

УДК 658.011.56

А.М. МАЦУЙ, В.О. КОНДРАТЕЦЬ
Центральноукраїнський національний технічний університет

ОБҐРУНТУВАННЯ ВТОРИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КУЛЬОВОГО ПОДРІБНЕННЯ РУДИ ОПТИМІЗАЦІЄЮ, АНАЛІЗОМ, МОДЕЛЮВАННЯМ

Дана публікація присвячена обґрунтуванню вторинного перетворювача системи контролю енергоефективності руйнування руди безпосередньо в барабані кульового млина. Первинним перетворювачем тут є пружна пластина, а прогин її центральної частини в наслідок руйнування руди при ударах куль через передаточний елемент – вихідною величиною, яка може фіксуватися або за переміщенням, або за деформацією. Існує широке коло засобів для вимірювання таких параметрів. Тому методом оптимізації на першому етапі дослідження відкидалися засоби, які об'єктивно не придатні для реалізації цих функцій. З залишку кілька засобів було вилучено шляхом аналізу. Далі досліджувались магнітоіндукційний і тензометричний перетворювачі. Аналізом доведено, що тензометричний перетворювач може виконувати функції вимірювання сигналу. Магнітоіндукційний перетворювач досліджувався методом моделювання. Показано, що він, забезпечений перетворювачем Холла, може фіксувати такі переміщення точно і за лінійною залежністю. Магнітоіндукційний перетворювач з обмоткою може давати додаткову інформацію про швидкість переміщення пружної пластини при ударі кулі. Обидва перетворювачі потребують установки проміжного передаточного елемента. Магнітоіндукційний – для забезпечення переміщення рухомого елемента з магнітним'якого матеріалу в площині, паралельній немагнітній прокладці, а тензометричний – для забезпечення деформування невеликої балки з двома ідентичними перетворювачами для компенсації впливу температури і підвищення чутливості.

Ключові слова: подрібнення руди, енергоефективність, вторинний перетворювач, обґрунтування.

А.Н. МАЦУЙ, В.А. КОНДРАТЕЦЬ
Центральноукраинский национальный технический университет

ОБОСНОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШАРОВОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ ОПТИМИЗАЦИЕЙ, АНАЛИЗОМ, МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Данная публикация посвящена обоснованию вторичного преобразователя системы контроля энергоэффективности разрушения руды непосредственно в барабане шаровой мельницы. Первичным преобразователем здесь есть упругая пластина, а прогиб ее центральной части вследствие разрушения руды при ударах шаров через передаточный элемент - выходной величиной, которая может фиксироваться или перемещением, или деформацией. Существует широкий круг средств для измерения таких параметров. Поэтому методом оптимизации на первом этапе исследования отбрасывались средства, которые объективно не пригодны для реализации этих функций. Из остатка несколько средств было изъято путем анализа. Далее исследовались магнитоиндукционный и тензометрический преобразователи. Анализом доказано, что тензометрический преобразователь может выполнять функции измерения сигнала. Магнитоиндукционный преобразователь исследовался методом моделирования. Показано, что он, снабженный преобразователем Холла, может фиксировать такие перемещения точно и по линейной зависимости.

Магнитоиндукционный преобразователь с обмоткой может давать дополнительную информацию о скорости перемещения упругой пластины при ударе шара. Оба преобразователя требуют установки промежуточного передаточного элемента. Магнитоиндукционный – для обеспечения перемещения подвижного элемента с магнитомягкого материала в плоскости, параллельной немагнитной прокладке, а тензометрический – для обеспечения деформирования небольшой балки с двумя идентичными преобразователями для компенсации влияния температуры и повышения чувствительности.

Ключевые слова: измельчение руды, энергоэффективность, вторичный преобразователь, обоснование.

A.N. MATSUI, V.A. KONDRATETS
Central Ukrainian National Technical University

RATIONALE OF SECONDARY CONVERTER SYSTEMS OF CONTROL OF ENERGY EFFICIENCY BALL GRINDING OF ORE BY OPTIMIZATION, ANALYSIS, AND MODELING

This publication is devoted to the justification of the secondary converter of the system for monitoring the energy efficiency of ore destruction directly in the drum of a ball mill. The primary transducer here is an elastic plate, and the deflection of its central part due to the destruction of the ore at the impacts of the balls through the transfer element is the output value, which can be fixed either by displacement or deformation. The secondary converters of the system for monitoring the energy efficiency of ore destruction in a ball mill drum are subject to increased requirements, mainly for high accuracy in detecting small displacements and vibration resistance. There is a wide range of measurements of such parameters. Therefore, the method of optimization at the first stage of research discarded funds that are objectively unsuitable for the implementation of these functions. Among those that are supposed to be suitable, the method of analysis excluded from the list the means that cannot be realized as a result of specific reasons. Promising devices turned out to be new for this purpose magnetic induction and strain gauges. An analysis has shown that a strain gauge transducer can perform signal conversion functions. Magnetic induction transducer was studied by modeling. It is shown that he, equipped with a Hall transducer, can fix such movements precisely and linearly. Magnetic induction transducer with a winding can provide additional information about the speed of movement of the elastic plate when the ball strikes. It has been established that both types of transducers are suitable as secondary transducers for moving the central part of the elastic plate. Both transducers require the installation of an intermediate transfer element connected to the central part of the elastic plate. Magnetic induction - to ensure the movement of the moving element with a magnetic material in a plane parallel to the non-magnetic strip, and strain gauge - to ensure the deformation of a small beam with two identical transducers to compensate for the effect of temperature and increase sensitivity. The prospect of further research is the development of secondary converters of magnetic induction and strain gauges types.

Keywords: grinding ore, energy efficiency, secondary converter, rationale.

Постановка проблеми

Підвищена собівартість вітчизняного залізрудного концентрату ставить в нерівні умови національних виробників даного продукту і виробів з нього на світовому ринку. Тому удосконалення енерговитратних і матеріаловитратних технологічних процесів, якими є подрібнення вихідної руди, особливо в перших стадіях, є дуже

важливим. Особливо вузьким місцем є контроль енергоефективності подрібнення вихідної руди в кульових млинах, оскільки її зменшення приводить до значних перевитрат електроенергії, що негативно впливає на собівартість кінцевої продукції рудозбагачувальних фабрик – концентрату. Автоматичний контроль і підтримання оптимального значення енергоефективності руйнування залізної руди дозволять значно знизити непродуктивні перевитрати електричної енергії і зменшити собівартість залізородного концентрату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Середню потужність електродвигуна кульового млина першої стадії і його шум використовують в якості критерію автоматичної оптимізації в екстремальних системах, які підтримують робочу точку на статичній характеристиці середньої потужності або інтенсивність сигналу в функції заповнення рудою поблизу екстремуму. Керуючим впливом є потік вихідної руди в кульовий млин. В промисловості такі системи широкого застосування не знайшли, тому що максимум продуктивності за готовим класом не відповідає робочій точці в області екстремуму. В зв'язку з цим проблему автоматичної оптимізації рудопідготовки розв'язують шляхом компенсації збурюючих впливів вихідного живлення (що проблематично) або пошуком і обґрунтуванням параметрів, які піддаються автоматичному контролю і які безпосередньо характеризують енергетичну ефективність процесу руйнування матеріалу в барабані кульового млина [1]. Такий підхід безпосереднього вимірювання об'єму зруйнованої руди (енергоефективності руйнування) запропоновано авторами даної публікації [2]. Енергоефективність руйнування руди визначається деформацією пружної пластини в процесі взаємодії пружного елемента, руди і падаючої кулі [3]. Тобто, вихідним сигналом первинного перетворювача є величина деформації центральної частини пружної пластини – її переміщення в момент удару. Обґрунтуванням типу і розробкою вторинного перетворювача в таких вимірюваннях ніхто не займався.

Мета дослідження

Метою дослідження є обґрунтування типу вторинного перетворювача і його основних параметрів шляхом оптимізації, аналізу і математичного моделювання процесів у технічних засобах даного призначення.

Викладення основного матеріалу

При вимірюванні енергетичної ефективності руйнування руди безпосередньо в барабані кульового млина використовується удар кулі по сприймаючому стержню через матеріал, що на ньому знаходиться. В елементарній механіці удар пружних тіл рахують миттєвою подією. У дійсності цей процес триває певний час. Тривалість співударяння деталей у більшості кінематичних пар складає десятитисячні і навіть сотисячні частки секунди [4]. Співударяння деталей характеризується не лише малою тривалістю, великими силами взаємодії, але і занадто великими перепадами напруг. Теорію співударяння пружних тіл розробив в кінці XVIII століття Г. Герц. Вона дозволяє визначити форму і тривалість імпульсу співударяння деталей. Відповідно цій теорії імпульс має форму напівхвилі косинусоїди [4]. Користуючись формулами перетворення Фур'є, можливо отримати частотний спектр такого імпульсу. 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 [5]. Його головними параметрами є амплітуда, тривалість, частотний спектр.

Тривалість імпульсу визначається протяжністю співударяння деталей, яка насамперед залежить від їх маси, геометрії поверхонь, матеріалу [4]. У даному випадку маса, геометрія поверхонь, матеріал елементів, що взаємодіють між собою, не змінюються.

Це є передумовою незмінності тривалості співударяння кулі і стержня, що виконує роль первинного перетворювача. Однак на цей процес буде впливати руда, що знаходиться між елементами, які стикаються, а саме її кількість, крупність, міцність. Тому процес співударяння 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 визначальним. Він формує характер впливу на стержень і амплітуду переміщення центральної частини пружної пластини.

Форма імпульсу пружної хвилі визначається акустичними властивостями джерела випромінювання та середовища [5]. Джерело пружної хвилі можливо розглядати як аналог генератора східчастого діяння [5]. Таке східчасте діяння буде прикладене до торця стержня і викличе переміщення пружної пластини первинного перетворювача. При досягненні кінцевого положення за рахунок накопиченої енергії прогнута пружна 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. Залежність зруйнованого об'єму руди на торці стержня від амплітуди відхилення центральної частини пружної пластини є практично лінійною [3].

Вихідним сигналом первинного перетворювача системи контролю енергетичної ефективності руйнування руди в барабані кульового млина є переміщення центральної частини пружної пластини. Тому вторинний перетворювач повинен відноситись до пристроїв, що вимірюють малі переміщення або деформацію пружних елементів. Як показує аналіз, розроблений великий арсенал таких пристроїв. За принципом дії та призначенням їх можливо подати у вигляді рис. 1, до якого включені відомі засоби. Магнітоіндукційний перетворювач традиційно використовується для інших призначень, однак аналіз показав, що його можливо застосувати для вимірювання невеликих переміщень.



Рис. 1. Класифікація вторинних перетворювачів переміщення центральної частини пружної пластини за принципом дії і призначенням.

З такого широкого переліку пристроїв суворий відбір найбільш ефективного можливо здійснити за допомогою оптимізаційного підходу. Спочатку доцільно з рис. 1 вилучити пристрої, які точно не можуть бути реалізованими в даних вимірюваннях. Для цього слід обґрунтувати критерій оптимальності для здійснення процедури вилучення певних пристроїв. Відомо, що критерій оптимальності складають за фізичним змістом задачі. Вимірювання виконуються на обертовому об'єкті – барабані кульового млина. Тому, як показав аналіз, в якості джерела електричної енергії для живлення системи найбільш доцільно використовувати акумулятор, який періодично замінюють на заряджений. Тут складно використовувати змінний струм, практично не можливо тримати джерела стиснутого повітря та використовувати ненадійні та достатньо складні технічні засоби. Також недопустимо використовувати пристрої з великими габаритами. За принципом дії первинного перетворювача вторинні перетворювачі повинні сприймати малі переміщення, порівняно малі, але не занадто малі зусилля. На вимірюваному об'єкті має місце вплив сильних збурюючих факторів, особливо вібрацій і температури, яка може змінюватися в основному від +5°C до +50°C. Критерієм оптимальності тут може бути вираз

$$J_B = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 + J_6 + J_7 = \sum_{i=1}^7 J_i, \quad (1)$$

де частковим критерієм J_i присвоюється одиниця у випадку присутності в пристрої певної особливості. Тут J_1 – низька надійність; J_2 – необхідність у використанні змінного струму живлення або стисненого повітря; J_3 – складність; J_4 – сильний вплив збурюючих факторів; J_5 – великі габарити; J_6 – вимірювання великих переміщень; J_7 – відхилення робочих зусиль від помірною середнього значення.

Для розв'язання даної задачі оптимізації можливо застосувати метод динамічного програмування [6]. Він є ефективним засобом розв'язання задач оптимізації дискретних багатостадійних процесів, для яких загальний критерій оптимальності описується адитивною функцією критеріїв оптимальності окремих стадій [7]. Тут виокремлюємо сім стадій оптимізації розуміючи під стадією наявність у кожному вимірювальному пристрої однієї з наведених у (1) ознак. Задачу оптимізації даних багатостадійних процесів у кожному пристрої можливо сформулювати як задачу пошуку оптимальної стратегії, для якої критерій оптимальності J_B приймає максимальне значення.

Метод динамічного програмування фактично являє собою алгоритм визначення оптимальної стратегії керування на усіх стадіях процесу [8]. Закон керування на кожній стадії звичайно знаходять шляхом розв'язання частинних задач оптимізації послідовно для усіх стадій процесу за допомогою інших методів дослідження. У даному випадку здійснюється аналіз літературних джерел, де вказується про наявність в конкретному вимірювальному засобі тих чи інших ознак. У даному випадку, як і в їх більшості, кінцевий розв'язок отримують в чисельній формі. Результати розв'язку звичайно зводять в таблиці. Результати виконаного аналізу вторинних пристроїв приведені в табл.1. З даних табл.1 слідує, що низьку надійність мають потенціометричні перетворювачі як контактні та піддані дії вологи, агресивної атмосфери і пилу, пневматичні в наслідок дії вологи і пилу, п'єзоелектричні в умовах високої вологи та вібрацій. П'ять засобів потребують змінної напруги живлення або стисненого повітря. Три вимірювальні системи відрізняються великою складністю, на 11 пристроїв сильно впливають збурюючі фактори. Дев'ять пристроїв відрізняються великими габаритами, а шість призначені для вимірювання великих переміщень. П'єзокерамічні (п'єзотрансформаторні) призначені для невеликих зусиль, а магнітопружні навпаки для великих зусиль. Найбільше значення критерію оптимальності склало 4 – це вісім вимірювальних засобів. Дещо менше значення критерію оптимальності 3 отримали п'єзоелектричні перетворювачі, а споріднені з ними п'єзотрансформаторні

перетворювачі мають $J_B = 4$. Пристрої з таким значенням результуючого критерію оптимальності не можливо застосувати для контролю енергетичної ефективності подрібнення руди в барабанах кульових млинів. Для подальшого розгляду слід залишити ємнісні, магнітоіндукційні п'єзоелектричні перетворювачі й тензометри з $J_B = 1$ та тензометричні перетворювачі з $J_B = 0$, які мають найкращий показник у порівнянні цих пристроїв.

Таблиця 1

Значення часткових і результуючих критеріїв оптимальності при вилученні пристроїв з повного переліку, які не підходять для вирішення даної задачі

Вторинні перетворювачі	Часткові критерії оптимальності							Результуючий критерій оптимальності
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	
Індуктосини	–	1	1	–	1	1	–	4
Індуктивні	–	1	–	1	1	1	–	4
Диференціально-трансформаторні	–	1	–	1	1	1	–	4
Ємнісні	–	–	–	1	–	–	–	1
Потенціометричні	1	–	–	1	1	1	–	4
Магнітоіндукційні	–	–	–	–	1	–	–	1
Цифрові	–	–	1	1	1	1	–	4
Лазерні	–	–	1	1	1	1	–	4
Пневматичні	1	1	–	1	1	–	–	4
Тензометричні	–	–	–	–	–	–	–	–
Тензометри	–	–	–	1	–	–	–	1
П'єзоелектричні (п'єзотрансформаторні)	1	–/1	–	1	–	–	1	3/4
П'єзокерамічні	–	–	–	1	–	–	–	1
Магнітопружні	–	1	–	1	1	–	1	4

Аналіз вторинних перетворювачів, які виокремлені для подальшого розгляду, показує, що їх можливо подати у вигляді рис. 2, з якого видно, що вони представлені

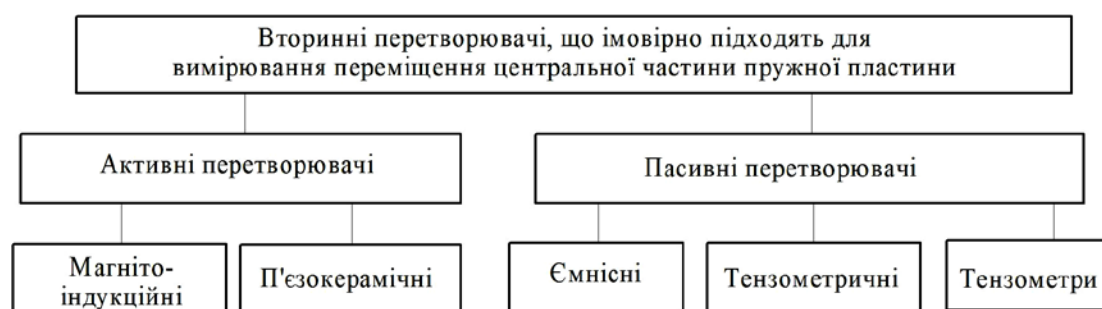


Рис. 2. Класифікація вторинних перетворювачів, які імовірно підходять для вимірювання переміщення центральної частини пружної пластини.

двома групами – активними і пасивними. Активні або генераторні перетворювачі у даному випадку є більш придатними, оскільки на обертових об'єктах типу барабана кульового млина існує дефіцит енергії живлення. Результати вимірювання енергетичної ефективності подрібнення руди з обертової частини об'єкта вимірювання за допомогою

радіоканалу [9] передаються на нерухому. Оскільки канал передачі інформації з обертової частини об'єкта на нерухому обов'язково має певну похибку, для забезпечення заданої точності керування необхідно її компенсувати на інших ділянках вимірювального ланцюга. Цього можливо досягти практично лише за рахунок підвищення точності вторинних перетворювачів. Отже, обраний вторинний перетворювач по можливості повинен забезпечувати найбільш високу точність вимірювання переміщення. Тому пристрої, відмічені на рис. 2, необхідно проаналізувати більш докладніше.

П'єзокерамічні перетворювачі мають високу чутливість і не потребують джерела живлення, однак напруга, яка виникає при зміні температури, у ряді випадків може стати джерелом значних похибок [10]. Крім того, необхідність кріплення їх до деталі (бажано гвинтами) не дозволяє їх використати для таких вимірювань.

Нині найбільш відпрацьованими є тензометричні перетворювачі. Датчик наклеюють на поверхню досліджуваної деталі для вимірювання діючого зусилля. Перетворювачі характеризуються вимірювальною базою, що звичайно дорівнює 5...20 мм, їх опір становить 30...500 Ом. Дія перетворювачів ґрунтується на явищі тензоефекту – зміні активного опору провідників при механічній деформації. Придатність матеріалу для датчиків характеризує коефіцієнт тензочутливості

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta l/l}, \quad (2)$$

де R – активний опір провідника; l – довжина провідника; μ – коефіцієнт Пуассона; ρ – питомий електричний опір провідника.

Провідник повинен мати мінімальний температурний коефіцієнт електричного опору α , великий питомий опір, добру механічну міцність і відтворюваність характеристик. Звичайно застосовують константан: $k \approx 2$; $\rho \approx 0,48$ Ом·мм²/м. Залізохромалюмінієвий сплав має найкращі усереднені характеристики: $k \approx 2,85$; $\rho \approx 1,45$ Ом·мм²/м; $\alpha \approx 13 \cdot 10^{-6}$, 1/°С, а найбільший коефіцієнт тензочутливості у платинорадію – 5,8. Застосовують також перетворювачі з решіткою із тонкої фольги, впресованої у пластмасову плівку. Якщо метал решітки замінити напівпровідниковим матеріалом, матимемо тензомер. Найбільшого поширення набрали кремнієві тензометри, які мають велику чутливість ($k \approx 100 \dots 150$) і невеликі габарити ($2 \dots 7 \times 0,2 \times 0,15$ мм). Їх недоліками є нелінійність характеристики, велика термочутливість та ін.. Це не дозволяє тензометри використати в якості вторинних перетворювачів при контролі енергетичної ефективності подрібнення руди в барабані кульового млина.

Ємнісні перетворювачі в основному реалізують залежність для плоскопаралельного конденсатора

$$C = \varepsilon S / \delta, \quad (3)$$

де C – ємність конденсатора; ε – діелектрична проникність середовища між обкладками (наприклад повітря); S – площа; δ – відстань між обкладками.

На великі можливості ємнісних перетворювачів вказано в роботі [11]. Одночасно в цій же роботі 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 за даним напрямом досліджень. Для практичних потреб використовують в основному ємнісні перетворювачі, побудовані на принципі повітряного проміжку, що змінюється, як конденсаторні мікрофони [10]. З залежності

(3) видно, що статична характеристика таких перетворювачів буде нелінійною. Створення ємнісних перетворювачів спиралось на теорію та практику, які розвивалися рядом авторів в різних країнах. Розробка в США серійних ємнісних перетворювачів переміщення стала їх вершиною, оскільки вони ефективно використовуються в промисловості завдяки способу їх виготовлення. Цим була доведена ефективність і працездатність ємнісних перетворювачів, але теоретичні проблеми залишилися не розв'язаними. В роботі [11] вказується на необхідність подолання перепон, що стоять на шляху ефективного використання ємнісних перетворювачів. Зокрема, в [12] розвинуто ряд аспектів теорії ємнісних перетворювачів, що дає можливість усунення деяких їх недоліків. Введення охоронного кільця в плоско-паралельний конденсатор також сприяє підвищенню точності вимірювання переміщення [10]. Використання високостабілізованих джерел височастотних коливань також дозволяє ще на одну ступінь підвищити точність ємнісних перетворювачів. В той же час ще не ліквідовані недоліки, вказані в роботі [11], стосовно того, що поверхню пластин перетворювача практично не можливо очистити під час роботи. Тому на нього діють температура, волога, пил, пара різних речовин та інші фактори. Вказані недоліки та особливості не можливо усунути в короткий термін, що не дозволяє ефективно використати ємнісні перетворювачі при контролі енергетичної ефективності руйнування руди в барабані кульового млина.

Магнітоіндукційні перетворювачі традиційно використовувалися в інших цілях, однак аналіз показав, що їх можливо застосувати і при вимірюванні невеликих переміщень. Один з варіантів такого перетворювача подано на рис.3. Постійний магніт 1 (рис.3) з допомогою полюсних наконечників 2 створює магнітний потік Φ , який проникає через немагнітну струмопровідну прокладку 3 товщиною a у повітряний простір 4. Нерухомий контрольований об'єм 5, зайнятий магнітним полем, створюється завдяки повітряному зазору 7 довжиною l . Фрагмент пружної пластини 6, наближаючись до полюсних наконечників 2 в результаті її деформації, змінює магнітну проникність контрольованого об'єму 5 і, як наслідок, величину магнітного потоку Φ_M в магнітній системі, який можливо перетворювати у величину, зручну для подальшого використання.

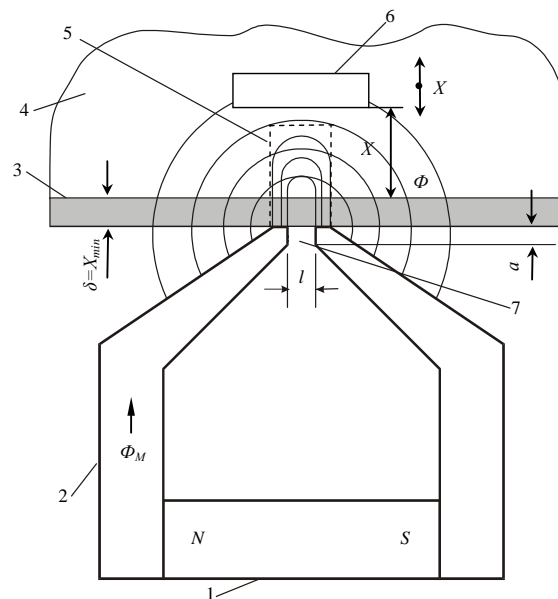


Рис. 3. Магнітоіндукційний перетворювач з фрагментом пружної пластини, що наближається до полюсних наконечників:

- 1 – постійний магніт; 2 – полюсний наконечник; 3 – немагнітна і електроізолююча прокладка;
- 4 – повітряний простір; 5 – нерухомий контрольований об'єм у якому змінюється магнітна проникність; 6 – фрагмент пружної пластини; 7 – повітряний зазор.

Магнітний потік Φ , як видно з рис. 3, має дві складові. Напруженість магнітного поля в таких магнітних системах біля зазору нерівномірна. Максимальне її значення спостерігається безпосередньо в зазорі. З віддаленням вздовж нормалі від крайки зазору відбувається зменшення напруженості магнітного поля за сумою двох експонент [13]. Встановлено, що при невеликих значеннях X напруженість магнітного поля описується першою складовою. Напруженість магнітного поля в основному розповсюджується на глибину 20 мм і на цих відстанях має практично незмінне значення як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках. В межах 0...3 мм напруженість лінійно змінюється від віддалення x від крайки повітряного проміжку. Виконавши роздільну немагнітну прокладку товщиною 1 мм або дещо менше, в межах переміщення до 3 мм очікується лінійна залежність напруженості магнітного поля від переміщення.

Знайдемо залежність магнітного потоку від переміщення x центру пружної пластини. В магнітній системі перетворювача магнітний потік в сталі Φ_C дорівнює магнітному потоку у повітряному проміжку Φ_{II} [14]. Розглянемо магнітний потік у повітряному проміжку маючи на увазі, що магнітна напруга в сталі U_{MC} також дорівнює магнітній напрузі у повітряному проміжку U_{MII} [14]. На підставі закону Ома для магнітного ланцюга можна записати $U_M = \Phi R_M$ або $U_M = H l_g$, де Φ – магнітний потік; R_M – магнітний опір ділянки ланцюга; l_g – довжина ділянки магнітного ланцюга. При цьому відповідно напруженість магнітного поля, магнітний опір і магнітна провідність ділянки ланцюга дорівнюють:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\Phi}{\mu_0 \mu_r S}; R_M = \frac{l_g}{\mu_0 \mu_r S}; G_M = \frac{1}{R_M} = \frac{\mu_0 \mu_r S}{l_g}, \quad (4)$$

де B – магнітна індукція; μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_r – магнітна проникність матеріалу ланцюга; S – площа поперечного перерізу магнітопроводу.

Помножимо і поділимо праву частину першого виразу в (4) на довжину ділянки магнітного ланцюга і, знайшовши обернену величину H , визначимо значення магнітного потоку у повітряному проміжку:

$$\Phi = H l_g G_M = H l_g \frac{\mu_0 \mu_r S}{l_g}. \quad (5)$$

У магнітній системі магнітоіндукційного перетворювача через повітряний проміжок одночасно проходить чотири магнітних потоки, як це видно з рис.3. Застосовуючи загальну залежність (5) і знаходячи відповідні параметри магнітного ланцюга, для кожного з них можливо визначити аналітичні значення.

Магнітний потік у повітряному проміжку між полюсними наконечниками дорівнює

$$\Phi_{II} = H_{II} l \frac{\mu_0 \mu_{II} ab}{l} = H_{II} \mu_0 \mu_{II} ab, \quad (6)$$

де a – ширина крайки полюсних наконечників; b – ширина полюсних наконечників, що відповідає розміру постійного магніту; μ_{II} – магнітна проникність повітря.

Магнітний потік у немагнітній прокладці:

$$\Phi_{III} = \frac{H_{II1} + H_{II2}}{2} l_1 \cdot \frac{\mu_0 \mu_{III} \delta b}{l_1} = H_{IIcp} \cdot l_1 \frac{\mu_0 \mu_{III} \delta b}{l_1} = H_{IIcp} \mu_0 \mu_{III} \delta b, \quad (7)$$

де $H_{\Pi 1}$, $H_{\Pi 2}$, H_{cp} – відповідно напруженість магнітного поля на лівому, правому кінці та посередині немагнітної прокладки; $\mu_{\Pi M}$ – магнітна проникність матеріалу прокладки; l_1 – розмір магнітного поля вздовж повітряного проміжку поза магнітною системою, що складає приблизно 10...12 мм.

Магнітний потік у змінному магнітному проміжку:

$$\Phi_{\Pi V} = \mu_0 \mu_{\Pi} b \left[(H_{\Pi} - k_H X_{\min}) X - \frac{k_H}{2} X^2 \right], \quad (8)$$

де k_H – коефіцієнт нахилу прямої, що проходить через точку H_{Π} в декартовій системі координат.

Магнітний потік, що проходить через пружну пластину:

$$\Phi_{CV} = \mu_0 \mu_r b \left\{ \left[H_{\Pi} - k_H \left(X_{\min} + \frac{1}{2} X_{\max} \right) \right] X_{\max} - (H_{\Pi} - k_H X_{\min}) X + \frac{k_H}{2} X^2 \right\}, \quad (9)$$

де X_{\max} – відповідає найбільшому віддаленню X пружної пластини при входженні в неї магнітного поля на нормативну глибину ΔX .

Як видно з отриманих залежностей, перші два магнітні потоки є незмінними, тому в магнітоіндукційному перетворювачі їх можливо не враховувати. Тоді результуючий магнітний потік визначиться залежністю:

$$\Phi_P = \Phi_{\Pi V} + \Phi_{CV}, \quad (10)$$

де всі потоки є змінними і нелінійно залежать від переміщення центральної частини пружної пластини.

Розглянемо закономірність зміни окремих і результуючого магнітного потоку в магнітоіндукційному перетворювачі при переміщенні центральної частини пружної пластини за наступних умов: $X=0...2$ мм; $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\mu_{\Pi}=1,00000038$; $b=0,025$ м; $X_{\min}=0,001$ м; $H_{\Pi}=250000$ а/м; $k_H=9 \cdot 10^7$ а/м²; $\mu_C=31,847133$; $X_{\max}=0,002$ м. Графіки зміни магнітних потоків, отримані в процесі комп'ютерного моделювання з використанням рівнянь (8) і (9), приведені на рис.4. З рис.4 видно, що магнітний потік у змінному повітряному проміжку незначний порівняно з магнітним потоком у пружній пластині. Обидва магнітних потоки мають екстремум.

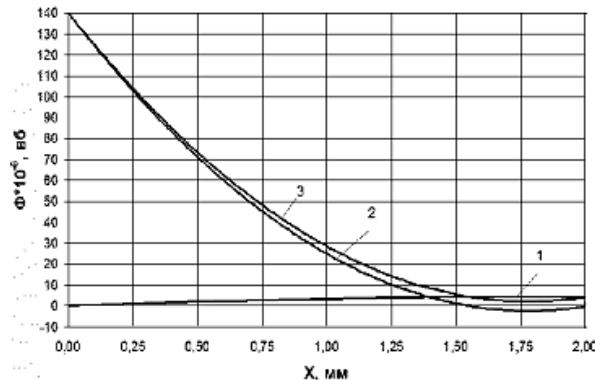


Рис.4. Залежність магнітних потоків магнітоіндукційного перетворювача від переміщення центральної частини пружної пластини
 1 – $\Phi_{\Pi V}$; 2 – Φ_{CV} ; 3 – $\Phi_P = \Phi_{\Pi V} + \Phi_{CV}$

Результуючий магнітний потік також має екстремум в кінці діапазону зміни переміщення. Суттєва нелінійність зміни результуючого магнітного потоку магнітоіндукційного перетворювача не дозволяє його використати для контролю енергетичної ефективності подрібнення руди в барабані кульового млина. Він точно може фіксувати лише невеликі (до 0,25 мм) переміщення, що не задовольняє процес, створований первинним перетворювачем.

Зважаючи на це, доцільно розглянути ще одне конструктивне рішення магнітоіндукційного перетворювача (рис.5.). Воно базується на тому, що на певному віддаленні від крайки полюсних наконечників у площині, паралельній нелінійній прокладці, напруженість магнітного поля є незмінною в межах $\pm 5 \dots 6$ мм відносно центральної частини повітряного проміжку. При переміщенні рухомого елемента 1 відносно повітряного проміжку магнітної системи 2 частина магнітного потоку в даному перерізі проходить через магнітном'який матеріал, а частина – через повітря. Переміщення рухомого елемента 1 на величину X змінює магнітний опір даної ділянки магнітопроводу, що приводить до зміни робочого магнітного потоку. Він буде функцією переміщення X і швидкості переміщення рухомого елемента 1.

Розглянемо випадок виходу рухомого елемента 1 з магнітоіндукційного перетворювача, починаючи від осьової лінії повітряного зазору (рис.5). Фізично 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 [15]. При цьому, нехтуючи розсіюванням магнітного потоку, буде справедливою рівність

$$\mu_c V_c + \mu_{\text{п}} V_{\text{п}} = \mu_{\text{сМ}} V_{\text{сМ}} = \mu_{\text{сМ}} (V_c + V_{\text{п}}), \quad (11)$$

де $\mu_{\text{сМ}}$ – середнє значення магнітної проникності на ділянці магнітного ланцюга;
 V_c , $V_{\text{п}}$, $V_{\text{сМ}}$ – відповідно об'єми магнітном'якого матеріалу, повітря та всього ланцюга.

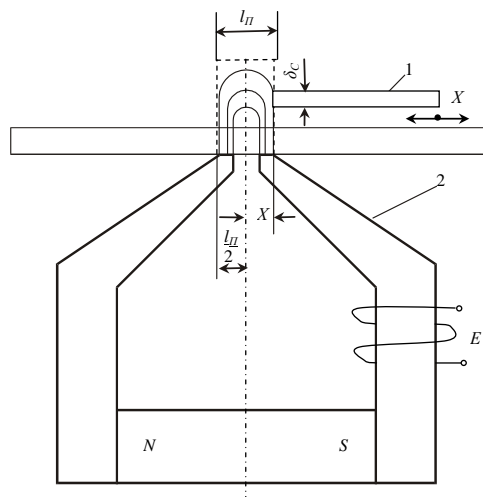


Рис. 5. Магнітоіндукційний перетворювач з елементом, що рухається паралельно немагнітній прокладці:

1 – рухомий елемент з магнітном'якого матеріалу, приєднаний до центральної частини пружної пластини; **2** – магнітна система перетворювача.

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

$$V_{II} = V_{III} + V_{IV} = \delta_c b_c \frac{l_{II}}{2} + \delta_c b_c X, \quad (12)$$

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 магнітним’якого матеріалу складає

$$V_{CV} = \left(\frac{l_{II}}{2} - X \right) \delta_c b_c, \quad (13)$$

де b_c – ширина рухомого елемента (полюсних наконечників).

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

$$V_{CM} = \delta_c b_c l_{II}. \quad (14)$$

З врахуванням $\mu_0 \mu_z = \mu_a$, абсолютних магнітних проникностей ділянок і визначених об’ємів для магнітного ланцюга можливо записати

$$\mu_{aCM} V_{CM} = \mu_{aII} V_{III} + \mu_{aIV} V_{IV} + \mu_{aC} V_C. \quad (15)$$

Підставивши в (15) визначені об’єми всієї ділянки магнітного ланцюга та її частин і зробивши перетворення, визначимо

$$\mu_{aCM} = \frac{1}{2} (\mu_{aII} + \mu_{aC}) - (\mu_{aC} - \mu_{aII}) \frac{X}{l_{II}}. \quad (16)$$

З (16) видно, що магнітна проникність всієї ділянки магнітного ланцюга лінійно залежить від переміщення X рухомого елемента.

Відповідно (5), (16) і значенням параметрів визначимо змінний магнітний потік магнітоіндукційного перетворювача з окремим рухомим елементом

$$\Phi = H_{III} \delta_c b_c \left[\frac{(\mu_{aII} + \mu_{aC})}{2} - \frac{(\mu_{aC} - \mu_{aII})}{l_{II}} X \right], \quad (17)$$

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

З залежності (17) видно, що магнітний потік магнітоіндукційного перетворювача лінійно змінюється при переміщенні рухомого елемента (центральної частини пружної пластини). Виміряти цей потік, точніше його частину, можливо перетворювачем Холла. Враховуючи зв’язок параметрів у перетворювачі Холла і те, що магнітний потік $\Phi = B \cdot S$, де B – індукція магнітного поля; S – площа, через яку проходить магнітний потік, електрорушійна сила на виході вимірювального ланцюга буде

$$E_x = \frac{R_x}{d_x} I_x \frac{\Phi_x}{S_x}, \quad (18)$$

де R_x – стала Холла; d_x – товщина пластинки перетворювача Холла; I_x – струм, що проходить через перетворювач.

Отже, за рівнем е.р.с. Холла можливо робити судження про прогин центральної частини пружної пластини при ударі кулі. Контроль переміщення можливо здійснювати достатньо точно. Для цього перетворювач Холла необхідно розмістити у наскрізній щілині, зробленій у полюсному наконечнику.

Електрорушійна сила магнітоіндукційного перетворювача з врахуванням (17) буде мати значення

$$E_M = -w \frac{d\Phi}{dt} = wH_{II} \frac{\delta_{cbC}}{l_{II}} (\mu_{ac} - \mu_{ал}) \frac{dX}{dt}. \quad (19)$$

Як видно з (19), E_M пропорційна першій похідній від переміщення, тобто швидкості переміщення рухомого елемента, що можливо використати як допоміжну інформацію.

Отже, магнітоіндукційний перетворювач є одним з найкращих пристроїв для контролю переміщення центральної частини пружної пластини. Однак достатньо ефективним є і тензометричний провідниковий перетворювач. Особливо його характеристики покращуються якщо також застосувати проміжний рухомий елемент, зв'язаний з центральною частиною пружної пластини, який деформує додатковий елемент – закріплену нерухомо з одного кінця невелику балку. При цьому тензоперетворювач кріпиться не на пружній пластині, а на балці, де встановлюють такий же компенсаційний тензоперетворювач, який вмикають у сусіднє з робочим плече вимірювального моста. При цьому обидва перетворювачі є робочими і піддаються різній за знаком, але однакою за величиною деформації. Тут чутливість збільшується у два рази і компенсується вплив температури.

Висновки

До вторинного перетворювача системи контролю енергетичної ефективності руйнування руди у барабані кульового млина висуваються підвищені вимоги в основному стосовно високої точності визначення невеликих переміщень та вібростійкості. Розроблений широкий перелік таких пристроїв. Методом оптимізації відкинуті ті з них, які не можливо застосувати. Серед тих, що імовірно підходять методом аналізу вилучені з переліку засоби, які не можливо реалізувати в наслідок конкретних причин. Перспективними пристроями виявилися нові для даного призначення магнітоіндукційні та традиційні тензометричні. Придатність для таких вимірювань тензометричних перетворювачів досліджувалася методом аналізу, а магнітоіндукційних – моделюванням. Встановлено, що в якості вторинних перетворювачів переміщення центральної частини пружної пластини підходять обидва типи перетворювачів. Як у випадку тензометричних, так і магнітоіндукційних перетворювачів необхідно використовувати проміжний елемент, зв'язаний з центральною частиною пружної пластини. У випадку тензоперетворювачів проміжний елемент деформує затиснену з одного кінця невелику балку, на якій розташовані два перетворювачі з ідентичними характеристиками, які однаково деформуються з різним знаком. У магнітоіндукційних пристроях проміжний елемент повинен забезпечувати переміщення рухомого елемента з магнітним якого матеріалу в площині, паралельній немагнітній і електроізолюючій прокладці перетворювача. Цей пристрій крім фіксування величини переміщення може видавати додаткову інформацію про швидкість переміщення центральної частини пружної пластини.

Перспективою подальших досліджень є розробка вторинних перетворювачів переміщення центральної частини пружної пластини магнітоіндукційного та тензометричного типів, що дозволить при використанні їх в системах управління значно знизити перевитрати електроенергії, куль і футеровки.

Список використаної літератури

1. Пивняк Г. Г., Вайсберг Л. А., Кириченко В. И. и др. Измельчение. Энергетика и технология. Москва: Изд. дом "Руда и Металлы", 2007. 296 с.
2. Мацуй А. М., Кондратець В. О. (2018) Реалізація і забезпечення автоматичного контролю енергоефективності подрібнення руди кульовими млинами. Proceedings of

- the "Science, research, development. technics and technology #8". (Germany, Berlin, August 30-31, 2018). Warszawa: Diamond trading tour, pp. 28-35.
3. Kondratets V. A., Matsui A. N. Theoretical and experimental studies of an elastic plate as a means of identification of the energy-efficient fracturing of the ore. *Computer Science Information Technology Automation Journal*. 2018. №8. P. 19-32.
 4. Павлов Б. В. Диагностика "болезней машин". Москва: Колос, 1971. 136 с.
 5. Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль. Киев: Вища школа, 1990. 207 с.
 6. Майзер Х., Эйджин Н., Тролл Р. и др. Исследование операций: в 2 т. Т. 1: Методологические основы и математические методы / пер. с англ. под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. Москва: Мир, 1981. 712 с.
 7. Атенков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 440 с. (Сер. Математика в техническом университете; Вып. XIV).
 8. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. Москва: Высшая школа, 2001. 208 с.
 9. Мацуй А. М., Кондратець В. О. Теоретичне дослідження системної стабілізації підсилювальних властивостей радіоканалу для агрегатів з обертовими частинами. *Вісник Житомирського державного технічного університету. Технічні науки*. 2018. №1 (81). С. 191-201.
 10. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Введение в теорию, расчет и конструирование / Пер. с англ. М.М. Фетисова. Ленинград: Энергия, 1970. 360 с.
 11. Воронцов Л. Н., Кондорф С. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1988. 280 с.
 12. Кондратець В. О. Розвиток теорії ємнісних датчиків як засобів автоматичного контролю технологічних процесів. *Прогресивные технологии и системы машиностроения*. 2000. №12. С. 116-120.
 13. Мацуй А. М., Кондратець В. О. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора. *Електротехніка та електроенергетика*. 2017. №2. С. 38-49.
 14. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В. и др Основы теории цепей. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
 15. Вейнберг А. К. Магнитная проницаемость, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и теплопроводность среды, содержащей сферические и эллипсоидальные включения. *ДАН СССР*. 1966. Т. 169, № 3. С. 543-546.

References

1. Pivnyak, G. G., Vaisberg, L. A., & Kirichenko, V. I. (2007) *Izmel'chenie. Energetika i tekhnologiya*. Moscow: Izd. dom "Ruda i Metally".
2. Matsui, A. M., & Kondratets, V. O. (2018) *Realizatsiia i zabezpechennia avtomatichnoho kontroliu enerhoefektyvnosti podribnennia rudy kulovymy mlynamy*. Proceedings of the *Science, research, development technics and technology #8*. (Germany, Berlin, August 30-31, 2018). Warszawa: Diamond trading tour, pp. 28-35.
3. Kondratets, V. A., & Matsui, A. N. (2018) Theoretical and experimental studies of an elastic plate as a means of identification of the energy-efficient fracturing of the ore. *Computer Science Information Technology Automation Journal*. **8**, 19-32.
4. Pavlov, B. V. (1971) *Diagnostika "boleznei mashin"*. Moscow: Kolos.
5. Belokur, I. P. (1990) *Defektologiya i nerazrushayushchii kontrol*. Kiev: Vyshcha shkola.
6. Maizer, Kh., Eidzhin, N., & Troll, R. (1981) *Issledovanie operatsii*. Moscow: Mir.

7. Attenkov, A. V., Galkin, S. V., & Zarubin, V.S. (2001) *Metody optimizatsii*. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana.
8. Venttsel, E. S. (2001) *Issledovanie operatsii. Zadachi, printsipy, metodologiya*. Moscow: Vysshaya shkola.
9. Matsui, A. M., & Kondratets, V. O. (2018) Teoretychne doslidzhennia systemnoi stabilizatsii pidlyulvalnykh vlastyivostei radiokanalu dlia ahrehativ z obertovymy chastynamy. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Tekhnichni nauky*. **1**, 81, 191-201.
10. Nubert, G. P. (1970) *Izmeritelnyie preobrazovateli neelektricheskikh velichin. Vvedenie v teoriyu, raschet i konstruirovaniie*. Leningrad: Energiya.
11. Vorontsov, L. N., & Kondorf, S. (1988) *Pribory avtomaticheskogo kontrolya razmerov v mashinostroeniie*. Moscow: Mashinostroenie.
12. Kondratets, V. O. (2000) Rozvytok teorii yemnisnykh datchykyv yak zasobiv avtomaticheskogo kontroliu tekhnolohichnykh protsesiv. *Progressivnyie tehnologii i sistemy mashinostroeniya*. **12**, 116-120.
13. Matsui, A. M., & Kondratets, V. O. (2017) Teoretychne i eksperymentalne doslidzhennia mahnitoelektrychnoi systemy, shcho spryimaie krupnist piskiv odnospiralnogo klasyfikatora. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka*. **2**, 38-49.
14. Zeveke, G. V., Ionkin, P. A., & Netushil, A. V. (1989) *Osnovy teorii tsepei*. Moscow: Energoatomizdat.
15. Veinberg, A. K. (1966) Magnitnaya pronitsaemost, elektroprovodnost, dielektricheskaya pronitsaemost i teploprovodnost sredi, sodержashey sfericheskie i ellipsoidalnyie vklucheniya. *DAN SSSR*. **169**, 3, 543-546.