

УДК 658.011.56

**М.О. Карчевська, ас., В.О. Кондратець, проф., канд. техн. наук**  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Обґрунтування типу і дослідження вторинного перетворювача системи ідентифікації завантаження кульового млина рудою

У статті обґрунтовано вибір магнітоіндукційного перетворювача у якості вторинного системи ідентифікації завантаження кульового млина рудою. В процесі теоретичних досліджень встановлено, що магнітоіндукційний перетворювач, який працює на принципі зміни проміжку між пружною пластиною і полюсними наконечниками біля повітряного зазора між ними, має суттєву нелінійність статичної характеристики. Це не дозволяє реалізувати даний тип перетворювача. Е.р.с. магнітоіндукційного перетворювача з паралельним переміщенням пластини відносно повітряного зазора має лінійну статичну характеристику і його доцільно реалізувати в системі ідентифікації завантаження кульового млина рудою.

**первинний, вторинний, магнітоіндукційний перетворювач, швидкість переміщення, рухомий елемент, похідна, ідентифікація**

Частка залізорудної сировини, яку отримують збагаченням бідних залізних руд, в металургійній галузі України з року в рік збільшується. Найбільш енергоємним у збагаченні бідних залізних руд є їх подрібнення в кульових млинах. Відсутність ефективних засобів ідентифікації завантаження кульових млинів рудою не дозволяє якісно керувати процесом подрібнення, що приводить до значних перевитрат електричної енергії, куль і футерівки. Це не відповідає законодавству України щодо реалізації ресурсозберігаючих технологій в промисловості та основним положенням Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі». Тому тема статті, присвяченої розробці засобу ідентифікації завантаження кульового млина рудою, є актуальною. Дана стаття висвітлює частину результатів, отриманих при виконанні науково-дослідної роботи «Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди» (державний реєстраційний номер 0109U007939).

Задачу завантаження кульових млинів рудою тривалий час розв'язують і вітчизняні, і зарубіжні вчені. Цю проблему в Україні в різні роки розв'язують В.О. Бунько, В.А. Воронов, А.С. Давидкович, Ю.Г. Качан, Є.В. Кочура, О.М. Марюта, В.С. Моркун, В.М. Назаренко, В.В. Ткачов, В.П. Хорольський, К.А. Шумилов та ін. В останній час показано, що задачу завантаження кульових млинів рудою необхідно розв'язувати в напрямку пошуку засобів автоматичного контролю параметрів, які безпосередньо характеризують енергетичну ефективність процесу руйнування матеріалу в технологічному агрегаті. Такий підхід ідентифікації кульового млина рудою запропоновано в [1], де прогин пружної пластини є мірою завантаження кульового млина рудою. Однак вимірюванням прогину пружних пластин в даних умовах ніхто не займався.

Метою даної роботи є обґрунтування типу, дослідження вторинного перетворювача та доведення його реалізованості при визначенні завантаження кульового млина рудою.

Вихідним сигналом первинного перетворювача системи ідентифікації

завантаження кульового млина рудою є переміщення центральної частини пружної пластини. Тому вторинний перетворювач повинен відноситись до пристроїв, що вимірюють переміщення. Серед таких пристроїв відомі цифрові датчики лінійних переміщень, індуктосини, індуктивні пристрої, диференціально-трансформаторні, потенціометричні, ємнісні, пневматичні, лазерні перетворювачі [2]. Аналіз показує, що у даному випадку практично зовсім не можливо застосовувати цифрові датчики лінійних переміщень, індуктосини, потенціометричні, пневматичні та лазерні перетворювачі. В той же час, враховуючи особливості роботи первинного перетворювача, можливо застосувати тензометричні, п'єзокерамічні, магнітопружні та магнітоіндукційні перетворювачі. Диференціально-трансформаторні перетворювачі передбачають контакт з рухомою пластиною та наявність джерела живлення змінного струму. Найбільш розповсюджені точні індуктивні пристрої також передбачають контакт з вимірюваною деталлю і наявність джерела живлення. Більш прості пристрої [2] контакту можуть не передбачати, особливо у даному випадку, однак мають значно гірші характеристики і потребують джерело живлення змінного струму. Магнітопружні перетворювачі передбачають контакт і джерело живлення змінного струму. Крім того, вони потребують достатньо великих питомих навантажень. Тензометричні перетворювачі також передбачають контакт з вимірюваною деталлю і наявність джерела живлення. Ємнісні перетворювачі можуть бути сконструйованими таким чином, що контакт з вимірюваною деталлю буде відсутнім. Вони в практиці в основному так і використовуються – при роботі змінюється повітряний проміжок між електродами. На великі можливості ємнісних перетворювачів вказано в роботі [3]. Одночасно в [3] та інших літературних джерелах підкреслюється, що ємнісні перетворювачі не отримали широкого розповсюдження. Велика різноманітність форм та конструкцій сприймаючих елементів не дозволили зробити узагальнюючих висновків в цілому по даному напрямку досліджень. В роботі [4], зокрема, розвинуто ряд аспектів теорії ємнісних перетворювачів, що дає можливість усунення деяких їх недоліків. Використання високостабільних джерел високочастотних коливань також дозволяє підвищити точність ємнісних перетворювачів. В той же час не ліквідовані недоліки, вказані в роботі [3], стосовно того, що поверхню пластин перетворювача практично неможливо очистити під час роботи, на нього діють температура, волога, пил, пара різних речовин та інші фактори. Вказані недоліки та особливості не дозволяють ефективно використати розглянуті перетворювачі при ідентифікації завантаження кульового млина рудою.

П'єзокерамічні перетворювачі практично допрацьовані, випускаються відповідно прийнятому стандарту (наприклад ІС – 3). Вони мають високу чутливість і не потребують джерела живлення. Необхідність кріплення їх до деталі (бажано гвинтами) не дозволяє їх використати для ідентифікації завантаження кульового млина рудою в наслідок зміни пружних властивостей пластини при виконанні в її центральній частині трьох свердловин з різзю.

Для грубих дискретних вимірювань у гірничій промисловості використовують магнітоіндукційні пристрої, пристосовані для фіксування переміщення скребків конвеєрів і коліс вагонів (рельсові педалі). Неперервні сигнали типу вібрацій фіксують більш чутливими магнітоіндукційними пристроями, але їх виконують здебільшого контактними. Варіант безконтактного магнітоіндукційного пристрою, у якому центральна частина пружної пластини слугувала б частиною магнітопроводу, був би ідеальним конструктивним рішенням вторинного перетворювача, однак він реагує не лише на величину переміщення (або концентрації), а і на його швидкість. Прикладом такого перетворювача може бути пристрій, описаний в [5]. Тому необхідно більш детально дослідити роботу магнітоіндукційного перетворювача в даних умовах.

Сигнал магнітоіндукційного перетворювача формується під дією удару, який наноситься кулею по торцю нерухомого стержня. В елементарній механіці удар

пружних тіл рахують миттєвою подією. У дійсності цей процес триває певний час. Тривалість співударіння деталей у більшості кінематичних пар складає десятитисячні і навіть стотисячні частки секунди [6]. Співударіння деталей характеризується не лише малою тривалістю, великими силами взаємодії, але і занадто великими перепадами напруг. Теорію співударіння пружних тіл розробив в кінці XVIII століття Г.Герц. Теорія Герца дозволяє визначити форму і тривалість імпульсу співударіння деталей. Відповідно цій теорії імпульс має форму напівхвилі косинусоїди [6]

$$g(t) = \frac{3,35m v_0}{\tau} \cos \frac{\pi}{\tau} t, \quad (1)$$

де  $m$ ,  $v_0$  - відповідно маса і швидкість рухомої деталі;

$\tau$  - тривалість співударіння деталей;

$t$  - поточний час.

Користуючись формулами перетворення Фур'є, можливо отримати частотний спектр такого імпульсу

$$Q(\omega) = \frac{6,7m v_0}{\pi} \times \frac{\cos \frac{\omega \tau}{2}}{1 - \left( \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\omega \tau}{2} \right)^2}, \quad (2)$$

де  $\omega$  - колова частота.

Теорія Герца розглядає удар пружних тіл без розміщення інших складових між ними, тому у даному випадку її безпосередньо використати не можливо.

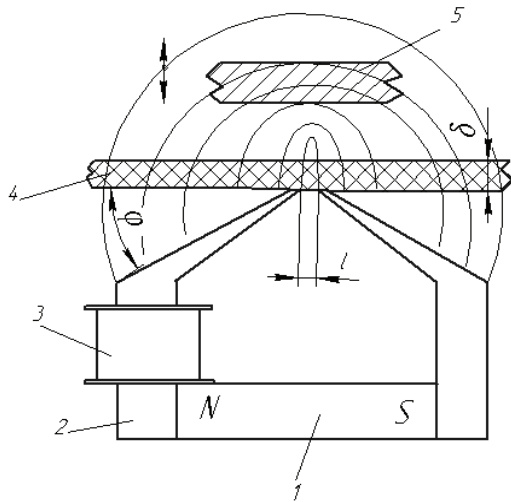
Удар пружних тіл породжує пружну хвилю. Основною формою пружної хвилі рахують аперіодичний імпульс [7]. Його головними параметрами є амплітуда, тривалість, частотний спектр.

Тривалість імпульсу визначається протяжністю співударіння деталей, яка насамперед залежить від їх маси, геометрії поверхонь, матеріалу [6]. У випадку визначення завантаження кульового млина рудою маса, геометрія поверхонь, матеріал елементів, що взаємодіють між собою, не змінюються. Це є передумовою незмінності тривалості співударіння кулі і стержня, що виконує роль первинного перетворювача. Однак на цей процес буде впливати руда, що знаходиться між елементами, які співударяються, а саме її кількість, крупність, міцність. Тому процес співударіння кулі і стержня у даному випадку буде значно ускладнюватися. В ньому можна виокремити тривалість руйнування руди і тривалість безпосередньо удару кулі по торцю стержня. Саме цей процес тут буде визначаючим. Він формує характер впливу на стержень і амплітуду переміщення центральної частини пружної пластини.

Форма імпульсу пружної хвилі визначається акустичними властивостями джерела випромінювання та середовища [7]. Джерело пружної хвилі можливо розглядати як аналог генератора східчастого діяння [7]. Таке східчасте діяння буде прикладене до торця стержня і викличе переміщення пружної пластини первинного перетворювача. При досягненні кінцевого положення за рахунок накопиченої енергії прогнута пружної пластини з врахуванням того, що на стержень сила з боку кулі вже не діє, здійсниться перехідний процес повернення механічної системи у попередній стан. Враховуючи, що прямий хід під ударом кулі через шматки твердого матеріалу може мати дещо викривлену форму, більш доцільно фіксувати зворотний хід пружної пластини зі стану деформованого зміщення у вихідне положення. При цьому східчасте діяння буде визначатися величиною деформації пластини, відповідно осередненому амплітудному значенню вхідного впливу, що міг мати дещо викривлену форму. Характер зворотного переміщення завжди буде незмінним і визначатися механічними властивостями системи та величиною деформації пружної пластини. За цих умов розглянемо взаємозв'язок між параметрами первинного перетворювача та змінними

магнітними потоками магнітоіндукційного перетворювача, які формуються під впливом удару кулі по торцю стержня. Магнітоіндукційний перетворювач (рис. 1) містить постійний магніт 1 і полюсні наконечники 2, що створюють магнітну систему. Біля повітряного проміжку довжиною  $l$  магнітний потік розсіюється і проникає через немагнітну прокладку 4 у повітряний простір. Тут він може взаємодіяти з рухомою феромагнітною пластиною 5. При переміщенні пластини 5 магнітний потік змінюється і в індукційній обмотці 3 наводиться електрорушійна сила (е.р.с).

В даній конструкції магнітоіндукційного перетворювача полюсні наконечники поступово звужуються і створюють повітряний проміжок довжиною  $l$  (рис. 1) і мають нахил під кутом  $\varphi$  до поверхні, перпендикулярної розповсюдженню силових магнітних ліній. Така форма і розміщення полюсних наконечників забезпечують отримання у повітряному просторі магнітного поля, яке має невеликі розміри відносно площини, що



- 1 – постійний магніт; 2 – полюсний наконечник;  
3 – індукційна обмотка; 4 – немагнітна прокладка;  
5 – фрагмент пружної пластини

Рисунок 1 - Схема магнітоіндукційного перетворювача

проходить через повітряний проміжок, перпендикулярно осі постійного магніту, і значну глибину проникнення в даній площині. Ширина полюсних наконечників, що відповідає розміру постійного магніту, визначає третій вимір магнітного поля біля повітряного проміжку. Магнітний потік має дві складові – звужену, про яку йшла мова, і розширену, в якій силові лінії виходять з нахиленої поверхні полюсних наконечників. Дослідження показали [8], що оптимальними параметрами магнітної системи є товщина полюсних наконечників 8...10 мм, яка поступово зменшується від каркасу обмотки до 2 мм на кінці біля повітряного проміжку. Кут  $\varphi$  нахилу полюсних наконечників повинен складати  $45^\circ$ .

На форму магнітного поля впливає довжина повітряного проміжку  $l$ , яка може змінюватися в основному в межах 1,5...5,5 мм. Довжина повітряного зазору  $l$  в основному впливає на магнітне поле на невеликій відстані біля повітряного проміжку [8].

При зміні магнітної проникності у повітряному просторі біля повітряного проміжку змінюється індукція в нейтральному перерізі постійного магніту на величину  $\Delta B_m$ . Більшій зміні індукції  $\Delta B_m$  при незмінному поперечному перерізі  $S$  постійного магніту відповідає більша зміна магнітного потоку  $\Delta \Phi$ , а як наслідок, і більша величина е.р.с на виході індукційної обмотки. Величина зміни індукції  $\Delta B_m$  залежить від нахилу прямої повернення при однакових значеннях залишкової індукції  $B_R$ . Оскільки нахил прямої повернення магнітних сплавів близький до нахилу самої кривої розмагнічування в точці  $B_R$ , в перетворювачах доцільно використовувати постійні магніти з матеріалів, що мають круту криву розмагнічування. Таким умовам відповідають магнітні сплави ЮНДК-15, ЮНДК-18, ЮНДК-24. Для забезпечення незмінності магнітного потоку в процесі експлуатації перетворювача необхідно застосовувати стабілізовані магніти, у яких процес розмагнічування відбувається по прямій повернення. Оскільки магнітний потік в самому постійному магніті змінюється незначно, для забезпечення високої чутливості індукційну обмотку необхідно розміщувати на полюсних наконечниках.

Вплив параметрів магнітного кола на значення магнітного потоку найкраще вивчати в процесі розрахунку і проектування магнітних систем з постійними

магнітами. Однак доцільно орієнтуватися на загальні рекомендації, які витікають із базових міркувань основ теорії магнітних ланцюгів з постійними магнітами. Так, до зростання магнітного потоку приводять збільшення довжини, площі поперечного перерізу постійного магніту та використання матеріалу з великою коерцитивною силою й з великою залишковою індукцією [9].

Враховуючи, що магнітний потік перетворювача має дві складові, напруженість магнітного поля також математично описується двома членами. З віддаленням точки по нормалі від кромки полюсних наконечників та повітряного проміжку відбувається зменшення напруженості поля відповідно рівнянню [10]

$$H = k_1 H_{II} e^{-c_1 x} + k_2 H_{II} e^{-c_2 x}, \quad (3)$$

де  $H_{II}$  – напруженість магнітного поля в повітряному проміжку;

$k_1, k_2, c_1, c_2$  – сталі коефіцієнти, що визначаються конструктивними параметрами перетворювача.

Біля повітряного проміжку значення першої складової у рівнянні (3) значно більші значень другої складової. Тому можна стверджувати, що при порівняно невеликих значеннях  $x$  напруженість магнітного поля описується першою складовою. В [8] розглядаються експериментально отримані криві зміни напруженості магнітного поля при різній довжині повітряного проміжку, які описуються рівнянням (3). З кривих видно, що напруженість магнітного поля тим більша, чим менша довжина повітряного проміжку. Однак при товщині немагнітної прокладки  $\delta = 3$  мм криві практично зливаються, маючи однаковий характер зміни параметра. Напруженість магнітного поля розповсюджується на глибину до 20 мм і на цих відстанях має практично незмінне значення як у повздовжньому, так і в поперечному напрямках. На малих відстанях 0...3 мм від кромки полюсних наконечників напруженість магнітного поля сильно залежить від довжини повітряного проміжку і має нелінійний характер. Довжина повітряного проміжку 1,5 мм забезпечує велике значення напруженості магнітного поля. Крім того, в межах 0...3 мм напруженість лінійно залежить від віддалення  $x$  від кромки повітряного проміжку. Виконавши роздільну немагнітну прокладку товщиною 1 мм, в межах переміщення від 1 до 3 мм будемо мати лінійну залежність напруженості магнітного поля від переміщення.

В магнітній системі перетворювача магнітний потік в сталі  $\Phi_c$  дорівнює магнітному потоку у повітряному проміжку  $\Phi_{II}$  [9]. Розглянемо магнітний потік у повітряному проміжку, маючи на увазі, що магнітна напруга в стані  $U_{mc}$  також дорівнює магнітній напрузі у повітряному проміжку  $U_{mII}$  [9].

На підставі закону Ома для магнітного ланцюга [11] можна записати  $U_m = \Phi R_m$  або  $U_m = Hl$ , де  $\Phi$  – магнітний потік;  $R_m$  – магнітний опір ділянки ланцюга;  $l$  – довжина ділянки магнітного ланцюга. Однак при цьому відповідно напруженість магнітного поля, магнітний опір і магнітна провідність ділянки ланцюга дорівнюють

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\Phi}{\mu_0 \mu_r S}; \quad (4)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}; \quad (5)$$

$$G_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu_0 \mu_r S}{l}, \quad (6)$$

де  $B$  – магнітна індукція;

$\mu_0$  – магнітна проникність вакууму;

$\mu_r$  – магнітна проникність матеріалу ланцюга;

$S$  – площа поперечного перерізу магнітопроводу.

Помножимо і поділимо праву частину (4) на довжину ділянки магнітного ланцюга  $l$ . В результаті отримаємо

$$H = \frac{\Phi}{l} \cdot \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} = \frac{\Phi}{l} \cdot R_m. \quad (7)$$

Знайдемо величину, обернену виразу (7). Вона буде дорівнювати

$$\frac{1}{H} = \frac{l}{\Phi} \cdot \frac{\mu_0 \mu_r S}{l} = \frac{l}{\Phi} \cdot G_m. \quad (8)$$

Значення магнітного потоку у повітряному проміжку з виразу (8) буде дорівнювати

$$\Phi = Hl \cdot G_m = Hl \frac{\mu_0 \mu_r S}{l}. \quad (9)$$

У магнітній системі магнітоіндукційного перетворювача через повітряний проміжок одночасно проходить чотири магнітних потоки (рис. 2). Для кожного з них необхідно застосовувати залежність (9).

Нехтуючи розсіюванням, магнітний потік в повітряному проміжку між полюсними наконечниками буде дорівнювати

$$\Phi_{II} = H_{II} l \cdot \frac{\mu_0 \mu_{II} ab}{l} = H_{II} \mu_0 \mu_{II} ab, \quad (10)$$

де  $a$  – ширина кромки полюсного наконечника;

$b$  – ширина полюсних наконечників, що відповідає розміру постійного магніту;

$\mu_{II}$  – магнітна проникність повітря.

Магнітний потік  $\Phi_{II}$  є незмінним.

Магнітний потік у немагнітній прокладці

$$\Phi_{III} = \frac{H_{II1} + H_{II2}}{2} l_1 \cdot \frac{\mu_0 \mu_{III} \delta b}{l_1} = H_{IIcp} l_1 \cdot \frac{\mu_0 \mu_{III} \delta b}{l_1} = H_{IIcp} \mu_0 \mu_{III} \delta b, \quad (11)$$

де  $H_{II1}$ ,  $H_{II2}$ ,  $H_{IIcp}$  – відповідно напруженість магнітного поля на лівому, правому кінці та посередині немагнітної прокладки;

$\mu_{III}$  – магнітна проникність матеріалу прокладки;

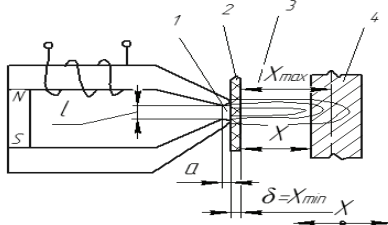
$l_1$  – розмір магнітного поля вздовж повітряного проміжку поза магнітною системою, що складає наближено 10...12 мм.

Магнітний потік в немагнітній прокладці також є величиною незмінною для конкретного перетворювача.

Значення напруженостей магнітного поля відповідно даним [8] в межах відстані 0...3 мм від кромки полюсних наконечників можна визначити за залежністю

$$H = H_{II} - k_n X, \quad (12)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт нахилу прямої, що проходить через точку  $H_{II}$  в декартовій системі координат.



1 – повітряний проміжок; 2 – немагнітна прокладка;  
3 – повітряний проміжок поза немагнітною прокладкою; 4 – ділянка сталеві пружної пластини

Рисунок 2 - Схематичне зображення структури ділянок, через які проходять магнітні потоки в повітряному проміжку

Напруженість магнітного поля у змінному повітряному проміжку можливо визначити як середнє значення показника на лівому і правому кінці повітряного зазора з відстанню  $X$ . Кінцеві значення напруженості магнітного поля відповідно будуть

$$H_{III} = H_{II} - k_n X_{min}; \quad (13)$$

$$H_{III} = H_{II} - k_n (X + X_{min}), \quad (14)$$

де  $X_{min}$  – найменше значення переміщення пружної пластини, яке чисельно дорівнює  $\delta$ ;

$X = X_{\text{вих}}$  – вихідна величина (переміщення) первинного перетворювача.

Середнє значення напруженості магнітного поля у змінному повітряному проміжку

$$H_{\text{срП}} = \frac{H_{\text{лп}} + H_{\text{пп}}}{2} = H_{\text{П}} - \frac{k_{\text{н}}}{2}(X + 2X_{\text{min}}). \quad (15)$$

Підставивши напруженість магнітного поля (15) і параметри магнітного ланцюга в (9) та виконавши перетворення, отримаємо залежність для змінного магнітного потоку у змінному магнітному проміжку

$$\Phi_{\text{ПВ}} = \mu_0 \mu_{\text{П}} b \left[ (H_{\text{П}} - k_{\text{н}} X_{\text{min}}) X - \frac{k_{\text{н}}}{2} X^2 \right]. \quad (16)$$

Як видно з (16), магнітний потік  $\Phi_{\text{ПВ}}$  залежить від переміщення центральної частини пружної пластини. В цілому дана залежність нелінійна.

Напруженість магнітного поля у пружній пластині визначимо аналогічно, знайшовши показник ліворуч і праворуч тіла з магнітнотякого матеріалу. Ці напруженості магнітного поля відповідно будуть дорівнювати

$$H_{\text{лс}} = H_{\text{П}} - k_{\text{н}}(X_{\text{min}} + X); \quad (17)$$

$$H_{\text{пс}} = H_{\text{П}} - k_{\text{н}}(X_{\text{min}} + X_{\text{max}}). \quad (18)$$

Середнє значення напруженості магнітного поля в пружній пластині буде дорівнювати

$$H_{\text{срС}} = H_{\text{П}} - \frac{k_{\text{н}}}{2}(2X_{\text{min}} + X_{\text{max}} + X). \quad (19)$$

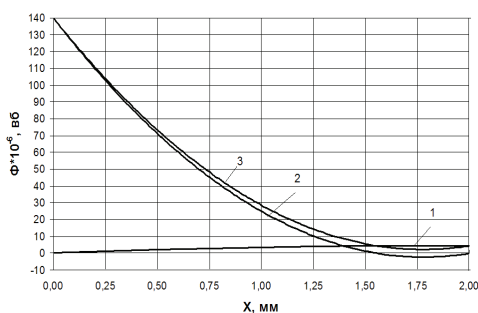
З врахуванням (19), магнітної проникності сталі  $\mu_{\text{с}}$ , ширини полюсних наконечників і товщини шару магнітнотякого матеріалу  $(X_{\text{max}} - X)$  відповідно рівнянню (19) можна після ряду перетворень отримати залежність для магнітного потоку, що проходить через пружну пластину

$$\Phi_{\text{СВ}} = \mu_0 \mu_{\text{С}} b \left\{ \left[ H_{\text{П}} - k_{\text{н}} \left( X_{\text{min}} + \frac{1}{2} X_{\text{max}} \right) \right] X_{\text{max}} - (H_{\text{П}} - k_{\text{н}} X_{\text{min}}) X + \frac{k_{\text{н}}}{2} X^2 \right\}. \quad (20)$$

З залежності (20) видно, що магнітний потік, який проходить через пружну пластину також залежить від переміщення її центральної частини. Ця залежність також нелінійна.

Результуючий магнітний потік магнітоіндукційного перетворювача дорівнює сумі чотирьох складових, тобто

$$\Phi_{\text{р}} = \Phi_{\text{П}} + \Phi_{\text{НП}} + \Phi_{\text{ПВ}} + \Phi_{\text{СВ}}. \quad (21)$$



1 -  $\Phi_{\text{ПВ}}$ ; 2 -  $\Phi_{\text{СВ}}$ ; 3 -  $\Phi_{\text{р}} = \Phi_{\text{ПВ}} + \Phi_{\text{СВ}}$

Рисунок 3 - Залежність магнітних потоків магнітоіндукційного перетворювача від переміщення центральної частини пружної пластини

Оскільки е.р.с. магнітоіндукційного перетворювача пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, то сталі складові  $\Phi_{\text{П}}$  і  $\Phi_{\text{НП}}$  можна не враховувати. Тоді результуючий магнітний потік визначиться залежністю

$$\Phi_{\text{р1}} = \Phi_{\text{ПВ}} + \Phi_{\text{СВ}}. \quad (22)$$

Розглянемо закономірність зміни окремих і результуючого магнітного потоку в магнітоіндукційному перетворювачі при переміщенні пружної пластини за наступних умов:  $X = 0 \dots 2$  мм;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu_{\text{П}} = 1,00000038$ ;  $b = 0,025$  м;  $X_{\text{min}} = 0,001$  м;  $H_{\text{П}} = 250000$  а/м;  $k_{\text{н}} = 9 \cdot 10^7$  а/м<sup>2</sup>;  $\mu_{\text{С}} = 31,847133$ ;  $X_{\text{max}} = 0,002$  м. Графіки зміни магнітних

потоків, отримані в процесі комп'ютерного моделювання з використанням рівнянь (16) і (20), наведені на рис. 3. З графіків видно, що магнітний потік у змінному повітряному проміжку незначний порівняно з магнітним потоком у пружній пластині. Обидва магнітних потоки мають екстремум. Результуючий магнітний потік також має екстремум в кінці діапазону зміни переміщення. Суттєва нелінійність зміни результуючого магнітного потоку магнітоіндукційного перетворювача не дозволяє його використати для вимірювання завантаження кульового млина рудою. Він точно може фіксувати лише невеликі (до 0,25 мм) переміщення, що у даному випадку не забезпечує необхідної чутливості вимірювання.

З врахуванням сказаного доцільно розглянути інше конструктивне рішення магнітоіндукційного перетворювача.

На певному віддаленні від кромки полюсних наконечників у площині, паралельній немагнітній прокладці, напруженість магнітного поля є незмінною в межах  $\pm 5 \dots 6$  мм відносно повітряного проміжку. Це дозволяє виконати магнітоіндукційний перетворювач з іншим переміщенням елемента з магнітнотякого матеріалу (рис. 4). При переміщенні рухомого елемента 1 відносно повітряного проміжку магнітної системи 2 частина магнітного потоку в даному перерізі проходить через магнітнотякий матеріал, а частина – через повітря. При переміщенні рухомого елемента 1 на величину  $X$  буде змінюватися магнітний опір даної ділянки магнітопроводу, а, як наслідок, – робочий магнітний потік. Він буде функцією переміщення  $X$  і швидкості переміщення рухомого елемента 1.

Розглянемо випадок виходу рухомого елемента 1 з магнітного перетворювача. Це відповідає поверненню пружної пластини у вихідний стан після удару кулі. При виході рухомого елемента з магнітного поля перетворювача буде змінюватися магнітна проникність даного перерізу. Її можливо подати через магнітні проникності окремих ділянок ланцюга та середнє значення магнітної проникності цієї ділянки [12]. При цьому, нехтуючи розсіюванням магнітного потоку, буде справедливою рівність

$$\mu_C V_C + \mu_P V_P = \mu_{CM} V_{CM} = \mu_{CM} (V_C + V_P), \quad (23)$$

де  $\mu_{CM}$  – середнє значення магнітної проникності на ділянці магнітного ланцюга;  $V_C$ ,  $V_P$ ,  $V_{CM}$  – відповідно об'єми магнітнотякого матеріалу, повітря та всього ланцюга.

Якщо рухомий елемент переміщується від осі магнітоіндукційного перетворювача на периферію, то об'єм повітряної ділянки магнітного ланцюга буде

$$V_P = V_{III} + V_{IV} = \delta_C b_C \frac{l_P}{2} + \delta_C b_C X, \quad (24)$$

де  $V_{III}$  – незмінний об'єм повітряної ділянки магнітного ланцюга;

$V_{IV}$  – змінний об'єм повітряної ділянки того ж ланцюга.

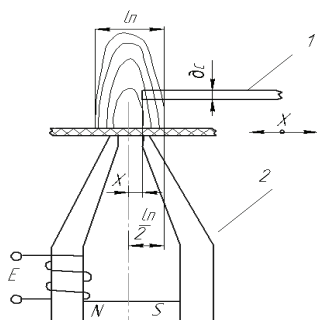
Змінний об'єм ланцюга з магнітнотякого матеріалу складе

$$V_{CV} = \left( \frac{l_P}{2} - X \right) \delta_C b_C, \quad (25)$$

де  $b_C$  – ширина рухомого елемента (полюсних наконечників).

З іншого боку, об'єм ділянки магнітного ланцюга, що розглядається, дорівнює

$$V_{CM} = \delta_C b_C l_P. \quad (26)$$



1 – рухомий елемент з магнітнотякого матеріалу, приєднаний до центральної частини пружної пластини; 2 – магнітна система перетворювача

Рисунок 4 - Схематичне зображення структури ділянок, через які проходить робочий магнітний потік в повітряному проміжку



З врахуванням  $\mu_0\mu_r = \mu_a$ , абсолютних магнітних проникностей ділянок і визначених об'ємів для магнітного ланцюга можна записати

$$\mu_{aCM}V_{CM} = \mu_{aП}V_{ПП} + \mu_{aП}V_{ПВ} + \mu_{aC}V_C. \quad (27)$$

Підставивши в (27) визначені об'єми всієї ділянки магнітного ланцюга та її частин і зробивши перетворення, визначимо

$$\mu_{aCM} = \frac{1}{2}(\mu_{aП} + \mu_{aC}) - (\mu_{aC} - \mu_{aП})\frac{X}{l_{П}}. \quad (28)$$

З (28) видно, що магнітна проникність всієї ділянки магнітного ланцюга лінійно залежить від переміщення  $X$  рухомого елемента.

Відповідно (9), (28) і параметрам визначимо змінний магнітний потік магнітоіндукційного перетворювача з окремим рухомим елементом

$$\Phi = \frac{1}{2}H_{П} \delta_C b_C (\mu_{aП} + \mu_{aC}) - H_{П} \delta_C b_C (\mu_{aC} - \mu_{aП})\frac{X}{l_{П}}, \quad (29)$$

де  $H_{П}$  – напруженість магнітного поля в ділянці магнітного ланцюга, що розглядається.

Електрорушійна сила магнітоіндукційного перетворювача з врахуванням (29) буде мати значення

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt} = H_{П} \frac{\delta_C b_C}{l_{П}} (\mu_{aC} - \mu_{aП}) \frac{dX}{dt}. \quad (30)$$

З рівняння (30) слідує, що е.р.с. магнітоіндукційного перетворювача лінійно залежить від швидкості переміщення рухомого елемента.

Отже, магнітоіндукційний перетворювач з паралельним переміщенням рухомої пластини відносно повітряного зазора може з великою точністю фіксувати похідну кривої перехідного процесу первинного перетворювача, яка є його вихідною величиною, що визначає переміщення центру пружної пластини.

Перспективою подальших досліджень є обґрунтування і розробка магнітоіндукційного перетворювача з заданими характеристиками.

## Список літератури

1. Кондратець В.О. Теоретичне дослідження системи з падаючим тілом при ідентифікації зразків твердого /В.О. Кондратець, М.О. Карчевська // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2010. – Вип. 40, част.1. – С. 142 – 150.
2. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: підручник / Кондратець В.О. – К.: Вища школа, 1993. – 319 с. – (Автоматика та автоматизація виробництва с.-г. машин: У 2 ч.; Ч. 1).
3. Воронцов Л.Н. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении / Л. Воронцов, С. Кондорф. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
4. Кондратець В.О. Розвиток теорії ємнісних датчиків як засобів автоматичного контролю технологічних процесів / В.О. Кондратець // Прогресивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научн. трудов ДонГТУ. – 2000. - № 12. – С. 116 – 120.
5. Опыт эксплуатации бесконтактного расходомера ферромагнитных пульп / Г.Р. Носов, В.А. Кондратец, А.Н. Марюта [и др.] // Горный журнал. – 1972. - № 5. – С. 56 – 57.
6. Павлов Б.В. Диагностика «болезней» машин / Павлов Б.В. – М.: Колос, 1971. – 136 с.
7. Белокур И.П. Дефектология и неразрушающий контроль / Белокур И.П. – К.: Вища школа. - 1990. – 207 с.
8. Кондратець В.О. Флуктуаційний витратомір двофазних потоків з покращеними характеристиками / В.О. Кондратець // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КДТУ. – 2001. - № 10. – С. 63 – 69.
9. Основы теории цепей / [Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.] – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
10. Автоматизация процессов обогащения руд/[Марюта А.Н., Давидкович А.С., Гуленко Т.И., Кондратец В.А.]. – К.: Техніка, 1972. – 140 с.

11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Бессонов Л.А. – М.: Высшая школа, 1964. – 750 с.
12. Вейнберг А.К. Магнитная проницаемость, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и теплопроводность среды, содержащей сферические и эллипсоидные включения / А.К. Вейнберг // ДАН СССР. – 1966. – т. 169, №3. – С. 543 – 546.

*М. Карчевская, В. Кондратец*

**Обоснование типа и исследование вторичного преобразователя системы идентификации загрузки шаровой мельницы рудой**

В статье обосновано выбор магнитоиндукционного преобразователя в качестве вторичного системы идентификации загрузки шаровой мельницы рудой. В процессе теоретических исследований установлено, что магнитоиндукционный преобразователь, который работает на принципе изменения промежутка между упругой пластиной и полюсными наконечниками возле воздушного зазора между ними, имеет существенную нелинейность статической характеристики. Это не позволяет реализовать данный тип преобразователя. Э.д.с. магнитоиндукционного преобразователя с параллельным перемещением пластины относительно воздушного зазора имеет линейную статическую характеристику и его целесообразно реализовать в системе идентификации загрузки шаровой мельницы рудой.

*M Karchevskaya, V Kondratets*

**The ground of type and research of the second transformer of the system of authentication of load of ball mill ore**

In the article the choice of magnetic inductions transformer is grounded as the second systems of authentication of load of ball mill ore. It is set in the process of theoretical researches, that a magnetic inductions transformer which works on principle of change of interval between a resilient plate and pole tips near an air-gap between them has essential non-linearity of static description. It does not allow realizing this type of transformer. E.m.f. magnetic inductions transformer with the parallel moving of plate in relation to an air-gap has linear static description and it is expedient to realize it in the system of authentication of load of ball mill ore.

Одержано 23.02.11

**УДК 631.354.2.**

**О.П. Тарасенко, проф., д-р техн. наук**

*ФГОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет им. К.Д. Глинки»*

**С.М. Герук, доц., канд. техн. наук, С.В. Пустовіт, асп.**

*Житомирського національного агроєкологічного університету*

## **Спосіб визначення циркуляції вороху у молотарці зернозбиральної машини**

Викладено методику визначення закономірності циркуляції колосового вороху в молотарці комбайна, яка проводилась на експериментальній установці. Описано спосіб забарвлення насіння для визначення циркуляційних процесів.

**циркуляція, експериментальна установка, травмування**

**Постановка проблеми.** Головною задачею агропромислового комплексу України, являється збільшення валового збору зерна, а основними шляхами її вирішення є підвищення урожайності і зменшення втрат.

© О.П. Тарасенко, С.М. Герук, С.В. Пустовіт, 2011