

## ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАКЛАДНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПІІ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

© Дейнека Р., 2019

Потреба у надійності промислових конструкцій, машин та іншого устаткування потребує точнішої дефектоскопії конструкційних матеріалів, зокрема ферромагнітних. Тому актуальною є необхідність удосконалення існуючих чи розроблення нових, точніших методів і пристроїв для дефектоскопії.

Дефектоскопію ферромагнітних матеріалів здійснюють, обстежуючи локальне виступаюче магнітне поле чи визначаючи магнітний опір ділянки матеріалу за допомогою запропонованого нового типу накладного сенсора у вигляді індуктивного елемента на тороїдальному осерді з додатковими магнітопроводами. Цей сенсор має просту конструкцію і високу чутливість, підтвержені експериментально. Запропонований варіант сенсора надає можливість проводити неруйнівне контролювання у процесі експлуатації ферромагнітних конструкцій і без особливих вимог до зовнішніх умов із малими затратами і можливістю комп'ютерної обробки даних.

Із використанням зони нелінійності кривої намагнічування матеріалу осердя індуктивного елемента отримано варіант магнітного сенсора, близький за чутливістю до ферозондів і при цьому набагато простіший за конструкцією, з недефіцитних матеріалів. Використання феритового осердя з низькою індукцією насичення потребує невеликої напруги живлення схеми, але запасу потужності генератора. Запропонований сенсор не чутливий до присутності сторонніх ферромагнітних об'єктів, а реагує виключно на магнітне поле. Високий внутрішній магнітний опір сенсора дає змогу виконувати дефектоскопію без особливих вимог до якості поверхні контролюваного виробу.

Аналітичне дослідження фізичних процесів, які відбуваються в матеріалі магнітного осердя котушки сенсора, що використовується як чутливий елемент, ускладнюється нелінійністю кривої намагнічування матеріалу осердя чутливого елемента та відсутністю єдиної аналітичної залежності для повного опису процесу намагнічування ферромагнітних матеріалів індуктивних елементів. Тому кожний екземпляр сенсора матиме індивідуальне градування, яке можна виконати за допомогою простих технічних засобів використовуючи запропоновану тут методику.

Ключові слова : неруйнівний контроль, магнітна дефектоскопія, ферромагнітні властивості, внутрішні дефекти, магніторушійна сила, градування сенсора, магнітний опір.

The need for reliability of industrial structures, machines and other equipment requires more precise defectoscopy of structural materials, in particular ferromagnetic. Therefore, the urgent need is to improve existing or develop new, more precise methods and devices for defectoscopy.

Flaw detection of ferromagnetic materials is carried out by examining a local propagating magnetic field or determining the magnetic resistance of the material section with the help of the proposed new type of overhead sensor in the form of an inductive element on a toroidal core with additional magnetic conductors. This sensor has a simple design and high sensitivity, which is confirmed experimentally. The proposed version of the sensor provides the ability to conduct non-destructive control in the process of exploiting ferromagnetic structures

and without special requirements for external conditions with low cost and the possibility of computer data processing.

Using the nonlinearity zone of the magnetization curve of the material of the core of the inductive element, it was possible to obtain a variant of the magnetic sensor, which is close to the sensitivity to the ferro-sensors, and at the same time much simpler than the design using non-deficit materials. Using a ferrite core with low saturation induction requires a small supply voltage, but the power reserve of the generator. The proposed sensor is insensitive to the presence of foreign ferromagnetic objects, but responds exclusively to a magnetic field. High internal magnetic resistance of the sensor allows to perform a defectoscopy without special requirements to the quality of the surface of the controlled product.

An analytical study of the physical processes occurring in the material of the magnetic core of the sensor coil used as a sensitive element is complicated by the nonlinearity of the magnetization curve of the core material of the sensing element and the absence of a single analytical dependence for a complete description of the magnetization process of the ferromagnetic materials of the inductive elements. Therefore, each instance of the sensor will have an individual calibration, which can be performed with the help of simple technical means using the method suggested here.

**Keywords:** non-destructive control, magnetic defectoscopy, ferromagnetic properties, internal defects, magnetomotive force, sensor calibration, magnetic resistance.

**Вступ.** Для виявлення дефектів промислових конструкцій зі сталевого прокату часто використовують електромагнітні методи неруйнівного контролю. Спільна сутність цих методів базується на використанні феромагнітних властивостей матеріалів конструкцій. При намагніченні конструкційних елементів зовнішнім постійним полем по них проходить магнітний потік, силові лінії якого спрямовані вздовж напрямку намагнічення.

На всій ділянці зовнішнього намагнічення відбувається розподіл магнітних потенціалів між полюсами намагнічувального пристрою залежно від магнітних опорів елементів ділянки та їх комбінацій. У місцях залягання внутрішніх або підповерхневих дефектів у феромагнітному матеріалі відбувається викривлення магнітних силових ліній, які виступають над поверхнею. Форма та інтенсивність викривлення цих ліній залежать від розмірів і глибини залягання внутрішніх немагнітних дефектів, а саме включень у вигляді раковин, пор, тріщин і т. п. Існуючі методи електромагнітного контролю відрізняються тільки способом ідентифікації виступаючих ліній магнітного поля.

Недоліками цих методів є потреба у пристроях читання магнітограм, необхідний досвід оператора контролю у трактуванні зображень дефектів. Крім цього, на якість виконання контролю значно впливає якість поверхні деталі (нерівності, забруднення, покриття і т. ін.), що передбачає попередню підготовку ділянки, яка підлягає контролю. Саме тому вдосконалення методів дефектоскопії матеріалів з феромагнітними властивостями є актуальним завданням.

У роботі запропоновано вдосконалений метод неруйнівної дефектоскопії із застосуванням накладного сенсора магнітного поля для сканування контрольованої ділянки виробу, наведено варіант конструкції цього сенсора та методику визначення його характеристик.

**Мета роботи.** Покращення методів неруйнівного контролю матеріалів із феромагнітними властивостями, підвищення їх чутливості, розроблення конструкції накладного сенсора магнітного поля, методики його градуювання і визначення робочих характеристик.

**Вирішення проблеми.** Для детектування локального магнітного поля запропоновано використати накладний індуктивний сенсор як найефективніший для цього типу задач [6–10]. Індуктивні сенсори мають свої переваги, недоліки і специфіку застосування. Найвищою чутливістю з них володіють ферозондові перетворювачі (fluxgate magnetometer) які, однак, мають відносно великі габарити і складну конструкцію. Запропонований варіант сенсора магнітного поля для використання у засобах неруйнівного контролю феромагнетиків є індуктивним елементом із обмоткою на кільцевому феритовому осерді 1, до якого прикріплено додаткові магнітопровідні елементи 2, 3 із проміжком між ними (рис. 1).

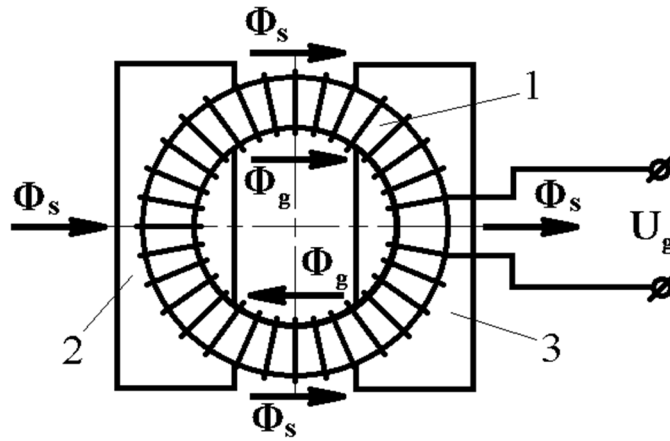


Рис. 1. Схема індуктивного сенсора

Із генератора на обмотку сенсора подається гармонічна напруга звукової частоти  $U_g$  із амплітудою, за якою матеріал осердя починає входити у магнітне насичення при індукції  $B_g$  (рис. 2).

При внесенні сенсора у магнітне поле від підмагнічувального пристрою, який розташований у зоні контролю внутрішнього дефекту, через магнітопровідні накладки зовнішній магнітний потік підмагнічує феритове осердя сенсора. За однієї полярності напруги з генератора на одному з проміжків між магнітними накладками магнітний потік осердя  $\Phi_g$  спричинений генератором, спрямований протилежно до потоку підмагнічування  $\Phi_s$ , спричиненого дефектом і результуючий магнітний потік осердя зменшується. На іншому проміжку власний магнітний потік і зовнішній поля сумуються, що приводить до ще більшого насичення ділянки осердя котушки  $B_d$ , втрати індуктивності і збільшення струму в обмотці сенсора

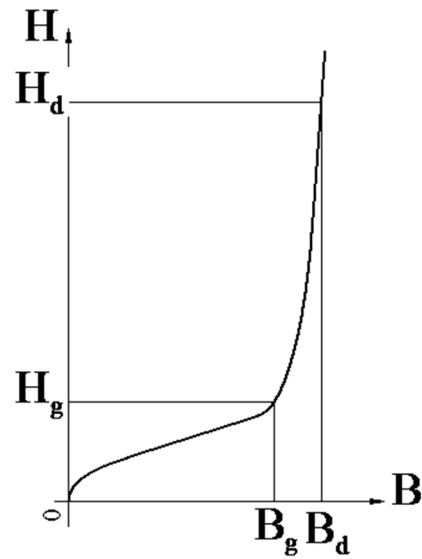


Рис. 2. Функціональна залежність напруженості магнітного поля осердя сенсора  $H$  від індукції  $B$

$$i_a = H_d \frac{l}{w}, \quad (1)$$

де  $l$  – довжина магнітної лінії осердя;  $w$  – кількість витків котушки.

За іншої полярності напруги генератора обидва магнітні потоки додаються на іншому проміжку, а тому насичення осердя відбувається двічі за один період коливань напруги від генератора.

Для вимірювання струму сенсора послідовно з його обмоткою вмикається низькоомний резистор, з якого знімається відповідна напруга, яка є аналогом струму.

У такому сенсорі амплітуду напруги живлення, параметри обмотки і частоту напруги живлення підбирають так, щоби досягти початку зони магнітного насичення матеріалу осердя при його заданих розмірах. Вхідження матеріалу осердя до зони магнітного насичення можна відслідкувати за зміною амплітуди і форми сигналу, який знімається із послідовно увімкненого опору, що видно на експериментальних результатах (рис. 3).

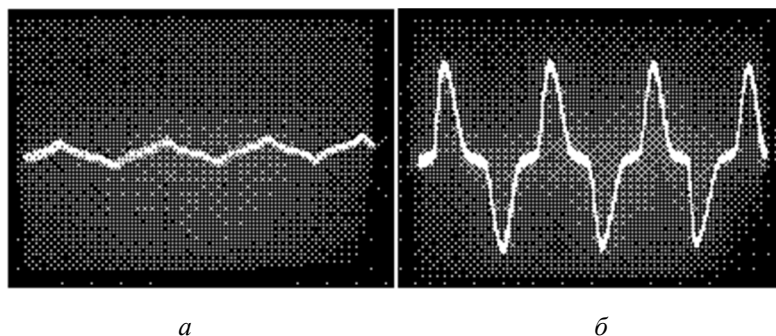


Рис. 3. Осцилограми вихідного сигналу індуктивного сенсора:  
 а – від дії генератора; б – при підмагніченні осердя зовнішнім полем

Отже, якщо зовнішнє магнітне поле, яке створене підмагнічувальним пристроєм, було спотворене внутрішніми дефектом на контрольованій ділянці матеріалу, то це можна детектувати за ступенем зростання струму при насиченні. Тобто, за зміною напруги на послідовному опорі відповідно до зміни напруженості поля є можливість не тільки встановити сам дефект матеріалу, але й оцінити його величину.

Зауважимо, що наявність додаткових елементів магнітопроводу 2 (рис. 1) дає змогу локалізувати і регулювати довжину ділянки контролю.

На створеному макеті сенсора проведено його експериментальні дослідження. Як осердя використано феритове кільце K16×10×5 марки 2000 НМ із індукцією насичення близько 0,3 Тл за кількості витків – 70, амплітуди вхідної напруги – 4 В і частоти 3 кГц. Під час досліджень виявилось, що при зовнішньому підмагніченні осердя на макеті зі штучно створеними дефектами отримана зміна сигналу на опорі перевищувала у 5–8 разів початкове значення. Така чутливість є в рази більша за сенсори-аналоги [9]. Більшу чутливість можна отримати за меншої площі поперечного перерізу осердя, оскільки тоді більшим є ступінь його насичення.

Однак, збільшення струму генератора в режимі насичення котушки означає виникнення похибки вимірювання вихідного сигналу внаслідок падіння частини напруги генератора на провідниках живлення контура. Для мінімізації цієї похибки пропонується розмежувати кола живлення і вимірювання, використовуючи п'ятипровідну схему під'єднання сенсора (рис. 4).

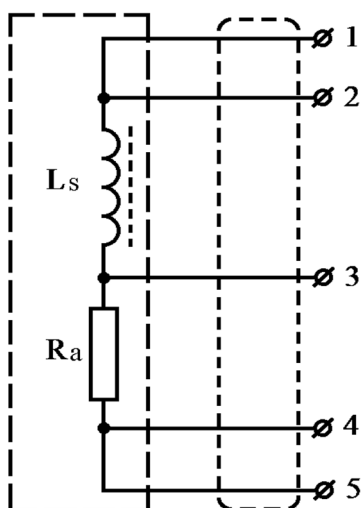


Рис. 4. Схема 5-провідного під'єднання індуктивного сенсора:  
 $L_s$  – індуктивність котушки;  
 $R_a$  – додатковий резистор

Для живлення схеми використано виводи 1 і 5, а високоомні кола вимірювання вихідного сигналу сенсора приєднуються відповідно до виводів 2 і 4 та 3 і 4.

Можливим є схемне рішення (рис. 5), де за відсутності підмагнічення вихідна напруга дорівнює нулю.

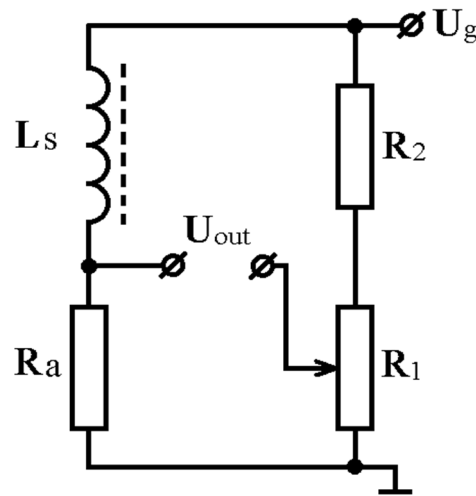


Рис. 5. Принципова схема увімкнення індуктивного сенсора із відліком від нуля

Це дає змогу уникнути постійної складової вихідного сигналу і вести відлік від нульового значення вихідної напруги.

Специфіка градування запропонованого типу сенсора зумовлена особливостями його принципу роботи. Чутливим елементом у сенсорі є феромагнітне осердя, магнітний стан якого знаходиться на межі режиму насичення, і будь-яке стороннє магнітне поле значно впливає на нього і змінює вихідний сигнал. Всі елементи конструкції сенсора, які оточують чутливий елемент (корпус, обмотка, магнітопроводи і т. п.), створюють своє магнітне середовище, вплив якого на сам чутливий елемент розрахувати складно. Тому градуванню підлягає сенсор як конструктивно закінчений виріб у кожному конкретному випадку його виконання.

Один з можливих варіантів градування для наведеної на рис. 1 конструкції сенсора можна виконати за допомогою електромагніта (рис. 6).

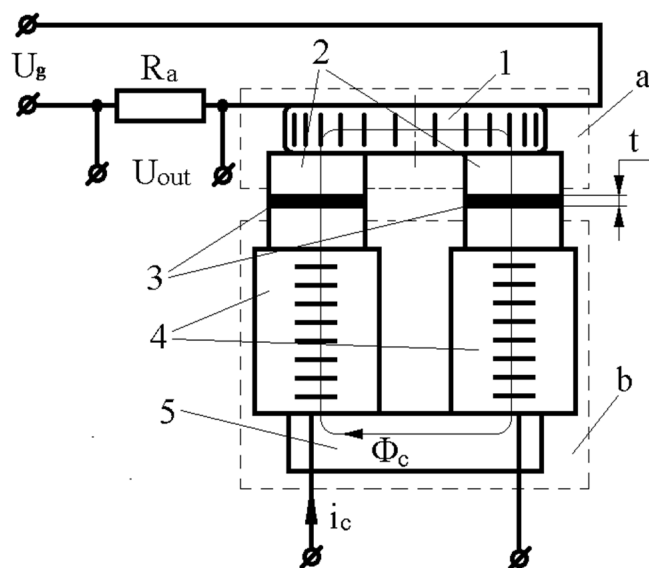


Рис. 6. Схема градування накладного індуктивного сенсора:

*a* – сенсор; *b* – електромагніт;

1 – обмотка сенсора; 2 – магнітопровідні елементи сенсора (полюси сенсора);

3 – немагнітні прокладки; 4 – обмотки електромагніта; 5 – магнітопровід електромагніта

Електромагніт має таку саму форму полюсів осердя, як і магнітопровідні елементи сенсора (полюси сенсора), який встановлюється на електромагніт за вказаною схемою без зазорів між полюсами ( $t=0$ ). На сенсор подають напругу збудження певної амплітуди і частоти і знімають вихідний сигнал напруги з резистора  $R_a$ . Через обмотки електромагніта пропускають постійний струм  $i$ , тоді магніторушійна сила (МРС) між полюсами електромагніта і відповідно між полюсами сенсора буде

$$F = i w, \quad (2)$$

де  $w$  – кількість витків обмоток електромагніта.

Подаючи на електромагніт різні значення струму, отримують експериментальну залежність

$$U_{out} = f(F), \quad (3)$$

яка буде градуовальною характеристикою сенсора за МРС, а вихідна напруга сенсора буде аналогом різниці магнітних потенціалів між його полюсами.

Величиною МРС, яка розсіюється на магнітних контактах приєднання до електромагніта, можна знехтувати з таких причин. Магнітний потік у колі схеми (рис. 6) проходить через магнітопровід електромагніта, полюсні наконечники сенсора і осердя з обмоткою. Відповідно до конструкції сенсора між його осердям і магнітопровідними елементами є зазор, зумовлений товщиною немагнітного шару обмотки та ізоляції. Це означає, що сенсор має високий внутрішній магнітний опір, а прикладання магнітних елементів сенсора до полюсів електромагніта намагаються здійснити так, щоб зазор був мінімізований і тому не впливав на точність градування.

Оскільки значення магнітного потоку, що пройшов через сенсор

$$\Phi = \frac{F}{R_{ms}}, \quad (4)$$

де  $R_{ms}$  – магнітний опір сенсора, то градуовальну характеристику сенсора за магніторушійною силою легко перерахувати у характеристику за магнітним потоком  $U_{out} = f(\Phi)$ , якщо знати магнітний опір сенсора.

Внутрішній магнітний опір накладного сенсора можна визначити за попередньою схемою (рис. 6), але вже із фіксованою величиною магнітних зазорів  $t$ , отриманих за допомогою немагнітних прокладок:

$$R_{ms} = \frac{F_{ms}}{\Phi_c}, \quad (5)$$

де  $F_{ms} = \Phi(U_{out})$  – встановлене за градуовальною характеристикою значення МРС на полюсах сенсора;  $\Phi_c$  – магнітний потік в колі, який можна визначити як:

$$\Phi_c = \frac{F_t}{R_t}, \quad (6)$$

де  $F_t$  – падіння МРС в зазорі,  $R_t$  – розрахунковий магнітний опір зазору:

$$R_t = \frac{t}{\mu_0 S_p}, \quad (7)$$

де  $t$  – величина зазору;  $S_p$  – площа контакту полюса;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Нп/м – магнітна стала.

Значення падіння МРС у зазорі

$$F_t = \frac{iw - F_{ms}}{2}. \quad (8)$$

Тоді

$$\Phi_c = \frac{\mu_0 S_p (iw - F_{ms})}{2t}, \quad (9)$$

а магнітний опір сенсора

$$R_{ms} = \frac{2t F_{ms}}{\mu_0 S_p (iw - F_{ms})}. \quad (10)$$

## Висновки

Із застосуванням накладного давача магнітного поля для неруйнівного контролю феромагнітних матеріалів можна проводити дефектоскопію без використання витратних матеріалів (порошків, магнітних стрічок і т. п.), що спрощує і здешевлює процес контролю.

Використання постійного магнітного поля для пошуку дефектів у феромагнетиках сприяє максимальній чутливості методу та імовірності виявлення внутрішніх і підповерхневих дефектів за великої глибини їх місцезнаходження.

Сканування намагніченої ділянки контролю за допомогою магнітних сенсорів запропонованої конструкції з різними зазорами між полюсами дає змогу отримати розподіл магнітних потенціалів на всій ділянці з будь-якою роздільною здатністю відповідно до вимог конкретного випадку контролю.

Розроблено методику градуювання накладного магнітного сенсора як за магніторушійною силою, так і за магнітним потоком за допомогою простих технічних засобів.

Запропоновано спосіб визначення внутрішнього магнітного опору сенсора, що дає можливість враховувати його в більш точних розрахунках магнітних систем.

1. Дейнека Р. Спосіб локальної дефектометрії феромагнітних матеріалів. – Патент України на корисну модель № 98242. Бюл. № 8 від 27.04.2015 р. 2. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля. / за ред. З. Ю. Готри. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 412 с. 3. Коновалов Н. Н., Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. – М.: ФГУП НТЦ “Промышленная безопасность”, 2006. – 112 с. 4. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідниковий посібник. Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / за ред. З. Т. Назарчука. – Львів : ФМІ, 2001. – 1133 с. 5. Дейнека Р. М. Накладний індуктивний сенсор для магнітної дефектометрії. *Вимірювальна техніка і метрологія: Збірник наук статей.* – 2017. – № 77– С. 109–115. 6. Tumanski S., Induction coil sensor – a review, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, (2007), pp. 31–46. 7. Lenz J., Edelstein A. S., *Magnetic Sensors and Their Applications*, *IEEE Sens. J.*, vol. 6, (2006), no. 3, pp. 631–649. 8. Rajendra Aparathi, Ved Vyas Dwivedi. *Magnetic FemtoTesla Inductor Coil Sensor for ELF Noise Signals–(0.1Hz to 3.0 Hz)* *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)* e-ISSN: 2278–1676, p-ISSN: 2320–3331, Volume 7, Issue 3 (Sep. – Oct. 2013), pp. 65–76. 9. Keck J., Polzinger B., Eberhardt W. and others, *Printed ferrite-based toroidal core coils as magnetic field sensors*, *Microsystems technology in Germany*, 2014, pp. 42–43. 10. Gaworska-Koniarek D., Bajorek J., Wilczynski W. *Magnetic Field Strength Sensor*. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 7/2017. pp. 34–38.