

8. Сінчук О.М. Research of electromagnetic processes in traction electromechanical complexes with IGBT-converters at resistor braking of electric motors / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Якимець С.Н., Лесной Н.И., Скапа Е.И // Наукові праці ДНТУ. Серія «Елетротехніка і енергетика» №11 (186) Донецьк, ДНТУ, 2011.С. 365 – 368.
9. Тарасевич Ю.Ю., Водолазская И.В. Колебания и волны / Тарасевич Ю.Ю., Водолазская И.В. Учебное пособие. – Астрахань: Астраханский государственный университет. 2004. – 79 с.
10. Крауфорд Ф. Волны. М.: Наука. – 2000. – 521 с.
11. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. – 432 с.
12. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
13. Пупков К.А. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Пупков К.А., Егупов Н.Д., Зверев В.Ю. и др.: Учебник. Под ред. Н.Д. Егупова; издание 2-ое, стереотипное. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 744 с., ил.

Рукопись поступила в редакцию 20.04.16

УДК 681.513.6

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, д-р техн. наук, проф., А.М. МАЦУЙ, канд. техн. наук, доц.  
Кіровоградський національний технічний університет

## МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПОДРІБНЕННЯМ РУДИ КУЛЬОВИМ МЛИНОМ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ДИНАМІКИ РОЗРІДЖЕННЯ ПУЛЬПИ

Метою 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. Поставлена мета досягається автоматизованим керуванням на двох ієрархічних рівнях. Перший ієрархічний рівень керування здійснюється в межах стабілізації загального розрідження пульпи в кульовому млині з заданою точністю.

Другий ієрархічний рівень керування реалізовано в межах першого використовуючи загальну витрату води у кульовий млин для досягнення заданого розрідження пульпи. Загальна витрата води розподіляється між адаптивними контурами керування витратою води на поверхню руди, що направляється в млин, в приймальній пристрій завиткового живильника та безпосередньо в технологічний агрегат. Обидва контури виконані оптимальними і реалізують релейний закон керування. Завдання на розрідження пульпи формується автоматично в кожному циклі керування, адаптованому до швидкості руху конвеєрної стрічки. Доведені всі положення і залежності, на які спирається даний метод, зокрема, критерії оптимальності, алгоритми визначення площі поверхні рухомої дробленої руди, витрати води у приймальній пристрій завиткового живильника та середньої крупності дробленого матеріалу.

Вперше запропоновані залежності для визначення крупності дробленої руди в потоці, площі поверхні рухомого дробленого матеріалу, а також спосіб автоматизованого керування подрібненням руди з оптимізацією динаміки розрідження пульпи.

Реалізація запропонованого методу керування забезпечує включення в продуктивну роботу початкової ділянки барабана млина, що дорівнює  $\frac{1}{4} \dots \frac{1}{3}$  його довжини. Це гарантує збільшення продуктивності за готовим продуктом до 7%, зменшення втрат корисного компонента без перевитрати електричної енергії, куль і футеровки.

**Ключові слова:** подрібнення руди, пульпа, оптимізація розрідження, адаптивне розподілене керування, поверхня твердого.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Основною сировиною чорної металургії України є концентрат збагачених залізних руд. Підвищена вартість вітчизняного концентрату порівняно з зарубіжною сировиною значно зменшує конкурентоспроможність як самої продукції збагачувальної галузі, так і продукції чорної металургії. Такий стан склався в основному в наслідок великих втрат електроенергії, куль і футеровки в перших стадіях подрібнення, які необхідно терміново зменшувати. Тому дана стаття спрямована на розв'язання Галузевої програми енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 р., затвердженої наказом Міністра промислової політики України №152 від 25.02.2009 року, в частині гірничо-металургійного комплексу, та держбюджетної теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (державний реєстраційний номер 0115U003942) плану науково-дослідних робіт Кіровоградського національного технічного університету.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На необхідність покращення керування даним технологічним процесом звертається увага в роботах [1-5]. Таке керування повинно спиратись на особливості цих технологічних процесів. Технологічні основи вирішення даної проблеми частково розглянуті в роботах останніх років [6, 7]. Аналіз підходів до автоматизації процесів подріб-

нення руд і систем керування за тривалий період розглянуто в працях [8-10]. Діючі системи у виробничих умовах описані і проаналізовані в колективній монографії [11]. У монографії [12] ця проблема розглянута найбільш детально. В ній викладені останні досягнення в розвитку автоматизації процесів керування подрібненням руди у перших стадіях. В той же час 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.

Постановка завдання. 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.

**Викладення матеріалу та 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. Це можливо при передачі найбільшої частки води безпосередньо вихідній руді, максимальному розрідженню пісків класифікатора та найменшій подачі води безпосередньо в кульовий млин. Оптимальне розрідження пульпи в кульовому млині, як відомо, визначається крупністю руди. 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. Авторами даної роботи розроблено підхід визначення співвідношення тверде/рідке в кульовому млині в залежності від середньої крупності вихідної руди. Прогнозувати співвідношення тверде/рідке, яке складається в кульовому млині в залежності від ситуації на його вході, можливо відповідно залежності [13]

$$K_{(T/P)P} = \frac{A_{\delta}(Q_{VP} - Q_{VBG}) + Q_{PM}}{Q_{BM} + Q_{BGM} + K_n[A_{\delta}(Q_{VP} - Q_{VBG})]}, \quad (1)$$

де  $A_{\delta} = \delta_T \delta_B / (\delta_B + K_n \delta_T)$ ;  $\delta_B, \delta_T$  - відповідно густина води і руди;  $K_n$  - відносний вміст вологи в пісках класифікатора;  $Q_{PM}, Q_{BM}, Q_{BGM}$  - відповідно масова витрата вихідної руди, води в млин і води, що подається у пісковий жолоб;  $Q_{VP}, Q_{VBG}$  - відповідно об'ємна витрата пульпи у пісковому жолобі та води у пісковий жолоб.

Знаючи прогнозоване та задане значення співвідношення тверде/рідке, можливо здійснити автоматичне керування розрідженням пульпи у кульовому млині. Аналіз показує, що автоматичне керування слід здійснювати у вигляді двох ієрархічних рівнів. Перший ієрархічний рівень охоплює загальний процес підтримання заданого співвідношення руда/вода, а другий ієрархічний рівень буде здійснюватись в межах загальної витрати води в млин, адаптувати витрату до поверхні сипкого матеріалу, розрідження пульпи у приймальному пристрої завиткового живильника та безпосередньої подачі частини цієї води у кульовий млин.

Найбільш доцільно здійснити оптимальне керування розрідженням пульпи у кульовому млині. При оптимальному керуванні закон керування обирають за максимумом чи мінімумом того або іншого показника якості. При цьому необхідно враховувати обмеження, якщо вони виникають. Закон керування може бути або лінійним, або нелінійним. Більш широкими можливостями при оптимізації за конкретним критерієм якості володіють нелінійні закони керування. При оптимальному керуванні часто використовують релейний закон. Критерій оптимальності звичайно виражають або безпосередньо у вигляді функції від параметрів закону керування, які необхідно вибирати, або як результат розв'язку рівняння динаміки процесу, який необхідно оптимізувати. У даному випадку для першого ієрархічного рівня задачу оптимального керування можливо сформулювати таким чином: необхідно знайти таке керування, яке у разі дотримання обмежень переводить об'єкт з початкового стану у кінцевий так, що при цьому функціонал набуває мінімуму. Тобто, необхідно знайти оптимальне керування.

Керування першого ієрархічного рівня ґрунтується на операції прогнозування, яка визначає майбутнє значення співвідношення тверде/рідке у кульовому млині. Для отримання адекватних прогнозів технологічного параметра насамперед необхідно узгодити вхідні сигнали в часі. Вплив відставання за витратою води в пісковий жолоб виключено стабілізацією подачі води [14]. Сигнал витрати пульпи у пісковому жолобі класифікатора відстає в наслідок ємкісного і

транспортного запізнювання в завитковому живильнику. Цей сигнал необхідно фільтрувати як найменше впродовж 10,16 с. Оскільки спіральний класифікатор занадто інерційний технологічний агрегат, то в ньому дуже повільно змінюється режим і, як наслідок, витрата піскового продукту. Тому сигнал витратоміра пульпи в пісковому жолобі класифікатора без впливу на точність визначення параметра можливо фільтрувати значний час, наприклад, впродовж 60 с. Тоді це фактично буде постійна величина, яка від циклу до циклу може незначно змінюватись. За таких умов з незначним часом запізнювання порівняно з тривалістю фільтрування з запізнюванням можливо не рахуватись. Вода в млин в даній системі повинна подаватись без лотка – безпосередньо по трубі. Тоді запізнювання в подачі води не виникає, оскільки рідина не стискується і її витрата залежить лише від положення регулювального органа. Отже, відставання і час запізнювання буде виникати лише в лінії подачі руди в млин, але його можливо використати на користь процесу керування.

Конвеєрні ваги встановлюють на певній відстані  $L_K$  від завантажувальної горловини млина. Час транспортування буде  $\tau'_K = L_K/v_{KC}$ , де  $v_{KC}$  - швидкість руху конвеєрної стрічки. Запізнювання в лотку складе  $\tau_{P1} = L_{LP}/v_P$ , воно незмінне і незначне. Враховуючи, що сигнал витрати руди фільтрується тривалий час, доцільно здійснювати циклічне керування з тривалістю циклу, який дорівнює  $\tau_{CK} = \tau'_K + \tau_{P1}$ . Наприклад,  $\tau_{P1} = 1,0$  с = const,  $L_K = 10$  м,  $v_{KC} = 1$  м/с. Тоді  $\tau_{CK} = L_K/v_{KC} + 1 = 11$  с. В процесі руху конвеєрної стрічки впродовж 11 с буде визначена середня витрата руди, яка після закінчення встановленої тривалості вимірюватись не буде і лише поступатиме у кульовий млин. За цей же час визначиться середнє значення крупності руди  $D$  і встановиться відповідне задаюче діяння. Оптимальне керування повинне здійснити перехід з одного положення регулювального органа в інше, що відповідає новому незмінному значенню завдання  $K_{(T/P)Z}$ . При цьому критерій оптимальності керування першого ієрархічного рівня можливо подати залежністю

$$J_1 = K_{K_{(T/P)Z}}(t) - K_{K_{(T/P)P}}(t) \rightarrow \min, \quad (2)$$

Тобто, після закінчення циклу фільтрування крупності руди необхідно якомога швидше встановити нове значення задаючого діяння  $K_{(T/P)Z}(t)$ , оскільки після закінчення фільтрування процес відбувається в часі. Спочатку здійснюється перехід від попереднього до нового значення  $K_{(T/P)Z}$ , яке після цього залишається незмінним. Оптимальне керування першого ієрархічного рівня здійснює такий перехід. Забезпечивши швидке переведення задавача і регулювального органа в новий стан, гарантуємо точну відповідність в циклі поданої води в млин руді, що надійшла у нього і сформувала певну ділянку заповненням твердим. Далі розглянуті цикли фільтрування і подачі руди повторюються. Якщо при подачі руди поточного циклу в млин швидкість руху конвеєрної стрічки змінилась, то відповідно змінюються умови наступного циклу. Зростання швидкості  $v_{KC}$  приведе до скорочення тривалості циклу фільтрування сигналів, оскільки  $\tau'_K = L_K/v_{KC}$ . Зменшення швидкості руху конвеєрної стрічки збільшить тривалість фільтрування сигналу руди. Таким чином, для забезпечення високої точності розрідження пульпи у кульовому млині керування першого ієрархічного рівня повинно адаптуватись до швидкості руху конвеєрної стрічки, тобто, керування необхідно виконати адаптивним. Воно повинно автоматично змінювати тривалість фільтрування у відповідності з залежністю  $\tau_{CK} = 1 + L_K/v_{KC}$ , с.

У межах витрати води у кульовий млин, яка забезпечується керуванням першого ієрархічного рівня, необхідно реалізувати адаптивні керування витратою води на поверхню руди і в приймальний пристрій завиткового живильника. При цьому керування першого ієрархічного рівня забезпечує передумови необхідної точності розрідження пульпи, а адаптивні керування другого ієрархічного рівня - перерозподіл загальної витрати води за матеріальними потоками, тобто, саму цю точність. При цьому додатково вимірюють площу поперечного перерізу потоку руди на конвеєрній стрічці, а автоматичне керування здійснюють поділом повної витрати води в млин на три нерівні частини, першу з яких подають безпосередньо на руду, що направляється у технологічний агрегат, автоматично змінюючи кількість рідини за величиною площі поверхні твердого у рудному потоці, помноженій на товщину водяної плівки, що утримується молекулярними силами зчеплення, другу - за витратою доданої води на вході приймального пристрою завиткового живильника, а третю відповідно залишку від повної витрати води в млин, зменшеної на дві відмічені складові. Даний підхід автоматичного керування захищено патентом України [15]. Він різко підвищує ефективність роботи кульового млина, збільшуючи робочу ділянку барабана на  $1/4 \dots 1/3$  його початкової довжини.

Керування другого ієрархічного рівня також доцільно виконати оптимальними. Їх загальним критерієм оптимальності буде  $J_2 = \Delta Q_{bb} \rightarrow \min$ , тобто залишок загальної витрати води у кульовий млин (керуючого впливу) повинен бути мінімальним. Критерій оптимальності буде мати вигляд

$$J_2 = \Delta Q_{bb} = Q_{bb} - Q_{VS} - Q_{BD}, \quad (3)$$

де  $Q_{VS}$  - витрата води на поверхню руди;  $Q_{BD}$  - додаткова витрата води у приймальний пристрій завиткового живильника.

Загальна витрата води у кульовий млин залежить від продуктивності і крупності руди, тобто, є змінною величиною. Змінними величинами також є витрата води на поверхню руди і в приймальний пристрій завиткового живильника. Тому  $J_2 = \Delta Q_{bb}$  змінюється в часі і за цих умов його необхідно зменшувати до найменшого значення. Реалізація даної умови потребує забезпечення можливої найбільшої витрати води на поверхню руди і в приймальний пристрій завиткового живильника, розріджуючи пісковий потік до граничного значення.

Інформаційне забезпечення автоматизованої системи керування другого ієрархічного рівня зводиться до знаходження площі  $S_T(t)$  поверхні рухомого твердого та витрати додаткової води на вході приймального пристрою завиткового живильника  $Q_{BD}$ . Для визначення площі поверхні рухомого твердого отримана залежність

$$S_T(t) = \frac{6}{\delta_T g L} \frac{F(t) \cdot v(t)}{D}, \quad (4)$$

де  $g$  - прискорення земного тяжіння;  $L$  - базова відстань конвеєрних вагів (проміжок між несучими роликками конвеєрних вагів, який звичайно дорівнює 1м);  $F(t)$  - погонне навантаження руди на конвеєрній стрічці;  $v(t)$  - швидкість руху конвеєрної стрічки;  $D$  - середня крупність руди в потоці сипкого матеріалу.

Витрату додаткової води на вході приймального пристрою завиткового живильника знаходимо відповідно виведеній залежності

$$Q_{BD} = \frac{(Q_{VP} - Q_{VBG})}{\left( \frac{\delta_B}{\delta_T} + K_n \right)} \left[ \frac{1}{K_{(T/P)g}} - K_n \right] - Q_{VBG}, \quad (5)$$

де  $K_{(T/P)g}$  - співвідношення тверде/рідке в пісковому жолобі.

В залежностях (4) і (5)  $\delta_B$ ,  $\delta_T$ ,  $g$ ,  $L$ ,  $K_n$ ,  $K_{(T/P)g}$ ,  $Q_{VBG}$  - незмінні величини. Величини  $F(t)$  і  $v(t)$  - визначаються конвеєрними вагами, а об'ємна витрата пульпи у пісковому жолобі вимірюється багатоканальним скануючим пристроєм при прогнозуванні співвідношення тверде/рідке в кульовому млині. Для здійснення адаптивного керування витратою води необхідно виміряти лише середню крупність  $D$  руди в потоці сипкого матеріалу, визначити  $S_T(t)$  за залежністю (4) і помножити це значення на товщину плівки води на поверхні твердого.

Середню крупність руди в потоці сипкого матеріалу можливо знайти відповідно запропонованому виразу

$$D = \frac{\delta_T g L}{k_P} \cdot \frac{S_P(t)}{F(t)} - \frac{b}{k_P}, \quad (6)$$

де  $k_P$  - коефіцієнт пропорціональності, що має розмір 1/м;  $b$  - вільний член, який дорівнює одиниці;  $S_P(t)$  - площа поперечного перерізу рудного потоку.

Оскільки  $k_P$  і  $b$  незмінні величини, середню крупність руди в потоці можливо знаходити, вимірюючи площу його поперечного перерізу тим же скануючим пристроєм.

Середню крупність дробленого матеріалу в різних виробничих умовах можливо також визначати, використовуючи досягнення в цьому напрямі досліджень наукової школи В.С. Моркуна, наприклад [16,17] та спільних наукових праць з О.В. Поркуян [18]. При відомому типі руди її середню крупність можливо виміряти, використовуючи експериментально отриману залежність, викладену в [19].

Розроблений підхід визначення задаючого діяння опирається на експериментально отримані на конкретному типі руди залежності і тому є достовірним. Алгоритм прогнозування співвідношення тверде/рідке у кульовому млині [13] отримано аналітичним шляхом і перевірено на практиці. Критерії оптимальності (2) і (3) логічно доводяться і не можуть мати багатоваріант-

ного тлумачення. Всі інші задачі запропонованого методу логічно доводяться і для цього використані відомі і добре перевірені наукові методи. Для забезпечення  $J_1 \rightarrow \min$  (2) необхідно обом керуванням надати максимальну швидкодію, що забезпечується використанням релейного закону. Обмеження тут можливо не накладати, оскільки витрата води змінюється в передбачених межах від  $Q_{bB\min}$  до  $Q_{bB\max}$  і їх не варто порушувати. Залежності (4), (5) і (6) отримані аналітично. Для їх реалізації використовуються вимірні засоби, які володіють високою швидкістю і достатньою точністю. Мікропроцесорні пристрої забезпечують високу точність і швидкість знаходження технологічних параметрів, а релейні закони керування – швидке переведення регулювальних органів в нове положення. Все це гарантує забезпечення необхідної якості функціонування системи автоматизованого керування подрібненням руди кульовим млином з оптимізацією динаміки розрідження пульпи. Достовірність запропонованого методу адаптивного керування подрібненням руди кульовими млинами підтверджується і видачею патенту на цей винахід [15].

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Отже, запропонований метод автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи, створює передумови як формування матеріальних потоків на вході технологічного агрегату, так і забезпечення заданого рівня технологічного параметра по всій довжині подрібнюючого агрегату, що гарантує збільшення продуктивності по готовому продукту до 7%, зменшення втрат корисного компонента без перевитрати електричної енергії, куль і футеровки.

Проведені дослідження відкривають перспективу розробки системи автоматизованого керування подрібнення руди у кульових млинах з оптимізацією динаміки розрідження пульпи.

#### Список літератури

1. **Моркун В.С.** Формирование робастного автоматизированного управления замкнутым циклом измельчения на основе  $H_\infty$ -нормы / **В.С. Моркун, Н.В. Моркун, В.В. Тронь** // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ». - 2014.- Вип. 98.- С. 83-85.
2. **Купін А.І.** Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / **Купін А.І.** – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008.- 204с.
3. **Назаренко М.В.** Прогнозуюче адаптивне керування стохастичною системою для забезпечення раціональних техніко-економічних показників на прикладі залізрудного гірничо-збагачувального комбінату / **Назаренко М.В.** – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 309 с.
4. **Азарян А.А.** Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд / **А.А. Азарян, Ю.Ю. Кривенко, В.Г. Кучер** // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць.- 2014.- Вип. 36.- С. 276-280.
5. **Тронь В.В.** Формування адаптивного керування процесом подрібнення залізрудної сировини в умовах невизначеності характеристик об'єкта / **В.В. Тронь, К.В. Масевський** // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ». - 2015.- Вип. 99.- С. 27-32.
6. **Маляров П.В.** Основы интенсификации процессов рудоподготовки / **Маляров П.В.**- Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004.- 320с.
7. **Науменко Ю.В.** Основы теории режимов работы барабанных млинов: [монографія] / **Науменко Ю.В.**- Рівне: Видавництво СПД Зелент, 2009.- 282с.
8. **Herbst J.A.** Model-based control of mineral processing operations / **J.A. Herbst, W.T. Pate, A.E. Oblad** // Powder Technology.- 1992.- Vol.69.- P. 21-32.-ISSN 0032-5910.
9. **Линч А. Дж.** Циклы дробления и измельчения / **Линч А. Дж.:** [пер. с англ.]- М.: Недра, 1981.- 342с.
10. Измельчение. Энергетика и технология / **[Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.]**.- М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2007.- 296 с.
11. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / **[Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я. и др.]**.- М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013.- 512 с.
12. **Кондратец В.О.** Автоматизация процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанными млинами / **Кондратец В.О., Сербул О.М., Мацуй А.М.;** за ред. В.О. Кондратця.- Кіровоград: КОД, 2013.- 368с.
13. **Кондратец В.О.** Ідентифікація співвідношення руда/вода на вході кульового млина / **В.О. Кондратец, О.М. Сербул** // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ.- 2006.- Вип. 17.- С. 265-272.

14. **Кондратець В.О.** Теоретичне дослідження розрідження пісків односпірального класифікатора джерелом з незмінною витратою води / **В.О. Кондратець, О.М. Сербул** // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ.- 2013.- Вип. 26.- С. 173-180.
15. Пат. 90851 Україна, МКВ 7 В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням /**Кондратець В.О.**; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. – №u201400514; заявл. 20.01.14; опубл. 10.06.14, Бюл. № 11.
16. **Morkun V.S, Morkun N.V, Pikilnyak A.V.** (2014). Ultrasonic phased array parameters determination for the gas bubble size distribution control formation in the iron ore flotation, Metallurgical and Mining Industry, No3, p.p. 28-31.
17. **Morkun V.S, Morkun N.V, Pikilnyak A.V.** (2014). The gas bubble size distribution control formation in the flotation process, Metallurgical and Mining Industry, No4, p.p. 42-45.
18. **Моркун В.С.** Контроль гранулометрического состава железорудной пульпы на базе комбинированного использования объемных ультразвуковых волн и волн Лява /**В.С. Моркун, О.В. Поркуян** // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. праць.- 2007.- Вип.17.- С.224-230.
19. **Гуленко Т.И.** Исследование стержневого датчика с пьезокерамическим преобразователем / **Т.И. Гуленко, В.А. Кондратец, В.И. Лопатин** // Контрольно-измерительная техника: респ. межвед. научн.-техн. сборник.- 1972.- Вып.12.- С.93-99.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 621.3.011.712: 621.3.014.8

А.И. САВИЦКИЙ, А.Б. СЁМОЧКИН, С.В. СЁМОЧКИНА, кандидаты техн. наук, доц.,  
Криворожский национальный университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В данной статье проводится анализ коэффициента мощности, гармонического состава тока и напряжения, а также оценка их уровней на основе стандарта IEEE 519-1992. Целью работы является определение необходимости мониторинга параметров качества электрической сети и точек замеров в промышленных условиях за счет внедрения сетевых систем дистанционного сбора информации. Указаны последствия несоответствия реальных значений требуемым стандартам. Моделирование электроэнергетической системы выполнено в программной среде Matlab. Проводились исследования энергетических показателей для 12-пульсной и 6-пульсной схем нереверсивного тиристорного привода при управлении отдельной клетью прокатного стана. Рассмотрен случай управления прокатной линией из 21 клетки, при одинаковом угле отпирания для всех тиристорных преобразователей и при согласованном управлении с помощью сдвига между углами отпирания тиристорных преобразователей для соседних клеток прокатного стана. Даны рекомендации по выбору значений углов управления, с учетом необходимости соблюдения технологических ограничений (согласование скоростей клеток). Кроме этого результаты работы будут положены в ряд мероприятий по эффективному фазовому управлению распределенными силовыми преобразователями прокатных приводов по промышленной информационной сети. Отмечена целесообразность применения методов нечеткой логики для согласованного энергоэффективного управления отдельными электроприводами.

**Ключевые слова:** тиристорный электропривод, прокатный стан, энергетические показатели, коэффициент искажения, промышленная информационная сеть

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Сети питания крупных промышленных цехов, включающих прокатные станы, в настоящее время характеризуются повышенным потреблением реактивной мощности и гармоническими составляющими напряжения и тока, образуемых силовым оборудованием с полупроводниками. Это ведет к определенным вредным последствиям в зависимости от прикладной области:

возникновение пиковых перенапряжений, перегрузок, что может вызвать отключение от сети;

увеличение действующих значений тока и напряжения ведет к увеличению потерь;

увеличение частоты в спектре тока приводит к механическим, тепловым нагрузкам и уменьшает жизненный цикл оборудования электрических систем, производит нагрев трансформаторов, кабелей, электродвигателей [1-3];

увеличиваются затраты реактивной мощности;

появляется мерцание освещения;