ємної витрати пульпи та швидкості її руху від висоти потоку. Між об'ємною витратою пульпи і висотою потоку спостерігається практично лінійна залежність. Недостатня вивченість процесів рівномірного руху пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора стримує розробку ефективних засобів контролю об'ємної витрати рідкої суміші у відкритих потоках і, як наслідок - автоматизацію технологічних процесів подрібнення вихідної руди у перших стадіях, що приводить до значних економічних збитків.

**Результати.** Початкова ділянка барабана кульового млина включається в продуктивну роботу при якісному осередненні вихідної руди, пісків односпірального класифікатора та води як за крупністю, так і вмістом води в суміші матеріалів. Оскільки при розвантаженні бункерів з вихідною рудою вона на конвеєрній стрічці розташовується циклічно з різною довжиною ділянок за крупністю, при завантаженні кульового млина також циклічно необхідно змінювати завдання на розрідження пульпи.