

УДК 621.317.7.082.743:681.586.783

## ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ, ЩО СПРИЙМАЄ КРУПНІСТЬ ПІСКІВ ОДНОСПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА

МАЦУЙ А. М.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, Кропивницький, Україна, e-mail: matsuyan@mail.ru;

КОНДРАТЕЦЬ В.О.

д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, Кропивницький, Україна, e-mail: matsuyan@mail.ru.

**Мета роботи.** Метою роботи є створення магнітоелектричної системи з постійними магнітами, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора шляхом встановлення зв'язку вихідного сигналу з вимірюваною величиною, позбавлення впливу збурень на результат та обґрунтування її параметрів.

**Методи досліджень.** Проведені дослідження виконані на підставі використання методів теорії електротехніки, магнітних систем з постійними магнітами, гальваноманітних перетворювачів, імовірностей, випадкових процесів, статистики, регресійного аналізу, чутливості, диференційного числення, магнетизму порід, визначення фізичних властивостей матричного матеріалу при включенні в нього домішок з іншими явно вираженими властивостями, класифікації продуктів збагачення.

**Отримані результати.** Математично описано процес швидкості зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі простору, через який рухається пісковий матеріал. Визначено межі величини контрольованого об'єму, при яких чутливість ще буде достатньою. Отримано теоретичні залежності швидкості зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі від крупності пісків при різних швидкостях. Встановлено, що стан контрольованого об'єму найкраще оцінювати магнітним методом. Розроблена магнітоелектрична система з постійними магнітами, яка має оптимальні значення параметрів і індукційну обмотку, що містить до 25000 витків, і в одному з полюсних наконечників якої в суцільному прорізі встановлено перетворювач Холла. Магнітна система біля повітряного зазора створює в матеріалі магнітне поле розмірами  $5 \times 20 \times 60$  мм практично однакової напруженості. Е.р.с. магнітоелектричної системи майже лінійно змінюється при зростанні крупності матеріалу. Вона залежить від вмісту магнітного заліза в твердому, що компенсується використанням сигналу перетворювача Холла. Кореляційний зв'язок між індукованою е.р.с. і крупністю пісків тісний, за характером відповідає теоретичній залежності.

**Наукова новизна.** Магнітоелектрична система для контролю середньозваженої крупності пісків односпірального класифікатора створена вперше і дозволяє розв'язати актуальну задачу автоматизації перших стадій подрібнення руди. Вперше отримана математична залежність між швидкістю зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі потоку і крупністю пісків, яка покладена в основу створення магнітоелектричної системи. Удосконалено магнітоелектричну систему виконанням конструктивних елементів, що створюють магнітне поле розмірами  $5 \times 20 \times 60$  мм, і введенням перетворювача Холла, який реагує на вміст магнітного заліза в твердому і дозволяє підвищити точність вимірювання.

**Практична цінність.** Практична цінність роботи полягає в тому, що обґрунтовано магнітоелектричну систему, яка дозволяє розробити засіб вимірювання середньозваженої крупності пісків у промислових умовах і шляхом автоматизації вплинути на зменшення собівартості залізорудного концентрату.

**Ключові слова:** магнітоелектрична система; індукційна обмотка; перетворювач Холла; піски класифікатора; середньозважена крупність.

### І. ВСТУП

Переважну більшість сировини для чорної металургії в Україні отримують збагаченням бідних залізних руд. Стандартна рудопідготовка передбачає подрібнення переважно у кульових млинах, широке застосування яких обумовлено низкою експлуатаційних та економічних переваг поряд з головним їх недоліком – високою питомою витратою енергії і низьким значенням механічного коефіцієнта корисної дії при утворенні нової поверхні, який не перевищує 1%. Внаслідок цього на процеси подрібнення припадає 50...70% загальних капітальних і експлуатаційних витрат і найбільші витрати метала. При цьому більша

частина енергії витрачається в першій стадії подрібнення, яка включає кульовий млин, що працює в замкненому циклі з односпіральним класифікатором. Саме вона порівняно з економічно розвиненими країнами суттєво впливає на більш високу собівартість продукції чорної металургії і її сировинної основи – концентрату в Україні і зниження конкурентоспроможності виробів галузі на світовому ринку.

Одним з напрямів зменшення собівартості концентрату є покращення автоматичного керування технологічними процесами, однак воно гальмується відсутністю ряду інформаційних засобів. Серед інших важливим технологічним параметром є розрідження пульпи в кульовому млині, яке залежить від крупності

її шматків, однак нині враховується лише крупність вихідної руди, що надходить в млин, а розмір піскового продукту, який складає 100...200% від вихідного, зовсім не береться до уваги при керуванні. Внаслідок неоптимального розрідження пульпи допускаються великі перевитрати електроенергії, куль, футеровки та недоотримується значна кількість готового продукту. Поряд з іншими інформаційними джерелами такого призначення засоби вимірювання крупності пісків односпіральних класифікаторів не розроблялися. Тому необхідно створити засіб вимірювання крупності пісків механічного односпірального класифікатора, який відкриває перспективу зменшення собівартості залізородного концентрату.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Автоматизація контролю крупності руди дозволяє оперативнo керувати роботою подрібнювальних і класифікуючих агрегатів. Одними з перших з'явилися автоматичні пристрої з автоматичним відбором проб пульпи і автоматизацією ручних процесів. Зокрема, відомий пристрій типу ГСА-1М [1]. Над такими пристроями продовжується робота і в теперішній час [2]-[4]. Дані підходи мають великий недолік – значне запізнювання інформації та складність. В умовах вимірювання піскового навантаження їх використати не можливо.

Практично в цей же час було запропоновано пристрій статистичного аналізу гранулометричного складу типу «Мікрон» [5]. Мікрометричний щуп у ньому знаходиться в пульпі і виконує в ній зворотнопоступальний рух, здійснюючи 120 коливань за хвилину. Якщо частка твердого зажимається між основою і щупом, пристрій фіксує її розмір. Він визначає середню крупність матеріалу. Сучасним пристроєм цього типу є гранулометр ПИК-074 [5]. Він удосконалюється і може розрахунковим шляхом виокремлювати вихід двох класів крупності твердої фази пульпи в діапазоні від 0,028 до 1 мм. Середня квадратична похибка визначення контрольованої величини не перевищує 2% при зміні співвідношення рідке/тверде більш ніж в три рази.

На середині 60-х років минулого століття розробляються пристрої, в яких автоматично вимірюються ударні вібрації пружної пластини або стержня під дією потоку сипкого матеріалу [6]. Ці пристрої не здатні вимірювати крупність пісків односпірального класифікатора.

Відомі лазерні фотометричні аналізатори розміру частин твердого в пульпі [7]-[8] також не можливо використати для вимірювання крупності пісків односпірального класифікатора. Перспективним напрямом ефективного вимірювання гранулометричного складу пульпи є використання ультразвукового методу. В ультразвуковому гранулометрі вимірюється інтенсивність затухання ультразвуку певної однієї або двох частот при проходженні через пробу, яка залежить від розміру частин твердого та їх концентрації [9]. Основним обмеженням у використанні ультразвукового

методу є його чутливість до наявності в потоці повітряних бульбашок і агрегатів у вигляді пластівців, а також до коливань густини і в'язкості середовища [10]. Пристрої даного типу також не можливо використати для вимірювання крупності пісків. Комбіновані пристрої, що поєднують ультразвукові вимірювання з контролем густини середовища також не можуть розв'язати цю задачу.

Перспективні сучасні візіометричні гранулометри [11]-[13] і ВА3М-1 [14], засоби, засновані на аналізі флуктуації сигналу тензодатчиків конвеєрних вагів [15] та підходи, засновані на використанні мінералогічних властивостей залізних руд [16], також не можливо пристосувати для вимірювання крупності пісків односпірального класифікатора.

Як показує аналіз, найбільш придатним є метод, що реалізується в магнітоіндукційному гранулометрі побудованому на базі магнітоелектричної системи з постійними магнітами [17]-[18]. Він заснований на вимірюванні флуктуацій магнітної проникності пульпи в магнітному полі перетворювача, яка залежить від крупності твердого в пульпі, яке містить феромагнітні вкрапленості, однак цей пристрій вимірював крупність пульпи у зливі спірального класифікатора, а піски відрізняються крупністю, обезводнені до 12% вмісту вологи і занадто в'язкі. Вони погано рухаються і сильно налипають, знаходяться практично у недоступних точках технологічного процесу. Концентрація частин твердого в них занадто велика. Тому за цих умов необхідно знайти зв'язок вихідного сигналу магнітоелектричної системи з середньою крупністю пісків, підхід стабілізації швидкості їх переміщення та нейтралізації впливу на вихідний сигнал змін вмісту магнітного заліза в твердому, розв'язати питання чутливості магнітної системи до відхилень часток твердого та обґрунтувати параметри магнітоелектричної системи з постійним магнітом. В зв'язку з цим тема статті є актуальною і потребує термінового розв'язання, оскільки відкриває перспективу зменшення собівартості залізородного концентрату.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є створення магнітоелектричної системи, що сприймає середньозважену крупність пісків односпірального класифікатора, шляхом встановлення зв'язку її вихідного сигналу з вимірюваною величиною, позбавленням впливу збурень на результат та обґрунтування параметрів магнітної системи з постійними магнітами та джерелами зняття інформації.

## IV. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для витратоміра феромагнітної пульпи [19], віднесеного П.П.Кремлівським до групи флуктуаційних [20], справедлива залежність

$$\sigma_{\xi} = \frac{v - v_l}{k_1 k_2} \sqrt{\frac{n}{2} (2k_2^2 + k_l^2)}, \quad (1)$$

яка описує середнє квадратичне відхилення (амплітуду) похідної випадкового процесу  $\dot{\xi}(t)$  кількості, наприклад, однакових за розміром сферичних часток твердого при переміщенні потоку через контрольований невеликий об'єм простору  $\Delta V$ . В залежності (1)  $v$  – середня швидкість потоку пульпи,  $v_1$  – середня швидкість потоку пульпи, яка визначається порогом чутливості вимірювального пристрою;  $k_1, k_2$  – незмінні коефіцієнти, що залежать від конструкції перетворювача і епюри швидкостей потоку;  $n$  – математичне сподівання кількості однакових за розміром і формою часток твердого у контрольованому об'ємі  $\Delta V$ . Коефіцієнти  $k_1$  і  $k_2$  зв'язують параметри кореляційної функції, що входять до експоненціальної і гармонічної складових, з середньою швидкістю потоку. Вони передбачають незмінність математичного сподівання  $n$  і розміру сферичних часток твердого, що характерно для гідро- і пневмотранспортування ряду сипких матеріалів і пульп в окремих технологічних точках.

Якщо  $n$  є незмінною величиною, то за амплітудою  $\sigma_{\dot{\xi}}$  похідної випадкового процесу  $\dot{\xi}(t)$  відхилення часток твердого від математичного сподівання можливо точно вимірювати середню швидкість потоку, а при незмінному поперечному перерізі потоку – об'ємну витрату пульпи. У випадку вимірювання піскового продукту механічного односпірального класифікатора епюри швидкостей не буде, оскільки обезводнений матеріал наближається до сипкого. Тоді залежність (1) прийме вигляд

$$\sigma_{\dot{\xi}} = \frac{v}{k_1 k_2} \sqrt{\frac{n}{2} (2k_2^2 + k_1^2)}. \quad (2)$$

Математичне сподівання кількості часток твердого в контрольованому об'ємі простору  $\Delta V$  можна виразити залежністю

$$n = V_T / V_{CT} = 6V_T / \pi d^3, \quad (3)$$

де  $V_T$  – об'єм твердого в контрольованому об'ємі  $\Delta V$ ;  $d$  – діаметр сферичної частки твердого. З врахуванням (3) залежність (2) прийме вигляд

$$\sigma_{\dot{\xi}} = \frac{v}{k_1 k_2} \sqrt{\frac{3V_T}{\pi d^3} (2k_2^2 + k_1^2)}. \quad (4)$$

У випадку пульпи об'єм твердого  $V_T$  в контрольованому об'ємі  $\Delta V$  може змінюватись, оскільки залежить від густини пульпи і густини руди. Якщо густина руди не змінюється, то у випадку піскового продукту, ущільненого подаючою спіраллю, об'єм твердого у контрольованому об'ємі  $\Delta V$  буде практично незмінною величиною, тобто  $\Delta V = const$ . Приймемо додатково  $v = const$ . Тоді залежність (4) можливо розглядати при певних незмінних значеннях діаметра часток твердого  $d$  і відповідно значенням  $\sigma_{\dot{\xi}}$  робити судження про кількість відхилених часток різного розміру від середнього значення. Однак сталі  $k_1$  і  $k_2$  раніше розглядалися при незмінній крупності твердо-

го. В процесі лабораторних досліджень першої похідної випадкового процесу  $\dot{\xi}(t)$  на матеріалі з середньою крупністю 1,0 і 2,0 мм встановлено, що при зростанні розміру твердого частотний спектр  $\sigma_{\dot{\xi}}$  практично не змінюється [17]. Враховуючи, що крупність твердого при цьому змінювалася в чотири рази, можливо коефіцієнти  $k_1, k_2$  в (4) вважати такими, що від розміру подрібненого матеріалу в межах однієї технологічної точки не залежать. Тоді залежність (4) дозволяє за амплітудою першої похідної випадкового процесу  $\dot{\xi}(t)$  визначити кількість відхилених часток конкретної крупності  $d$ . Однак такий параметр виміряти не можливо. Тому перейдемо до об'єму, який можливо зафіксувати в таких середовищах. Для цього помножимо ліву і праву сторони рівняння (4) на об'єм частки твердого  $V_{CT} = \pi d^3 / 6$ . В результаті у лівій частині (4) отримаємо першу похідну зміни об'єму твердого в часі, а праворуч – вираз для її визначення

$$\frac{dV_T}{dt} = \frac{v}{k_1 k_2} \sqrt{\frac{\pi d^3 V_T}{12} (2k_2^2 + k_1^2)}. \quad (5)$$

Промодельємо процес швидкості зміни об'єму твердого в часі в контрольованому об'ємі  $\Delta V$  вимірюваного середовища при  $k_1 = 0,027$  м,  $k_2 = 0,0062$  м,  $v_1 = 0,22$  м/с,  $v_2 = 0,33$  м/с,  $v_3 = 0,44$  м/с,  $V_T = 2197$  мм<sup>3</sup> при зміні розміру сферичних часток  $d = 1$  мм; 1,5 мм; 2,0 мм; 2,5 мм; 3,0 мм. Результати математичного моделювання приведені на рис.1, з якого видно, що при різних швидкостях переміщення матеріалу повз контрольований об'єм  $\Delta V$  характер зміни залежності залишається однаковим. Спостерігається незначна нелінійність залежностей, однак в конкретній технологічній точці діапазон зміни крупності подрібненої руди буде меншим і зміна  $dV_T/dt$  від  $d$  буде практично лінійною. Чутливість методу в кінці діапазону при великих крупностях матеріалу зі зменшенням швидкості переміщення відповідно склала 4435,12; 3326,34 і 2217,55 мм<sup>2</sup>/с. Тобто, вона приймає найбільші значення при найбільшій швидкості переміщення матеріалу. При достатньо невеликих швидкостях переміщення матеріалу вона також, достатня, але, враховуючи порівняно невеликі швидкості переміщення пісків, бажано вживати заходи підвищення чутливості іншими підходами, наприклад, при виборі величини контрольованого об'єму і параметрів перетворювача.

Чутливість самого процесу  $\dot{\xi}(t)$  можливо визначити відповідно формулі [21]

$$\delta = \frac{\sqrt{2n}}{n} 100\%, \quad (6)$$

де  $n$  – математичне сподівання числа часток в контрольованому об'ємі  $\Delta V$ , шириною, що наближено дорівнює діаметру матеріалу, і площею, яка відповідає контрольованому поперечному перерізу потоку. Тобто, контрольований об'єм середовища може бути розширеним за рахунок нарощування елементарних об'ємів  $\Delta V$  вздовж напрямку руху потоку, які мають незмінну

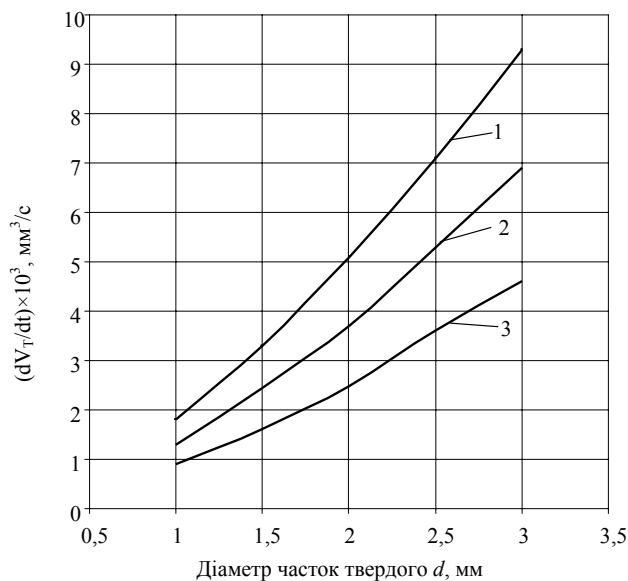
площу контрольованого перерізу в потоці і ряд складових шириною, що наближено відповідає розміру подрібненого матеріалу.

Величина  $\delta$  характеризує відносні зміни кількості часток матеріалу в елементарному об'ємі  $\Delta V$  при його переміщенні. Якщо ця величина буде занадто малою, то зміни кількості часток зафіксувати не буде можливо. З залежності (6) видно, що з ростом  $n$  чутливість процесу буде зменшуватись. Аналіз показує, що при  $n \approx 100$  максимальна чутливість  $\delta$  складає близько 14%, при  $n \approx 1000$  ця величина дорівнює 4...5%. Якщо  $n \approx 10000$ , найбільші зміни кількості шматків руди складають близько 1,5%. Тому найкращі результати можуть бути отримані при  $n \approx 100$ , стійке вимірювання можна здійснити при збільшенні  $n$  до 1000. Реальні вимірювання можливі до  $n \approx 1000$ . При подальшому збільшенні кількості часток матеріалу в елементарному об'ємі шириною близько  $d$  вимірювання можливо здійснити лише за допомогою складної і високостабільної апаратури. Враховуючи це, при розробці засобів необхідно відповідально відноситись до розмірів контрольованого об'єму в потоці і виходити з розміру твердого, характерного для даної точки технологічного процесу.

Встановлено, що для матеріалу, представленого сферичними шматками твердого однакового розміру, коефіцієнт розпушення складає 1,3514. Тоді частка твердого в певному об'ємі розпушеного таким чином матеріалу буде дорівнювати 0,74. Тобто, 26% об'єму будуть складати порожнечі. Якщо елементарний об'єм при  $d=3$  мм (у даній технологічній точці) буде мати розміри  $3 \times 20 \times 50$  мм, тобто,  $\Delta V=3000$  мм<sup>3</sup>, то об'єм твердого в ньому буде  $V_T=2220$  мм<sup>3</sup>, що відповідає  $n=157$  шт. Це забезпечить нормальну чутливість процесу  $\zeta(t)$ , однак треба мати на увазі, що при відхиленні розміру матеріалу в бік збільшення, наприклад до  $d=3,5$  мм, кількість часток в елементарному об'ємі не стане меншою 100. У даному випадку  $n=98,9 \approx 99$  шт. Такі параметри контрольованого елементарного об'єму  $\Delta V$  можливо прийняти. Вони будуть гарантувати високу чутливість вимірювання.

Реалізувати даний підхід визначення крупності піскового продукту можливо непрямым методом контролю властивостей твердого в контрольованому об'ємі  $\Delta V$ . Найбільш поширеними є методи теплопровідності, електропровідності, діелектричної та магнітної проникності. При значних швидкостях переміщення матеріалу інерційний метод теплопровідності використати не можливо. Крім того, він є достатньо енерговитратним. Аналіз показує, що електропровідність і діелектрична проникність сухих матеріалів, які входять в пульпу, змінюються в широких межах. Крім того, електропровідність і діелектрична проникність магнетиту і кварцу сильно змінюються при змочуванні їх водою, а електропровідність води, в свою чергу, значно залежить від її мінералізації і складу розчинених у ній солей [22]. Враховуючи сказане, контроль об'ємної концентрації твердого в контрольованому об'ємі практично не можливо здійснити за електро-

провідністю та діелектричною проникністю.



**Рисунок 1.** Залежність швидкості зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі середовища від діаметра часток руди при різних швидкостях:

1 –  $v = 0,44$  м/с; 2 –  $v = 0,33$  м/с; 3 –  $v = 0,22$  м/с

Значення магнітних проникностей діамагнітних і парамагнітних мінералів, що входять до складу твердої фази пульпи, і води незначно відрізняються між собою за величиною ( $\mu=0,999836...1,0064$ ) [22], їх суміш можливо умовно розглядати як однорідне середовище з постійною магнітною проникністю  $\mu_{см}$ . Оскільки магнітна проникність магнетиту значно більша магнітної проникності матриці і змінюється в нешироких межах ( $\mu_m=6,5$ ), зміна його об'ємної концентрації буде приводити до однозначної зміни магнітної проникності контрольованого об'єму.

Включення корисних компонентів в породах і частки, які отримують в подрібнювальних агрегатах, звичайно мають неправильну форму. Для гірських порід і продуктів подрібнення можливо допустити, що вони мають еліпсоїдальну форму [23] і наближено однакові розміри [24]. При хаотичній орієнтації і будь-якій концентрації таких часток твердого магнітну проникність  $\mu$  контрольованого об'єму можливо визначати за формулою, запропонованою Вейнбергом А.К., в залежності від об'єму, який займають частки магнетиту. Залежність магнітної проникності  $\mu_{см}$  від сумарного об'єму магнетитових включень, які містяться в контрольованому об'ємі, що визначається за даною формулою, близька до лінійної [23]. Реальні значення магнітної проникності нерухомого контрольованого об'єму, визначені за формулою [23], будуть дещо відрізнятися від знайдених за розрахунками, оскільки на величину магнітної проникності дещо впливає форма і розміри феромагнітних часток матеріалу [25].

При роботі це не буде здійснювати вагомого впливу зважаючи на те, що форма і розміри часток матеріалу для конкретної руди будуть практично незмінними.

В процесі руху подрібненого матеріалу через нерухомий контрольований об'єм разом зі зміною кількості часток руди в ньому буде змінюватися кількість, а як наслідок, і об'ємний вміст магнітних включень. Тобто, магнітна проникність контрольного об'єму, через який рухається потік подрібненого матеріалу, буде змінюватися в часі пропорційно відхиленням об'єму твердого. Такий контрольований об'єм можливо використати в якості магнітного опору магнітної системи з постійними магнітами як це показано на рис.2.

Постійний магніт 1 (рис.2) з допомогою полюсних наконечників 2 створює магнітний потік  $\Phi$ , який проникає через немагнітну струмопровідну прокладку 3 товщиною  $a$  у матеріал 4, що рухається зі швидкістю  $v$ . Матеріальний потік, рухаючись через нерухомий контрольований об'єм 5, в наслідок зміни магнітної проникності зосередженого в 5 твердого приводить до зміни магнітного потоку  $\Phi_M$  в магнітній системі, який можливо перетворити у величину, зручну для подальшого використання. Об'єм 5 створюється завдяки повітряному зазору 6 довжиною  $l$ .

Досвід показує, що контрольований об'єм 5 у вигляді магнітного поля в рухомому потоці матеріалу зручно створювати двома полюсними наконечниками 2, які мають товщину крайок біля повітряного проміжку 2 мм, а біля джерела магніторушійної сили – 10 мм. Від крайок, розташованих біля матеріального потоку, товщина полюсних наконечників поступово зростає до 10 мм. Оптимальним кутом нахилу полюсних наконечників є кут  $\varphi$ , що дорівнює  $45^\circ$ . Ширину полюсних наконечників  $b_H$  вибирають з міркувань створення необхідного об'єму нерухомого контрольованого простору. Необхідну ширину нерухомого контрольованого об'єму створюють зміною параметра  $l$  (рис.2). Глибина проникнення магнітного поля в матеріал (третій вимір нерухомого контрольованого об'єму) забезпечується описаною конструкцією магнітної системи.

Магнітний потік  $\Phi$ , як видно з рис.2, має дві складові. Напруженість магнітного поля в таких магнітних системах біля зазора нерівномірна. Максимальне її значення  $H_3$  спостерігається безпосередньо в зазорі. З віддаленням вздовж нормалі від крайки зазора відбувається зменшення напруженості магнітного поля, яке можливо описати рівнянням

$$H_{II} = K_1 H_3 e^{-C_1 X} + K_2 H_3 e^{-C_2 X}, \quad (7)$$

де  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – сталі коефіцієнти, які залежать від конструктивних параметрів магнітної системи;  $X$  – відстань від передньої крайки зазора до конкретної точки вздовж нормалі.

Значення напруженості магнітного поля в зазорі не можливо приймати достатньо великою, оскільки при цьому відбувається притягування і утримання магнітних часток подрібненого матеріалу біля зазора при вільному русі потоку. Це приводить до викривлення ідентифікації розглянутого випадкового процесу аж до повної відмови роботи магнітної системи.

Отримати необхідну напруженість магнітного поля в зазорі при певній конструкції магнітної системи можливо підбором необхідної кількості стандартних постійних магнітів за допомогою відомих методик або експериментально. При цьому буде досягнуто мінімуму витрачання вартісного магнітного матеріалу в магнітній системі, яким може бути сплав ЮНДК-24.

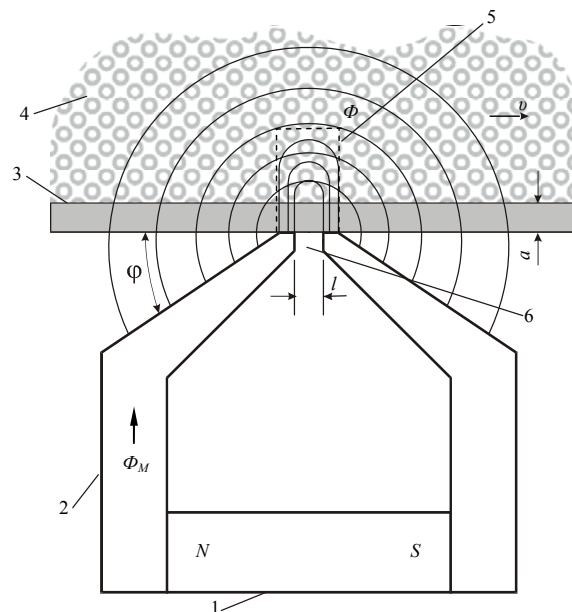


Рисунок 2. Магнітна система з постійними магнітами:

- 1 – постійний магніт; 2 – полюсний наконечник;
- 3 – немагнітна і електроізолююча прокладка;
- 4 – рухомий подрібнений матеріал з магнетитовими включеннями; 5 – нерухомий контрольований об'єм у якому змінюється магнітна проникність;
- 6 – повітряний зазор

Магнітна проникність матеріалу в нерухомому контрольованому об'ємі залежить від об'ємного вмісту в ньому феромагнітної складової – магнетиту і може бути визначеною відповідно виразу

$$\mu_{Ko} \cong k_\mu F e_M (\%) V_T, \quad (8)$$

де  $k_\mu$  – сталий коефіцієнт;  $F e_M$  – вміст магнітного заліза в твердому.

Магнітний потік в магнітопроводі, що проходить через нерухомий контрольований об'єм, дорівнює

$$\Phi_M = \int_S H_{II} \mu_{Ko} dS, \quad (9)$$

де  $S$  – поперечний переріз контрольованого об'єму.

Підставивши значення  $H_{II}$ ,  $\mu_{Ko}$  і  $dS = b_H dX$  в рівняння (9) і перетворивши його, отримаємо

$$\Phi_M = -k_\mu b_H H_3 \left( \frac{K_1}{C_1} e^{-C_1 a} + \frac{K_2}{C_2} e^{-C_2 a} \right) F e_M (\%) V_T. \quad (10)$$

Враховуючи для певної конструкції магнітної системи незмінність параметрів, формулу (10) можливо подати у вигляді

$$\Phi_M = -K_\Phi Fe_M(\%)V_T, \quad (11)$$

$$\text{де } K_\Phi = k_\mu b_H H_3 \left( \frac{K_1}{C_1} e^{-C_1 a} + \frac{K_2}{C_2} e^{-C_2 a} \right).$$

Значно вагоміший ефект порівняно з перетворювачем Холла можливо отримати, використавши індукційну обмотку, в якій при зміні магнітного потоку  $\Phi_M$  буде індукуватись електрорушійна сила (е.р.с.). При цьому перетворювач стає генератором напруги, струм якого створює власне магнітне поле, яке чинить розмагнічуючий вплив на постійний магніт. В наслідок цього в процесі експлуатації спостерігається зниження напруженості поля в зазорі, а як наслідок, і вихідного сигналу перетворювача. Це явище виключають використанням стабілізованих постійних магнітів. Постійний магніт буде достатньо стабілізованим, якщо його повністю намагнітити до введення в магнітний ланцюг.

Е.р.с., що індукується у вимірювальній обмотці, дорівнює

$$E = -w \frac{d\Phi_M}{dt}, \quad (12)$$

де  $w$  – число витків у вимірювальній обмотці;  $\Phi_M$  – частина магнітного потоку, що проходить через нерухомий контрольований об'єм.

Підставивши значення  $\Phi_M$  (11) в (12) і виконавши перетворення, отримаємо вираз для миттєвих значень е.р.с.

$$E = -w K_\Phi Fe_M(\%) \frac{dV_T}{dt}, \quad (13)$$

З врахуванням (5) миттєве значення е.р.с., що індукується в обмотці, буде дорівнювати

$$E = -w K_\Phi Fe_M(\%) \frac{v}{k_1 k_2} \sqrt{\frac{\pi d^3 V_T}{12} (2k_2^2 + k_1^2)}. \quad (14)$$

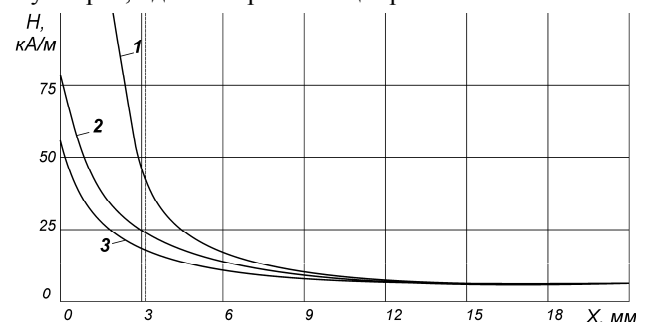
Дана залежність порівняно з (10) забезпечує багато вищу чутливість, оскільки число витків в обмотці може бути значним. Звичайно обмотку перетворювача виконують у вигляді двох секцій розмішених на прямих ділянках полюсних наконечників 2 (рис.2). Кожна секція вимірювальної обмотки може містити до  $w_1=w_2=12500$  в,  $w=25000$  в.

З залежності (14) видно, що за е.р.с.  $E$ , яка індукується в вимірювальній обмотці, можливо визначити крупність піскового продукту  $d$ , оскільки всі конструктивні і фізичні параметри перетворювача –  $w$ ,  $K_\Phi$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , технологічний параметр  $V_T$  – математичне сподівання вмісту твердого в контрольованому об'ємі є незмінними величинами, а швидкість потоку  $v$  і вміст магнетиту в твердому  $Fe(\%)$  можливо стабілізувати або врахувати. Однак у даному перетворювачі є певні особливості, які слід розглянути.

Е.р.с. (14) може залежати від довжини повітряного зазора (рис.2), який не входить до формули (14).

Цей параметр враховується, але не прямо, а через відповідний параметр нерухомого контрольованого об'єму 5 (рис.2), а саме довжину його вздовж переміщення матеріального потоку. Встановити вплив довжини повітряного зазора  $l$  на довжину параметра контрольованого об'єму, який зайнято магнітним полем можливо лише експериментально. Експериментальними дослідженнями даної магнітної системи отримані залежності, приведені на рис.3. З залежностей видно, що довжина повітряного зазора  $l$  сильно впливає на  $H$  при малих відстанях  $X$  від нього. Якщо немагнітна і електроізолююча прокладка 3 (рис.2) буде мати товщину  $a=3$  мм, то експериментальні залежності за її межами не сильно відрізняються між собою. І все ж таки найбільша рівномірність напруженості в контрольованому об'ємі буде при  $l = 5,5$  мм. Тому приймемо довжину повітряного проміжку  $l$  в магнітній системі на рівні  $l = 5$  мм. При цьому магнітне поле в нерухомому об'ємі буде рівномірним, розповсюджуючись у матеріальний потік до 20 мм. Він буде зберігати практично незмінне значення напруженості. Вздовж потоку магнітне поле розповсюджується на незначну величину, яка наближено складає 5 мм. При вибраному значенні  $l = 5$  мм на вихідний сигнал не будуть впливати можливі зміни розмірів зазора при коливаннях температури навколишнього середовища, оскільки зберігаються першопочаткові розміри і форма магнітного поля, що створює нерухомий контрольований об'єм.

Крім того, е.р.с.  $E$  лінійно зростає при збільшенні ширини полюсних наконечників  $b_H$ , що слідує з формули (11). Однак при подальшому зростанні ширини полюсних наконечників поступово буде втрачатись чутливість  $\delta$  даного процесу. При цьому е.р.с. нелінійно повинна зменшуватись, переходячи через максимум, зменшуючи і коливальність. При певній ширині полюсних наконечників  $b_H$  випадковий процес взагалі припинить своє існування. Тому найкраще вибрати ширину полюсних наконечників  $b_H$ , що входить в (14) через коефіцієнт  $K_\Phi$ , при якій спостерігається максимум е.р.с., однак теоретично це зробити не можливо.



**Рисунок 3.** Залежність напруженості магнітного поля  $H$  від віддалення вздовж нормалі до зазора від крайки полюсних наконечників при різних значеннях  $l$ :

$$1 - l = 1,5 \text{ мм}; 2 - l = 3 \text{ мм}; 3 - l = 5,5 \text{ мм}$$

Визначення оптимальної ширини полюсних наконечників магнітної системи з оптимізованими її іншими параметрами виконувалося в процесі експе-

риментальних досліджень. Для дослідження залежності вихідного сигналу перетворювача від ширини полюсних наконечників було виготовлено пристрій з лінійним повітряним зазором  $l = 5$  мм і шириною наконечників  $b_H = 100$  мм. Перетворювач монтувався знизу в прямокутному отворі в нахилений сталевий плиті, футерованій зверху резиною товщиною 3 мм. Тобто, в просторі над листом резины створюється контрольований нерухомий об'єм з визначеними розмірами і формою. Зверху на сталевій плиті встановлювався відкритий знизу канал прямокутного поперечного перерізу з можливістю переміщення його вздовж ширини полюсних наконечників і герметизації ліній зіткнення з основою для виключення протікання рідини. Канал у верхній частині з'єднувався з пульпоакумуючою ємкістю, в яку подавалися піски механічного односпірального класифікатора. Незмінний нахил сталевий плити і густини пісків забезпечували постійність швидкості руху матеріалу в механічному полі перетворювача.

Переміщенням прямокутного каналу на сталевій нахилений плиті встановлювали необхідну частину полюсних наконечників магнітної системи під матеріальний потік. Інша частка полюсних наконечників знаходилася поза каналом і не взаємодіяла з матеріальним потоком. При незмінних параметрах матеріального потоку вихідний сигнал перетворювача повинен залежати лише від ширини полюсних наконечників. Враховуючи те, що вологість пісків механічного односпірального класифікатора практично незмінна і незмінним є нахил сталевий плити з перетворювачем, швидкість потоку не контролювалася і вважалася постійною. Незмінними вважалися і крупність пісків та вміст магнітного заліза в твердому, оскільки експерименти проводились неперервно в одній робочій точці технологічного процесу. В процесі досліджень проведено 25 експериментів.

Сигнал датчика підсилювався і заносився в пам'ять комп'ютера впродовж 10 с, після чого оброблявся з визначенням середнього значення і числа позитивних викидів випадкового процесу за нульовий рівень. Залежності, отримані в експериментальних дослідженнях, приведені на рис.4. В процесі комп'ютерної обробки експериментальних даних отримані залежності

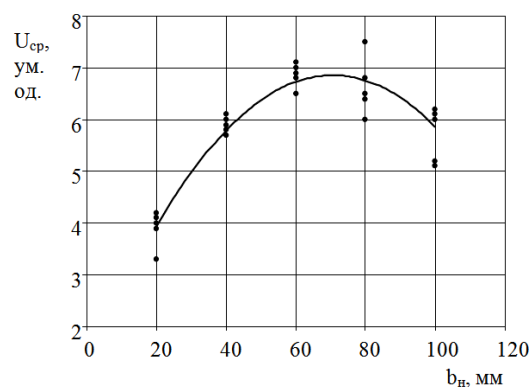
$$U_{cp} = -0.0011b_H^2 + 0.1611b_H + 1.18, \quad (15)$$

$$N = -0.075b_H + 28.5, \quad (16)$$

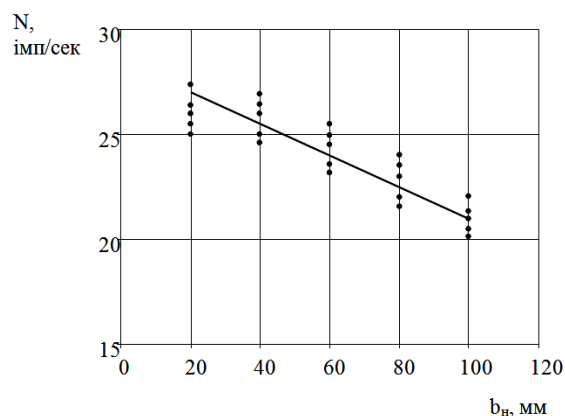
де  $U_{cp}$  – середнє значення амплітуди перетворювача, в умовних одиницях;  $N$  – частота викидів (Райсова частота) сигналу за нульовий рівень.

Отримані за рівняннями (15) і (16) графіки залежностей також нанесені на рис.4. Аналіз результатів досліджень показує, що залежність  $U_{cp} = f(b_H)$  є нелінійною і має максимум при  $b_H = 70$  мм. Частота викидів  $N$ , згідно рівнянню (16) змінюється незначно при зміні  $b_H$ . Максимальне значення амплітуди вихідного

сигналу перетворювача можливо отримати при  $b_H = 60 \dots 80$  мм. Частота викидів при цьому зменшується незначно. Прийємо менше значення ширини полюсних наконечників, тобто,  $b_H = 60$  мм.



а



б

**Рисунок 4.** Графіки залежності амплітуди  $U_{cp}$  (а) і частоти  $N$  (б) викидів вихідного сигналу перетворювача від ширини  $b_H$  полюсних наконечників

Магнітоелектрична система з оптимальними конструктивними параметрами створює в матеріальному потоці контрольований об'єм  $5 \times 20 \times 60$  мм = 6000 мм<sup>3</sup>. Якщо частки твердого представлені сферами одного розміру, то коефіцієнт розпушення матеріалу дорівнює 1,3514, що відповідає об'єму твердого  $V_T = 4439,84$  мм<sup>3</sup>. При розмірі часток пісків  $d = 2,5$  мм в контрольованому об'ємі одночасно буде знаходитись два елементарних об'єма  $\Delta V$  з 272 частками в кожному. Моделюванням, методика якого описана в [21], можливо прослідкувати характер зміни сферичних часток твердого в контрольованому об'ємі. Реально піски представлені рядом класів крупності. Тоді відхилення будуть відбуватися у кожному класі, що відповідатиме середньозваженій крупності.

Зважаючи на те, що вміст магнітного заліза в твердому може змінюватись в достатньо широких межах, його необхідно враховувати. Для цього в кінці нахиленої частини одного з полюсних наконечників (рис.2) в центральній частині виконувався повний проріз, куди встановлювався перетворювач Холла. Сигнал перетворювача Холла буде пропорційним вмі-

сту магнітного заліза. Якщо взяти певне базове значення вмісту магнітного заліза в пісках, то вимірний сигнал індукційної обмотки, який залежить від крупності твердого, необхідно змінити в залежності від відхилення поточного значення вмісту магнітного заліза від базового. Дану операцію найкраще здійснювати в цифровому вигляді.

Магнітоелектрична система з обґрунтованими оптимальними параметрами експериментально досліджувалася на пісковому матеріалі. Для цього були заготовлені піски з різними середньозваженою крупністю і вмістом магнітного заліза в межах їх зміни в технологічному процесі. Дослідження проводилося на стенді, де на горизонтальній площині встановлювалася вертикальна стінка з плексигласу товщиною 5 мм. Між нею і такою ж металевою стінкою, встановленою на відстані 100 мм, засипався пісковий матеріал з вмістом води 12%, який ущільнювався згідно умовам транспортування в односпіральному класифікаторі. Вздовж стінки на направляючих з забезпеченням притиснення рухалася нормально розташована до неї зазором магнітоелектрична система під дією привода, що розвивав незмінну поступальну швидкість переміщення 0,44 м/с. Сигнали перетворювачів заносились в пам'ять персонального комп'ютера після встановлення усталеної швидкості руху. В процесі обробки отримували середні значення підсиленних напруг індукційної обмотки і перетворювача Холла. За базове значення сигналу перетворювача Холла було прийнято мінімальне в експериментах. Всі інші – більші значення при обробці матеріалів ділилися на мінімальне. Сигнал індукційної обмотки перемножувався з величиною відношення сигналів перетворювача Холла. Таким чином отримували результуюче значення вихідної величини  $U_{cp}$  (ум.од.) магнітоелектричної системи. В експериментах середньозважена крупність пісків змінювалася в межах 1,45...2,61 мм. Вміст магнітного заліза не вимірювався, лише було відомо, що в матеріалі він змінювався на 19%. Результати експериментів нанесені на рис.5, з якого видно, що вихідний сигнал магнітоелектричної системи зростає при збільшенні середньозваженої крупності пісків. Кореляційний зв'язок достатньо тісний. Експериментальна залежність за характером відповідає теоретичній, що гарантує вимірювання крупності піскового продукту односпірального класифікатора даною магнітоелектричною системою.

Для вимірювання середньозваженої крупності пісків необхідно забезпечити незмінність їх переміщення відносно магнітоелектричної системи. В односпіральному класифікаторі такою точкою може бути робочий елемент спіралі, який при трьох її обертах за хвилину рухається з лінійною швидкістю 0,44 м/с. Для цього необхідно виготовити за формою робочого елемента спеціальну вставку, на якій розмістити магнітоелектричну систему, виконану у формі датчика крупності пісків.

Обмотка датчика крупності пісків з великою кількістю витків в умовах високої вологості потребує контролю ізоляції. Для цього існує метод врахування

експлуатаційних факторів [26], але його тут застосувати неможливо. Неможливо також реалізувати і відомий метод вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і «розрядної активності» [27]. Дану задачу можливо вирішити подачею невеликої напруги змінного струму частотою 50 Гц на додаткову обмотку 400 витками і вимірюванням частки індукованої напруги на робочій обмотці зі зміною коефіцієнта підсилення вимірюваного каналу до отримання нормативного значення сигналу при зміні опору обмотки внаслідок впливу вологи.

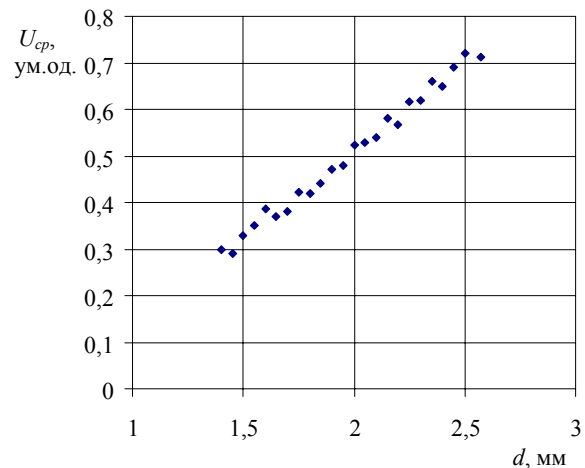


Рисунок 5 – Експериментально отримана залежність вихідного сигналу магнітоелектричної системи від середньозваженої крупності піскового матеріалу

## V. ВИСНОВКИ

У роботі вирішене актуальне завдання створення магнітоелектричної системи, здатної контролювати середньозважену крупність пісків механічного односпірального класифікатора і забезпечити цим самим неухильне зростання енергоефективності подрібнення руди в першій стадії та зменшення собівартості вітчизняного концентрату залізної руди. При цьому вперше отримана математична залежність швидкості зміни об'ємного вмісту твердого, що є випадковим процесом, у невеликому за розміром контрольованому об'ємі простору, через який рухається пісковий продукт, від середньозваженого розміру пісків в умовах незмінності об'єму твердого в контрольованому об'ємі та швидкості руху потоку. Вперше введено поняття чутливості випадкового процесу до кількості часток певного середньозваженого розміру твердого у контрольованому об'ємі, що дало можливість обмеження верхньої границі показника до 1000 штук і вибору величини контрольованого об'єму. Доведено, що швидкість зміни вмісту твердого в контрольованому об'ємі доцільно визначати за допомогою магнітоелектричної системи, яка удосконалена і містить постійний магніт, два полюсних наконечники з повітряним проміжком між ними, індукційну обмотку з числом витків до 25000 і перетворювач Холла, встановлений у наскрізній прорізі одного з полюсних наконечників. При товщині немагнітної струмонепровідної прокладки 5 мм вона створює контрольований об'єм у вигляді



магнітного поля практично незмінної напруженості розміром близько  $5 \times 20 \times 60$  мм завдяки нахилу полюсних наконечників під кутом  $45^\circ$  до потоку та виконаною їх товщиною 2 мм біля повітряного проміжку довжиною 5 мм з наступним розширенням до 10 мм біля джерела магніторушійної сили та шириною 60 мм.

Доведено, що в контрольованому об'ємі при прийнятих його розмірах зі зменшенням крупності пісків відхилення об'єму твердого від середнього значення також зменшується, створюючи похибку вимірювання, однак впродовж циклу осереднення ця похибка ліквідується і результат вимірювання відповідає осередненому вмісту твердого. При зміні вмісту магнітного заліза в пісках виникає похибка вимірювання середньозваженої крупності, яка компенсується перемноженням е.р.с. індукційної обмотки на відношення сигналів перетворювача Холла при поточному і мінімальному вмісті магнітного заліза в твердому.

В процесі експериментальних досліджень встановлено, що розроблена магнітоелектрична система здатна визначати середньозважену крупність пісків, оскільки її вихідний сигнал зростає при збільшенні вимірюваної величини, кореляційний зв'язок між параметрами достатньо тісний, а отримана експериментальна залежність за характером відповідає теоретичній.

Це дозволяє на підставі даної магнітоелектричної системи, яка для пісків створена вперше, розробити засіб вимірювання середньозваженої крупності піскового продукту у промислових умовах та шляхом автоматизації вплинути на зменшення собівартості залізрудного концентрату.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. Троп А. Е. Автоматизация обогатительных фабрик / А. Е. Троп, В. З. Козин, Е. В. Прокофьев. – М.: Недра, 1987. – 303 с.
- [2]. Evans C. L. Estimating error in measurements of mineral grain size distribution / C. L. Evans, T. J. Napier-Munn // *Minerals Engineering*. – 2013. – no. 52. – pp. 198 – 203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.005>.
- [3]. Mariano R.A. Error analysis in ore particle composition distribution measurements / R. A. Mariano, C. L. Evans // *Minerals Engineering*. – 2015. – no. 82. – pp. 36 – 44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.06.001>.
- [4]. Zuo W. Ore impact breakage characterisation using mixed particles in wide size range / W. Zuo, F. Shi // *Minerals Engineering*. – 2016. – no. 86. – pp. 96 – 103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.12.007>.
- [5]. Топчаев В. П. Новый поточный гранулометр ПИК-074П для автоматического контроля гранулометрического состава пульпы / В. П. Топчаев, А. В. Топчаев, М. В. Ланидус // *Цветные металлы*. – 2005. – №10. – С. 25 – 27.
- [6]. Марюта А. Н. Автоматизация процессов обогащения руд / Марюта А. Н., Давидкович А.С., Гуленко Т.И., Кондратец В.А. К.:Техніка, 1972. – 140 с.
- [7]. Корнилин Д.В. Определение параметров дисперсной фазы датчиком встроенного контроля гидросистем на основе КМДП-матрицы / Корнилин Д.В., Кудрявцев И.А., Логвинов Л.М., Воронов А.Ф. // *Приборы*. – 2010. – №5. – С. 35 – 41.
- [8]. Zapata-Massot C. On the use of scanning electron microscopy for the modelling of co-grinding kinetics in a tumbling ball mill / C. Zapata-Massot, Ch. Frances, N. Le Bolay // *Powder Technology*. – 2004. – no. 143 – 144. – pp. 215-229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.04.016>.
- [9]. Моркун В. С. Ультразвуковые поверхностные волны Лэмба и Лява в измерительных системах / В. С. Моркун, О. В. Поркуян. – Кривой Рог: КТУ, 2006. – 261 с.
- [10]. Конгас М. Новое поколение анализаторов размера частиц в пульпе / М. Конгас, К. Салохеймо // *Цветные металлы*. – 2010. – №2. – С. 82 – 88.
- [11]. Евстюгин С. Н. Применение системы "Гранулометр" для непрерывного бесконтактного определения гранулометрического состава кусковых материалов / С. Н. Евстюгин, А. В. Стародумов, В. Н. Круглов // *Сталь*. – 2003. – №1. – С. 36 – 38.
- [12]. Francini F. Electro-optical granulometer for measurements of flowing particles / F. Francini, D. Iorio-Fili, G. Longobardi // *Optics & Laser Technology*. – 1982. – no.14. – iss. 2. – pp. 81 – 85. doi: [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(82\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0030-3992(82)90006-8).
- [13]. Ponsa M.N. Particle morphology: from visualisation to measurement / Ponsa M.N., Viviera H., Belarouia K., Bernard-Michela B., Cordierb F., Oulhanab D., Doddsb J. A. // *Powder Technology*. – 1999. – no. 103. – iss. – 1. – pp. 44 – 57. doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00023-6).
- [14]. LabVIEW for Maschine Vision. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/land/en/nid/10419>
- [15]. Система определения крупности агломерата. <http://www.scma.com.ua/Ru/Products/soka>
- [16]. Mwanga A. Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores / Mwanga A., Parian M., Lamberg P., Rosenkranz J. // *Minerals Engineering*. – 2017. – no. 111. – pp. 182 – 197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.017>.
- [17]. Гуленко Т. И. Лабораторные исследования магнитоиндукционного гранулометра / Гуленко Т. И., Кауль Б. И., Лозовой П. Г., Кондратец В. А., Гончаров Н. В., Носов Г. П. // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 1967. – №7. – С. 157 – 163.
- [18]. Гуленко Т. И. Опытная эксплуатация магнитоиндукционного гранулометра / Т. И. Гуленко, А. Ф. Лепеха, Ю. А. Княжицкий // *Горный журнал*. – 1968. – №9. – С. 51 – 53.
- [19]. Кондратец В. А. Измерение расхода ферромагнитной пульпы / В. А. Кондратец, Т. И. Гуленко // *Измерительная техника*. – 1971. – №10. – С. 91 – 92.
- [20]. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики ко-

- личества / П. П. Кремлевский // Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1975. – 776 с.
- [21]. Кондратець В. О. Дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра в умовах осередненого потоку руди / В. О. Кондратець // Зб. наук. праць Національного гірничого університету.- Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – 2013. – №43. – С.79 – 88.
- [22]. Ржевский В. В. Основы физики горных пород / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – М.: Книжный дом "Либроком", 2010. – 360 с.
- [23]. Вейнберг А. К. Магнитная проницаемость, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и теплопроводность среды, содержащей сферические и эллипсоидальные включения / А. К. Вейнберг. [Изучение горных пород]. Доклады АН СССР. – т. 169. – №3. – 1966. – С. 543 – 546.
- [24]. Власов А. Я. Магнитная анизотропия осадочных пород / А. Я. Власов, Г. В. Коваленко. – "Известия АН СССР". Серия геофизическая. – 1964. – №12. – С. 1789 – 1800.
- [25]. Нагата Т. Магнетизм горных пород / Т. Нагата. – М.: Мир, 1965. – 348 с.
- [26]. Спица А. Г. Эксплуатационные факторы, влияющие на работу систем непрерывного контроля изоляции трансформаторного оборудования / А. Г. Спица // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – №1. – С. 41 – 47.
- [27]. Андриенко П. Д. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. Г. Спица, Л. С. Скрупская // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №1. – С. 43 – 48.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2017

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, КОТОРАЯ ВОСПРИНИМАЕТ КРУПНОСТЬ ПЕСКОВ ОДНОСПИРАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА

МАЦУЙ А. Н.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов Центральноукраинского национального технического университета, Кропивницкий, Украина, e-mail:matsuyan@mail.ru;

КОНДРАТЕЦ В.А.

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов Центральноукраинского национального технического университета, Кропивницкий, Украина, e-mail:matsuyan@mail.ru.

**Цель работы.** Целью работы является создание магнитоэлектрической системы с постоянными магнитами, которая воспринимает крупность песков односпирального классификатора путем установления связи выходного сигнала с измеряемой величиной, избавления влияния возмущений на результат и обоснования ее параметров.

**Методы исследований.** Проведенные исследования выполнены на основании использования методов теории электротехники, магнитных систем с постоянными магнитами, гальваномагнитных преобразователей, вероятностей, случайных процессов, статистики, регрессионного анализа, чувствительности, дифференциального исчисления, магнетизма пород, определения физических свойств матричного материала при включении в него примесей с другими явно выраженными свойствами, классификации продуктов обогащения.

**Полученные результаты.** Математически описан процесс скорости изменения объема твердого в контролируемом объеме пространства, через который движется песковый материал. Определены границы величины контролируемого объема, при которых чувствительность еще будет достаточной. Получены теоретические зависимости скорости изменения объема твердого в контролируемом объеме от крупности песков при различных скоростях. Установлено, что состояние контролируемого объема наилучше оценивать магнитным методом. Разработана магнитоэлектрическая система с постоянными магнитами, которая имеет оптимальные значения параметров и индукционную обмотку, содержащую до 25000 витков, и в одном из полюсных наконечников которой в сплошном прорезе установлен преобразователь Холла. Магнитная система возле воздушного зазора создает в материале магнитное поле размерами  $5 \times 20 \times 60$  мм практически одинаковой напряженности. Э.д.с. магнитоэлектрической системы практически линейно изменяется при увеличении крупности материала. Она зависит от содержания магнитного железа в твердом, что компенсируется использованием сигнала преобразователя Холла. Корреляционная связь между индуктируемой э.д.с. и крупностью песков тесная, по характеру соответствует теоретической зависимости.

**Научная новизна.** Магнитоэлектрическая система для контроля средневзвешенной крупности песков односпирального классификатора создана впервые и позволяет решить актуальную задачу автоматизации первых стадий измельчения руды. Впервые получена математическая зависимость между скоростью изменения

объема твердого в контролируемом объеме потока и крупностью песков, которая положена в основу создания магнитоэлектрической системы. Усовершенствовано магнитоэлектрическую систему исполнением конструктивных элементов, которые создают магнитное поле размерами  $5 \times 20 \times 60$  мм, и введением преобразователя Холла, который реагирует на содержание магнитного железа в твердом и позволяет повысить точность измерения.

**Практическая ценность.** Практическая ценность работы заключается в том, что обоснована магнитоэлектрическая система, которая позволяет разработать средство измерения средневзвешенной крупности песков в промышленных условиях и путем автоматизации повлиять на уменьшение себестоимости железорудного концентрата.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрическая система; индукционная обмотка; преобразователь Холла; пески классификатора; средневзвешенная крупность.

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MAGNETOELECTRIC SYSTEM, WHICH RECOGNIZES THE LARGE OF SUNS OF A SINGLE-SPIRAL CLASSIFIER

MATSUI A. N.

Ph.D, associate professor, associate professor of department of automation of production processes of the Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: matsuyan@mail.ru;

KONDRATETS V. A.

Dr.Sc., professor, professor of department of automation of production processes of the Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: kondratetsva@gmail.com.

**Purpose.** The aim of the work is to create a magnetolectric system with permanent magnets, which perceives the coarse size of the sand of a single-helix classifier, by establishing the connection of the output signal with the measured quantity, eliminating the effect of disturbances on the result and justifying its parameters.

**Methodology.** The studies carried out on the basis of the use of methods of the theory of electrical engineering, magnetic systems with permanent magnets, galvanomagnetic transducers, probabilities, random processes, statistics, regression analysis, sensitivity, differential calculus, rock magnetism, determination of the physical properties of matrix material when impurities are added to it with others explicitly expressed properties, the classification of enrichment products.

**Findings.** The process of the rate of change of the volume of solid in a controlled volume of space through which the sand material moves is described mathematically. The limits of the volume of the controlled volume at which the sensitivity is still sufficient are determined. The theoretical dependences of the rate of change of the solid volume in the controlled volume on the size of the sands at different speeds are obtained. It is established that the state of the controlled volume is best estimated by the magnetic method. A magnetolectric system with permanent magnets has been developed, which has optimal parameter values and an induction winding containing up to 25,000 turns, and in one of the pole pieces of which a Hall transducer is installed in a continuous slot. The magnetic system near the air gap creates in the material a magnetic field  $5 \times 20 \times 60$  mm in size with almost the same intensity. Ed. The magnetolectric system practically changes linearly with the increase in the size of the material. It depends on the content of magnetic iron in the solid, which is compensated by the use of the signal from the Hall converter. Correlation connection between the induced emf. and the size of the sand is close, in character corresponds to the theoretical dependence.

**Originality.** The magnetolectric system for controlling the weighted average size of the sands of a single-helix classifier was created for the first time and allows to solve the actual problem of automation of the first stages of ore crushing. For the first time, a mathematical relationship between the rate of change in the volume of solid in the controlled volume of the flow and the size of the sands, which is the basis for the creation of a magnetolectric system, is obtained. The magnetolectric system is improved by the execution of structural elements that create a magnetic field of  $5 \times 20 \times 60$  mm in size and the introduction of a Hall converter that reacts to the content of magnetic iron in a solid and allows to increase the accuracy of the measurement.

**Practical value.** The practical value of the work lies in the fact that the magnetolectric system is grounded, which makes it possible to develop a means of measuring the weighted average size of sands in industrial conditions and by automating to affect the reduction of the cost of iron ore concentrate.

**Keywords:** magnetolectric system; induction winding; Hall converter; classifier sands; weighted average particle size.

### REFERENCES

- [1]. Trop, A. E., Kozin, V. Z., Prokof'ev, E. V. (1987). Avtomatizatsiya obogatitel'nykh fabric. M. Nedra, 303.
- [2]. Evans, C. L., Napier-Munn, T. J. (2013). Estimating error in measurements of mineral grain size distribution. Minerals Engineering, 52, 198-203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.005>.
- [3]. Mariano, R.A., Evans, C. L. (2015). Error analysis in ore particle composition distribution measurements. Minerals Engineering, 82, 36-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.06.001>.

- [4]. Zuo, W., Shi, F. (2016). Ore impact breakage characterisation using mixed particles in wide size range. *Minerals Engineering*, 86, 96-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.12.007>.
- [5]. Topchaev, V. P., Topchaev, A. V., Lanidus, M. V. (2005). Novyi potochnyi granulometr PIK-074P dlya avtomaticheskogo kontrolya granulometricheskogo sostava pul'py [New flow granulometer PIK-074P for automatic control of granulometric composition of pulp]. *Tsvetnye metally*, 10, 25 – 27. (in Russian).
- [6]. Maryuta, A. N., Davidkovich, A. S., Gulenko, T. I., Kondratets, V. A. (1972) Avtomatizatsiya protsessov obogashcheniya rud. *K. Tekhnika*, 140.
- [7]. Kornilin, D.V., Kudryavtsev, I.A., Logvinov, L.M., Voronov, A.F. (2010). Opredelenie parametrov dispersnoi fazy datchikom vstroennogo kontrolya gidro-sistem na osnove KMDP-matritsy [Determination of the parameters of the dispersed phase of the sensor of integrated hydraulic system monitoring based on the CMDD matrix]. *Pribory*, 5, 35 – 41. (in Russian).
- [8]. Zapata-Massot, C., Frances, Ch., Le Bolay, N. (2004). On the use of scanning electron microscopy for the modelling of co-grinding kinetics in a tumbling ball mill. *Powder Technology*, 143-144, 215-229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.04.016>.
- [9]. Morkun, V. S., Porkuyan, O. V. (2006). Ul'trazvukovye poverkhnostnye volny Lemba i Lyava v izmeritel'nykh sistemakh. *Krivoi Rog. KTU*, 261.
- [10]. Kongas, M., Salokheimo, K. (2010). Novoe pokolenie analizatorov razmera chastits v pul'pe [A new generation of particle size analyzers in pulp]. *Tsvetnye metally*, 2, 82 – 88. (in Russian).
- [11]. Evstyugin, S. N., Starodumov, A. V., Kruglov, V. N. (2003). Primenenie sistemy "Granulometr" dlya nepreryvnogo beskontaktnogo opredeleniya granulometricheskogo sostava kuskovykh materialov [Application of the "Granulometer" system for continuous non-contact determination of the granulometric composition of lump materials]. *Stal'*, 1, 36 – 38. (in Russian).
- [12]. Francini, F., Iorio-Fili, D., Longobardi, G. (1982). Electro-optical granulometer for measurements of flowing particles. *Optics & Laser Technology*, 14, 2, 81-85. doi: [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(82\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0030-3992(82)90006-8).
- [13]. Ponsa, M.N., Viviera, H., Belarouia, K., Bernard-Michela, B., Cordierb, F., Oulhanab, D., Doddsb, J. A. (1999). Particle morphology: from visualisation to measurement. *Powder Technology*, 103, 1, 44-57. doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00023-6).
- [14]. LabVIEW for Maschine Vision. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/land/en/nid/10419>
- [15]. Sistema opredeleniya krupnosti aglomerata. <http://www.scma.com.ua/Ru/Products/soka>
- [16]. Mwangi, A., Parian, M., Lamberg, P., Rosenkranz, J. (2017). Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores. *Minerals Engineering*, 111, 182-197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.017>.
- [17]. Gulenko, T. I., Kaul', B. I., Lozovoi, P. G., Kondratets, V. A., Goncharov, N. V., Nosov, G. R. (1967) Laboratornye issledovaniya magnitoinduktsionnogo granulometra [Laboratory investigations of magnetic induction granulometer]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 7, 157 – 163. (in Russian).
- [18]. Gulenko, T. I., Lepekha, A. F., Knyazhitskii, Yu. A. (1968). Opytnaya ekspluatatsiya magnitoinduktsionnogo granulometra [Experimental operation of magnetic induction granulometer]. *Gornyi zhurnal*, 9, 51 – 53. (in Russian).
- [19]. Kondratets, V. A., Gulenko, T. I. (1971). Izmerenie raskhoda ferromagnitnoi pul'py [Measurement of the flow rate of the ferromagnetic pulp]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 10, 91 – 92. (in Russian).
- [20]. Kremlevskii, P. P. (1975). Raskhodometry i schetchiki kolichestva. *L. Mashinostroenie*, 776.
- [21]. Kondratec', V. O. (2013) Doslidzhennja vypadkovogo procesu navantazhennja opornogo rolyka konvejera v umovah osередnenogo potoku rudy [Investigation of a random load process of a conveyor support roller under conditions of averaged ore flow]. *Zb. nauk. prac' Nacional'nogo girnychogo universytetu*, 43, 79 – 88. (in Ukrainian).
- [22]. Rzhhevskij, V. V., Novik, G. Ja. (2010). Osnovy fiziki gornyh porod. *M. Librokom*, 360.
- [23]. Vejnberg, A. K. (1966). Magnitnaja pronicaemost', jelektroprovodnost', dijelektricheskaja pronicaemost' i teploprovodnost' sredy, sodержashhej sfericheskie i jellipsoidal'nye vkljuchenija [Magnetic permeability, electrical conductivity, dielectric permeability and thermal conductivity of a medium containing spherical and ellipsoidal inclusions]. *Doklady AN SSSR*, 169, 3, 543 – 546. (in Russian).
- [24]. Vlasov, A. Ja., Kovalenko, G. V. (1964). Magnitnaja anizotropija osadochnyh porod [Magnetic anisotropy of sedimentary rocks]. *Izvestija AN SSSR. Serija geofizicheskaja*, 12, 1789 – 1800. (in Russian).
- [25]. Nagata, T. (1965). Magnetizm gornyh porod. *M. Mir*, 348.
- [26]. Spica, A. (2013). Jekspluatacionnye faktory, vlijajushhie na rabotu sistem nepreryvnogo kontrolja izoljicii transformatornogo oborudovanija [Operational factors affecting the performance of continuous monitoring system of transformer equipment insulation]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 1, 41 – 47. (in Russian) doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-7>.
- [27]. Andrienko, P., Sakhno, A., Konogray, S., Spitsa, A., & Skrupskaya, L. (2014). Osobennosti monitoringa tehničeskogo sostojanija osnovnoj izoljicii visokovol'tnyh vvodov i transformatorov toka [Characteristics of monitoring condition of main insulation of high-voltage bushings and current transformers]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 1, 43 – 48. (in Russian) doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-7>.