

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 534.143:620.179.17

РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ФЕРОМАГНЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

Є.П. Почапський

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, м. Львів,
79601, тел. (0322) 29-63-51, e-mail: pochapskyu@ipm.lviv.ua*

Описана суть методу діагностування з використанням сигналів магнетопружної акустичної емісії (МАЕ). Представлені результати розрахунку параметрів накладного електромагнета для збудження сигналу МАЕ в ферромагнетних елементах конструкцій. Описано магнетоакустичну вимірювальну систему, яка призначена для відбору та обробки інформації представленої сигналами МАЕ.

Ключові слова: магнетопружна акустична емісія, ферромагнітний елемент, діагностування, доменна структура, система.

Описана суть метода диагностирования с использованием сигналов магнитоупругой акустической эмиссии (МАЭ). Представлены результаты расчета параметров приставного электромагнита для возбуждения сигнала МАЭ в ферромагнитных элементах конструкций. Описано магнетоакустическую измерительную систему, предназначенную для отбора и обработки информации представленной сигналами МАЭ.

Ключевые слова: магнитоупругая акустическая эмиссия, ферромагнитный элемент, диагностирование, доменная структура, система.

Essence of method of diagnostics with the use of signals of magnetoelastic acoustic emission (MAE) is exposed. The results of calculation of parameters of the attached electromagnet for excitation of signal MAE in the ferromagnetic elements of constructions are presented. The magnetoacoustic measuring system, intended for a selection and processing of information presented by the MAE signals, is described.

Key words: magnetoelastic acoustic emission, ferromagnetic element, diagnostics, blast-furnace structure, system.

Застосування акустичної емісії (АЕ), як одного із методів неруйнівного контролю (НК) елементів конструкцій у деяких випадках є обмеженим, оскільки додаткове навантаження об'єкта контролю (ОК), як цього вимагають регламентні документи на проведення АЕ-діагностування, може бути недопустимим [1-3]. В цій ситуації можна одержувати інформацію про стан ферромагнетного конструкційного матеріалу методом магнетопружної акустичної емісії (МАЕ). Вона виникає під час перемагнетчування ферромагнетика і пов'язана з ефектом Баркгаузена. Збуджують МАЕ процеси стрибкоподібної зміни положення 90° доменних стінок, якими супроводжуються магнетострикційні ефекти [4]. Перші спроби реєстрації пружних коливань, які виникають під час перемагнетчування, та пояснення фізичної

суті явища були зроблені ще в 40-х роках минулого століття [5]. Однак свого розвитку такі дослідження набули пізніше [6, 7].

Інформаційні параметри сигналу МАЕ (підсумковий рахунок, сума амплітуд, потужність, середнє квадратичне значення тощо) залежать від впливу на ферромагнетик перемагнетчующого поля різної напруженості та частоти, форми перемагнетчующого імпульса і є чутливим до структурних змін матеріалу об'єкта контролю, режиму термообробки, пластичної деформації, залишкових напружень, наводнення тощо [8-10]. Здеградований матеріал змінює свою доменну структуру, що впливає на зміну параметрів МАЕ. Експериментально виявлено, що найбільше змінює потужність МАЕ пластичне деформування матеріалу, а дещо менше водневий чинник, дія якого, в свою

чергу, залежить від концентрації у феромагнетика.

Суть методу діагностування полягає в тому, що на елемент конструкції локально діють зовнішнім повільнозмінним магнетним полем, яке викликає стрибкоподібне зміщення доменних стінок під час перемагнення. Це явище супроводжується поширенням пружних хвиль АЕ у феромагнетика – так званої МАЕ [5]. Вона генерується з амплітудами, які пропорційні напруженості зовнішнього магнетного поля та об'ємові, що перемагнечується. Внаслідок деградування феромагнетних матеріалів суттєво змінюється їх структурна будова, що призводить і до змін доменної структури. А це значить, що змінюється і величина стрибка доменної стінки під час намагнення здеградованого феромагнетика. Таким чином, якщо на ділянки феромагнетного матеріалу ОК чи елемента конструкції, де є місця різної деградованості матеріалу, що найхарактерніше для випадку довготривалого їх експлуатування (особливо у воденьвмісних середовищах), подіяти зовнішнім магнетним полем, то за однакової його напруженості, відстані, з якої проводиться намагнення, а також швидкості зміни магнетного потоку, яким намагнечують різні локальні ділянки феромагнетика, можна отримати різні значення амплітуд сигналів МАЕ у залежності від ступеню деградованості цих місць у феромагнетика.

Як впливає із викладеного, для здійснення запропонованого методу діагностування не потрібно додаткової механічної обробки поверхні, він не залежить від форми поверхні контролю, а також не вимагає прикладання додаткових навантажень чи деформацій. Це суттєво здешевлює проведення діагностичних робіт і підвищує їх технологічність, а також не несе загрози виникнення додаткових пошкоджень та провокування розвитку тріщин.

На рис. 1 показано структурну схему діагностування [11, 12]. На елементі конструкції із феромагнетного матеріалу встановлюють в довільному місці первинний перетворювач пружних хвиль МАЕ 1. На деякій максимальній відстані від нього, що визначається чутливістю первинного перетворювача, збуджують МАЕ шляхом намагнення локальних областей елемента конструкції накладним електромагнетом (НЕМ) 2, який генерує змінне магнетне поле напруженості H . Частота зміни магнетного поля задається в генераторі 3, а його необхідна величина забезпечується підсилювачем 4.

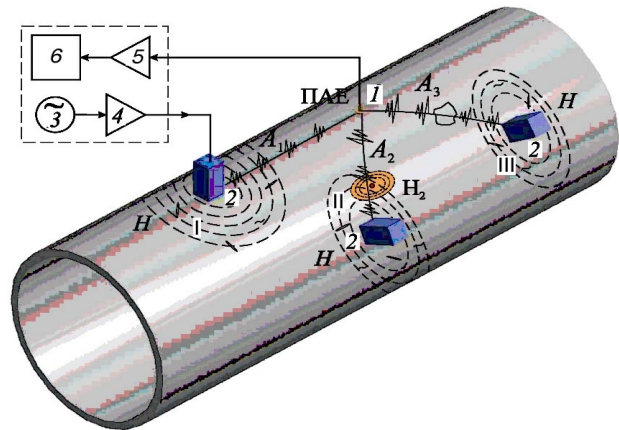


Рисунок 1 – Структурна схема виконання методу магнетопружної акустичної емісії

У місцях, де деградування феромагнетного матеріалу відсутнє, отримують імпульси МАЕ з амплітудами A_0 , яка вимірюється на виході первинного перетворювача 1 за допомогою попереднього підсилювача пружних хвиль 5 та приладу реєстрування МАЕ 6. Переміщуючи НЕМ над поверхнею феромагнетного елемента конструкції, порівнюють зміну значень амплітуди A_0 з урахуванням попередньо встановленого для даного феромагнетного матеріалу коефіцієнта зникання пружних хвиль у залежності від відстані їх проходження. У випадку, коли магнетне поле магнета 2 попадає на місця локальної пошкодженості феромагнетика (зони I, II, III), на виході первинного перетворювача 1 фіксують зміну ΔA_{0i} амплітуд магнетопружної АЕ, яка визначається як різниця амплітуд: $\Delta A_{01} = A_0 - A_1$; $\Delta A_{02} = A_0 - A_2$; $\Delta A_{03} = A_0 - A_3$ тощо і свідчить про деградованість у цих місцях структури феромагнетного конструкційного матеріалу. Маючи попередньо встановлені у лабораторних умовах криві залежності A_0 від віддалі проходження пружних хвиль магнетопружної АЕ у здеградованому і вихідному (недеградованому) феромагнетних матеріалах, а також у матеріалах різного ступеню пошкодженості, можна судити про ступінь їх деградування за величиною ΔA_{0i} .

Про високу чутливість запропонованого способу свідчать результати випробування пластин товщиною 0,2 мм із сталі Ст.30, які піддавали впливові наводнення [10]. Досліджували пластини з матеріалу, що мав стан поставки; після відпалу, а також для випадку, коли цю ж пластину у вихідному стані наводнювали у середовищі газоподібного водню. Результати експериментів підтвердили високу ефективність і чутливість методу.

Реалізація методу МАЕ в реальних умовах експлуатації феромагнетних елементів конструкцій передбачає перемагнечування певного об'єму об'єкта, що діагностується. При цьому важливе значення має локальність і глибина області, яка перемагнечується. У зв'язку з цим актуальною є задача розрахунку розподілу індукції магнетного поля створюваного НЕМ в феромагнетному матеріалі і, ґрунтуючись на цих розрахунках, вибір конструкції НЕМ, оптимізація його за геометричними розмірами, параметрами обмотки та величиною споживаного струму.

Проведений числовий розрахунок просторового і часового розподілів індукції магнетного поля, створюваного НЕМ

соленоїдної і П-подібної форм у феромагнетному матеріалі, дав змогу здійснити обґрунтований вибір типу НЕМ [13]. Так, за П-подібної форми досягається краща локалізація і глибше проникнення у матеріал магнетного поля заданого значення індукції (рис. 2). Зокрема, для НЕМ соленоїдної форми індукція магнетного поля на глибині 6 мм дорівнює 0,26 Т, а для НЕМ П-подібної форми аналогічний показник дорівнює 0,45 Т, тобто в 1,73 рази є більшим [13]. Це забезпечує ефективніше виконання поставленої задачі: перемагнечення заданого об'єму феромагнетика з метою збудження сигналу МАЕ – носія інформації про фізичний стан досліджуваного об'єкта.

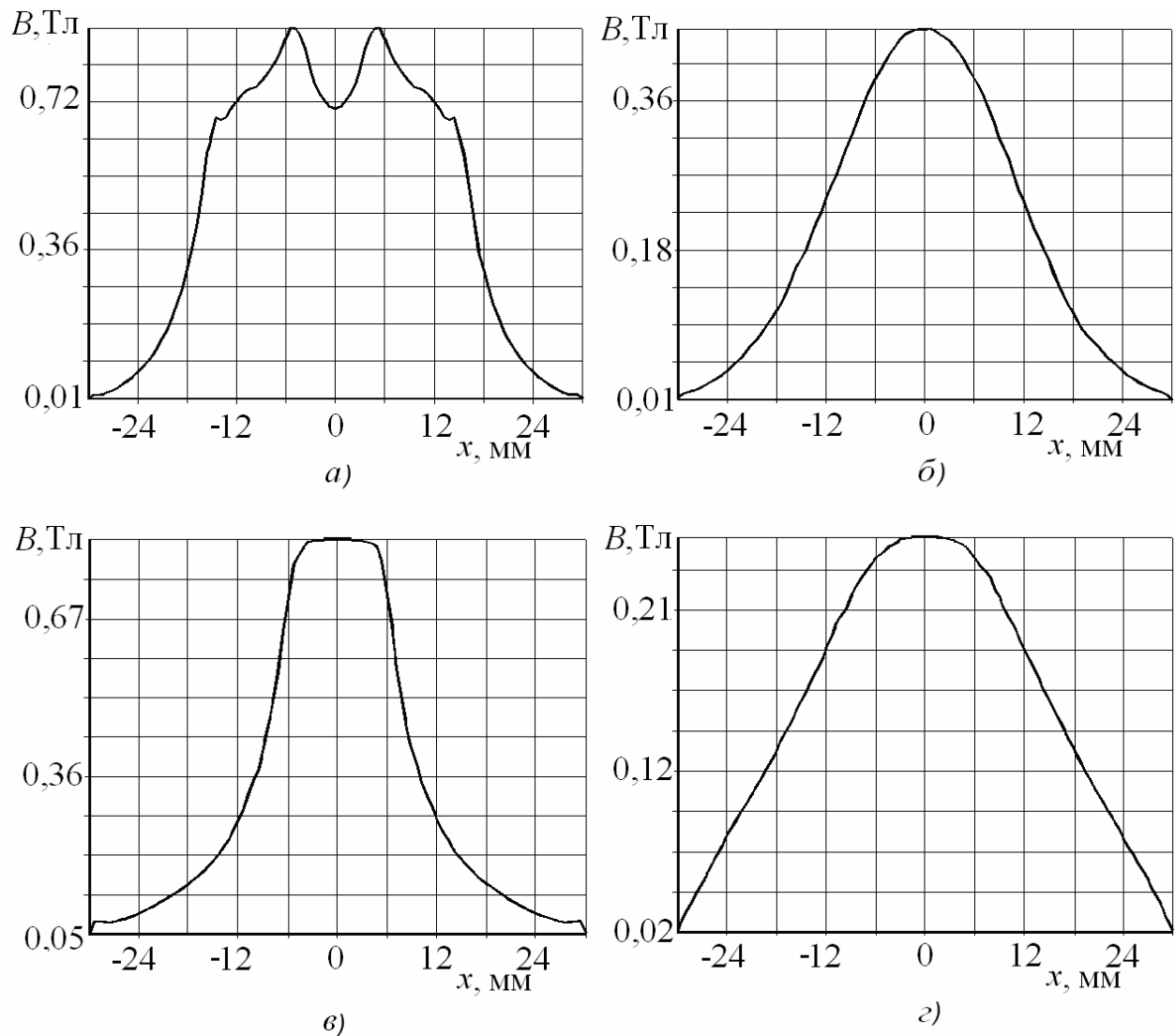


Рисунок 2 – Розподіл модуля вектора індукції магнетного поля, створюваного у зразку з феромагнетика П-подібним (а, б) та соленоїдної форми (в, г) НЕМ, відповідно, на глибині: а, в – 1 мм; б, г – 6 мм вздовж лінії перпендикулярної до їхньої осі симетрії

Для оптимізації параметрів П-подібного НЕМ, а саме вибору геометричних розмірів магнетопроводу, типу феромагнетного матеріалу магнетопроводу, кількості витків та сили струму в його обмотках для забезпечення намагнення феромагнетика певних геометричних розмірів, зокрема заданої товщини, були проведені додаткові експериментальні дослідження.

Перш за все здійснили ресстрацію сигналу МАЕ під час перемагнення сталюї пластини розмірами 240x30x2 мм, розміщеної в соленоїді діаметром 55 мм, довжиною 300 мм, кількістю витків в обмотці 1500. В результаті були одержані залежності підсумкового рахунку та суми амплітуд сигналу МАЕ від амплітуди синусоїдного перемагнечуючого струму частотою 9 Гц (ця частота вибрана з метою кращого перемагнення та уникнення гармонік силової мережі живлення з частотою 50 Гц і забезпечує генерацію сигналу МАЕ необхідної потужності).

Паралельно проведено розрахунок розподілу індукції магнетного поля у досліджуваній пластині із сталі Ст.30, розміщений у соленоїді із вище заданими параметрами (квазістаціонарний випадок, рис. 3). За результатами розрахунку одержані залежності максимального значення модуля індукції поля в пластині від амплітудного значення збуджуючого струму в обмотці соленоїда (рис. 4).

Використовуючи результати експериментального дослідження та чисельного розрахунку, були побудовані графічні залежності параметрів МАЕ від індукції магнетного поля в пластині (рис. 5) [10].

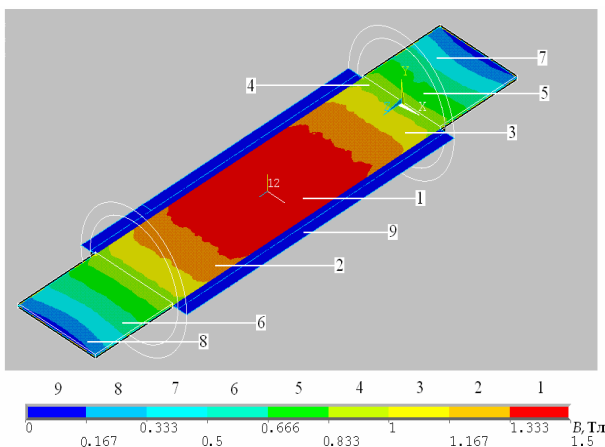


Рисунок 3 – Розподіл модуля індукції магнетного поля у площині пластини із сталі Ст.30 для струму в обмотці соленоїда амплітудою 0,7 А

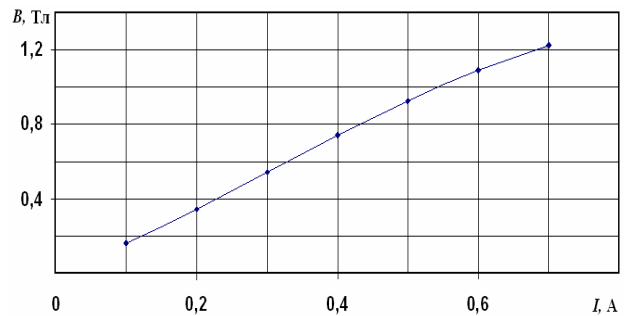


Рисунок 4 – Залежність модуля вектора індукції магнетного поля в пластині від амплітуди синусоїдного перемагнечуючого струму частотою 9 Гц

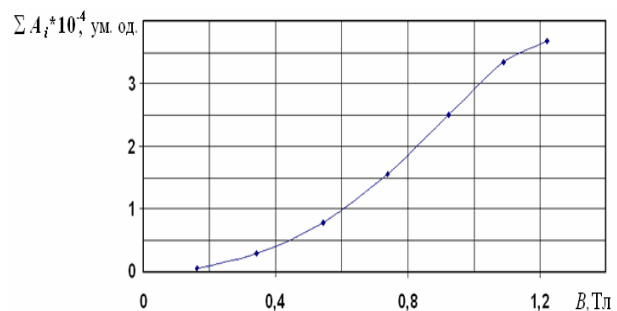


Рисунок 5 – Залежність підсумкового рахунку та суми амплітуд МАЕ від амплітудного значення індукції магнетного поля в пластині

На основі наведених на рис. 4 і рис. 5 залежностей можна зробити висновок, що ефективно збудження сигналу МАЕ починається для значень індукції магнетного поля приблизно 0,8 Тл. Тому розроблюваний НЕМ повинен забезпечувати в заданому об'ємі феромагнетного матеріалу магнетне поле індукцією не менше 0,8 Тл.

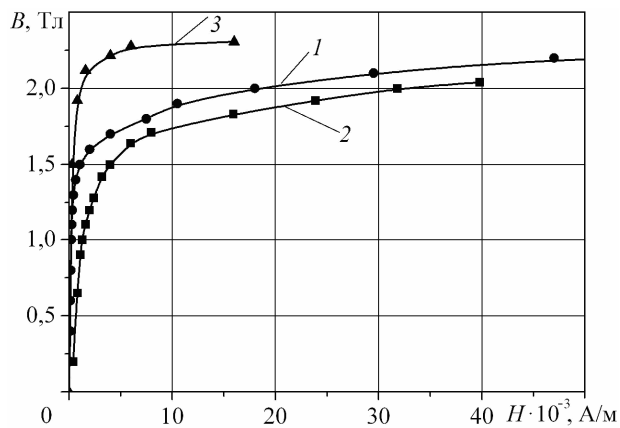
Для подальших розрахунків задавалися значенням товщини досліджуваного феромагнетного зразка $d \leq 15$ мм, яке охоплює широкий спектр товщин стінок труб промислового використання. Чисельні розрахунки індукції магнетного поля в зразках з такою товщиною проводилися для НЕМ П-подібної форми, здійснюючи варіацію геометричних параметрів магнетопроводу, зокрема, висоти ніжок магнетопроводу, відстані між ними та площі поперечного перерізу магнетопроводу.

Грунтуючись на результатах розрахунків встановлено, що індукція створюваного в зразку магнетного поля слабо залежить від висоти ніжок магнетопроводу, відстані між ними і суттєво залежить (за інших однакових параметрів) від площі поперечного перерізу

магнетопроводу. Із збільшенням площі збільшується величина індукції магнетного поля та глибина його проникнення у зразок.

Були проведені також числові розрахунки індукції магнетного поля, створюваного НЕМ заданих геометричних розмірів, але з магнетопроводами з різних феромагнетних матеріалів, В-Н характеристики яких наведені на рис. 6.

На рис. 7 наведений у вигляді зонної картини розподіл індукції магнетного поля у площині магнетопровода для сталі 10895 та Fe-Co – сплаву *vasoflux50*, відповідно. Із рис. 7 видно, що ефективнішим з точки зору енергозатрат є матеріал, в якого В-Н характеристика має найбільшу індукцію насичення, що досягається за незначних значень напруженості зовнішнього магнетного поля.



1 – сталь 10895; 2 – сталь 30; 3 – Fe-Co сплав *vasoflux50*

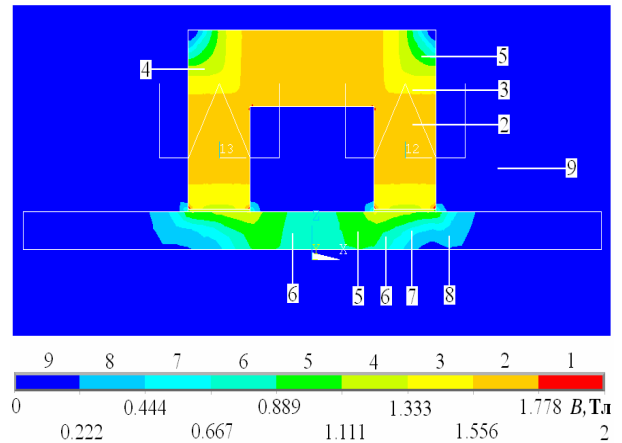
Рисунок 6 – Залежність магнетної індукції B від напруженості поля H для деяких феромагнетних матеріалів

Зокрема, це стосується магнетопроводу із сплаву *vasoflux50*, який дозволяє досягнути певного значення індукції поля за менших значень сили струму в обмотках магнетопроводу.

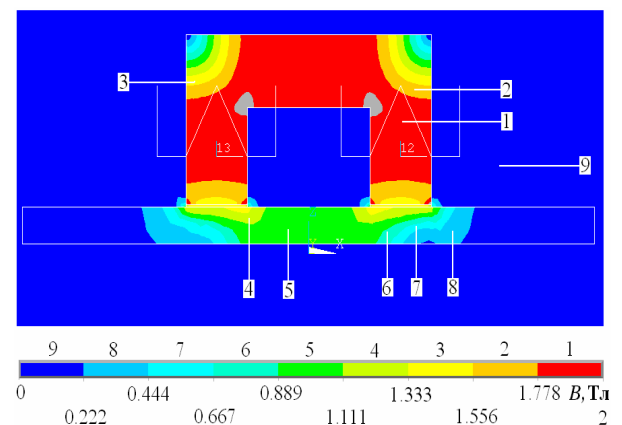
Грунтуючись на результатах проведених досліджень та виходячи з наявної номенклатури магнетних матеріалів, вибрали магнетопровід розмірами $a = 26$ мм, $b = 45$ мм, $c = 40$ мм, $h/2 = 50$ мм [14], матеріалом якого є електротехнічна холоднокатана анізотропна тонколистова сталь 3406.

Проведено розрахунок індукції магнетного поля, створюваного розробленим НЕМ, розміщеним вздовж труби діаметром 200 мм і товщиною 10 мм, виготовленої із сталі Ст.30

(рис. 8). Із рис. 8 видно, що створений НЕМ забезпечує необхідне значення індукції магнетного поля в заданому об'ємі труби і промагнетчує її наскрізь.



a)

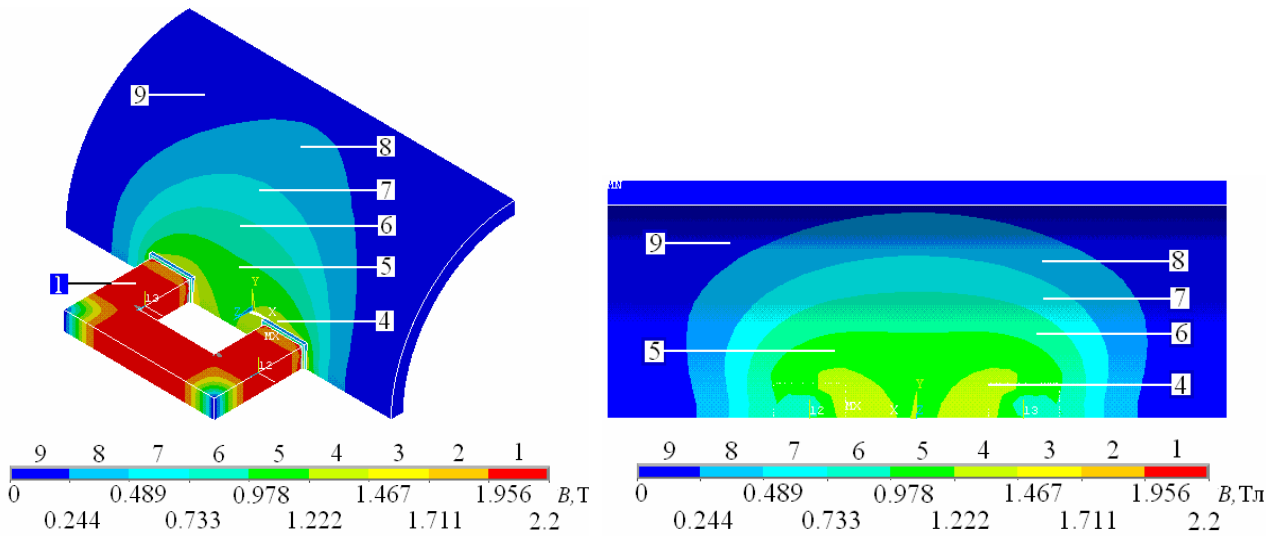


b)

Рисунок 7 – Розподіл модуля індукції магнетного поля у площині магнетопровода розрахункової моделі для матеріалу магнетопроводів із сталі 10895 (a) та з Fe-Co – сплаву *vasoflux50* (б) і за сили струму перемагнетчення 0,6 А

Для забезпечення неруйнівного контролю методом МАЕ створена магнетоакустична вимірювальна система МАЕ-1Л, яка призначена для розв'язання задачі відбору та обробки інформації, представлені сигналами МАЕ, які виникають під час збудження стрибків Баркгаузена у феромагнетик у зовнішнім змінним магнетним полем.

Структурна схема розробленої магнетоакустичної вимірювальної системи МАЕ-1Л наведена на рис. 9.



а)

б)

а – вигляд із зовнішньої сторони; б – вигляд зсередини

Рисунок 8 – Розподіл модуля індукції магнетного поля на поверхні труби за розміщення магнетопроводу НЕМ вздовж труби

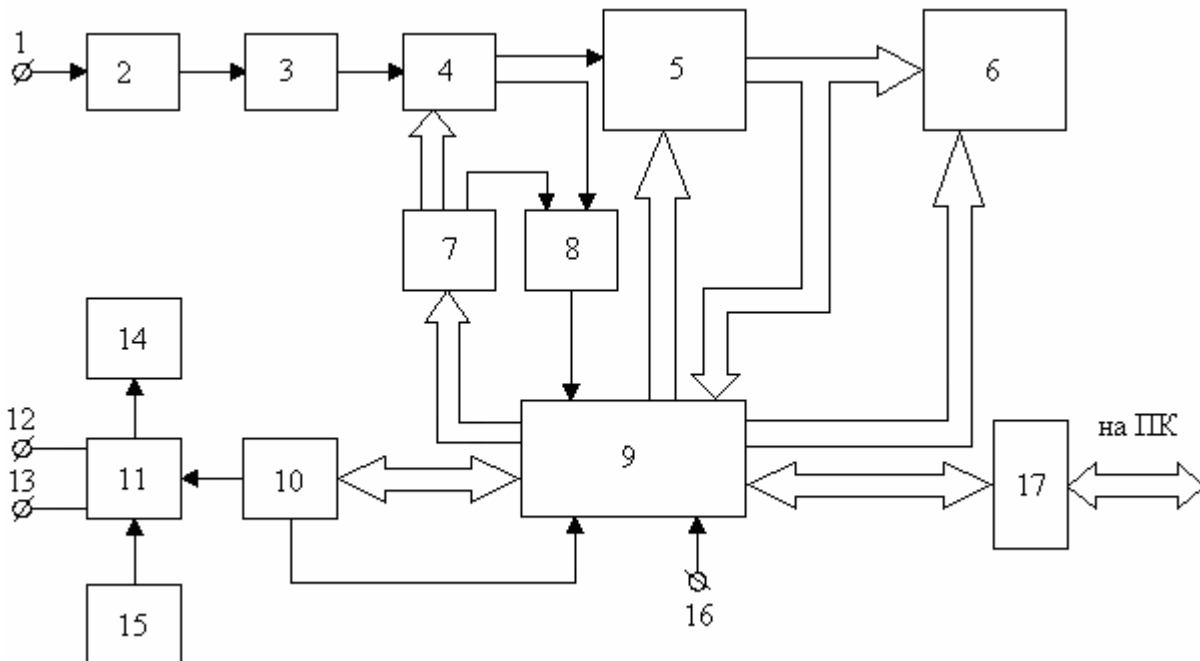


Рисунок 9 – Структурна схема комп'ютеризованої системи відбору, реєстрації та обробки сигналів МАЕ

Вона містить вимірювальний канал, який включає в себе п'єзоелектричний перетворювач, вихід якого з'єднаний з входом 1 попереднього

підсилювача 2, смуговий фільтр 3, основний підсилювач з програмно керованим коефіцієнтом підсилення 4. До складу системи

входять також блоки: аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 5, оперативної пам'яті 6, ЦАП 7, дискримінації та відстежування сигналу АЕ 8, управління 9 [15]. Для збудження сигналу МАЕ у феромагнетних матеріалах додатково розроблені відповідні технічні вузли, які виконані як генератор сигналу перемагнення 10, вихідний силовий блок генератора 11 з виходами 12, 13, блок вимірювання струму перемагнення 14. Зв'язок з персональним комп'ютером здійснюється через інтерфейс 17. В системі наявний також вхід зовнішньої синхронізації – 16, автономний блок живлення – 15.

Функціонування системи забезпечує блок управління 9. Основні режими та параметри роботи системи задаються програмно з персонального комп'ютера шляхом запису в блок 9 відповідної керуючої інформації. У залежності від вибору оператора система може функціонувати у двох режимах: асинхронному та синхронному. Асинхронний режим відповідає ситуації, коли проводяться експериментальні дослідження в області фізики та механіки руйнування конструкційних матеріалів методами АЕ, тоді моменти появи окремих імпульсів АЕ випадково розподілені у часі, внаслідок чого виникає задача виявлення сигналу на фоні завад. У цьому випадку запуск системи здійснюється сигналом з блоку дискримінації та відстежування сигналу АЕ 8, в якому відбувається порівняння амплітуди сигналу АЕ на виході основного підсилювача 4 з порогом U_n дискримінації, який встановлюють програмно за допомогою блока ЦАП 7, виходячи з умови перевищення ним рівня акустичних та електричних шумів. Момент перевищення сигналом порогового рівня приймається за момент появи імпульсу АЕ.

Синхронний режим роботи системи застосовується у випадках, коли для експериментальних досліджень використовується метод МАЕ, що виникає під час перемагнення феромагнетиків. Перемагнення здійснюється періодично в часі, а тому апріорі відомий інтервал часу, протягом якого можлива поява сигналу МАЕ.

Для розробки генератора сигналу перемагнення використано мікроконтролер MSP430F2619Т компанії Texas Instruments. Він містить 16-розрядний центральний процесор архітектури RISC, різноманітні периферійні модулі, зокрема два таймери А і В, два 12-розрядні цифроаналогові перетворювачі (ЦАП), використані для побудови генератора.

Основні технічні характеристики розробленої системи:

- ✓ коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача – 40 дБ;
- ✓ максимальний коефіцієнт підсилення основного підсилювача сигналу МАЕ – 100 дБ;
- ✓ зміна коефіцієнта підсилення основного підсилювача – здійснюється програмно з кроком 0,4 дБ;
- ✓ зміна порогу дискримінації підсиленого сигналу МАЕ – здійснюється програмно з кроком 10 мВ;
- ✓ смуга пропускання пасивного смугового фільтра каналу МАЕ – 10...500 кГц;
- ✓ об'єм однократної вибірки сигналу МАЕ – задається програмно з верхньою межею 64 кбайт;
- ✓ частота дискретизації сигналу МАЕ – задається програмно і може приймати значення 21-N МГц, де N = 0, 1, ..., 7;
- ✓ розрядність АЦП каналу МАЕ – 8;
- ✓ режими живлення – автономне джерело;
- ✓ частота сигналу генератора перемагнення – 0,5...100 Гц;
- ✓ амплітуда сигналу генератора перемагнення – 0...2×36 В;
- ✓ максимальний струм генератора перемагнення – 2 А;
- ✓ розрядність ЦАП генератора перемагнення – 12.

На рис. 10 показано загальний вигляд блоків апаратури для збудження, відбору, реєстрації та обробки сигналу магнетопружної акустичної емісії.

До її складу входять: магнетоакустична вимірювальна система МАЕ-1Л – 1 з автономним блоком живлення БЖ МАЕ-1Л – 2, попередній підсилювач – 3 з п'єзоелектричним перетворювачем – 4, накладний електромагнет – 5.

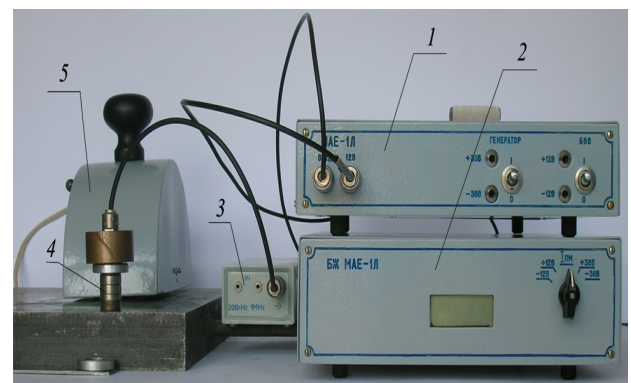


Рисунок 10 – Комплект апаратури для збудження, відбору, реєстрації та обробки сигналів МАЕ

Система МАЕ-1Л метрологічно атестована і пройшла випробування у виробничих умовах експлуатації об'єктів контролю.

ВИСНОВКИ

Матеріали об'єктів тривалого експлуатування зазнають суттєвого деградування, що приводить до відчутної зміни їх фізико-хімічних властивостей і магнетних зокрема. Тому сучасні методи технічного діагностування повинні базуватися на нових підходах до побудови їх методології.

З метою створення необхідного апаратурного забезпечення технічного діагностування методом магнетопружної акустичної емісії проведено розрахунок параметрів, розробку конструкції та виготовлення накладного електромагнета для збудження сигналу МАЕ в феромагнетних елементах конструкцій. Створено магнетоакустичну вимірвальну систему МАЕ-1Л, яка призначена для відбору та обробки інформації, представленої сигналами МАЕ. Система метрологічно атестована і пройшла випробування у виробничих умовах експлуатації об'єктів контролю.

1. Скальський В.Р. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації / В.Р. Скальський, П.М. Коваль. – Львів: Сполом, 2005. – 396 с. 2. Клим Б.П. Аспекти отбора сигнала акустической эмиссии / Б.П. Клим, Г.В. Микитин, Е.П.Почапский, О.П. Бухало // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2000. – №3. – С. 17–23. 3. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки : ДСТУ 4227–2003. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 26 с. 4. Об акустической эмиссии перемагничиваемых ферромагнетиков / В.В. Волков, В.Ф. Кумейшин, М.Ю. Черниковский и др. // *Дефектоскопия*. – 1986. – №4. – С. 21–28. 5. Вонсовский С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур– М.: Л.: ОГИЗ, 1948. – 530 с. 6. Ono K. *Magnetomechanical Acoustic Emission of Iron and Steels* / K. Ono, M. Shibata // *Mater. Evaluation*. – 1980. – 38. – P. 55–61. 7.

Shibata M. *Magnetomechanical Acoustic Emission – a New Method of Nondestructive Stress Measurement* / M. Shibata, K. Ono // *NDT International*. – 1981, October. – P. 227–234. 8. Горкунов Э.С. *Магнитоупругая акустическая эмиссия в монокристаллах кремнистого железа* / Э.С. Горкунов, О.А. Бартенев, В.А. Хамитов // *Изв. Вузов. Сер. Физика*. – 1986. – С. 62–66. 9. *Эффект Баркгаузена и магнитоакустическая эмиссия в сплавах FeAl, FeCo и FeSi* / В.Д. Болтачев, И.В. Головицкова, А.Е. Ермаков и др. // *Физ. мет. и металловед.* – 1992. – №12. – С. 59–67. 10. Nazarchuk Z.T., Skal's'kyi V.R., Klym V.P. and other *Influence of hydrogen on the changes in the power of Barkhausen jumps in ferromagnets* / Z.T. Nazarchuk, V.R. Skal's'kyi, V.P. Klym and other // *Materials Science*. – 2009. – 45.– №5. – P. 663 – 669. 11. Пат. №88249 Україна, МПК G01N29/14; G01N17/00. *Спосіб оцінки ступеня наводнення феромагнітних сплавів*. / В.Р. Скальський, З.Т. Назарчук, Б.П. Клим, Є.П. Почапський, В.Б. Михальчук – Опубл. 25.09.2009, Бюл. №18. 12. Пат. №92941 Україна, МПК G01N29/04. *Спосіб визначення місць локального деградування феромагнітних матеріалів*. / В.Р. Скальський, З.Т. Назарчук, Б.П. Клим, О.М. Сергієнко, Є.П.Почапський, В.Б.Михальчук – Опубл. 27.12.2010, Бюл. №24. 13. Расчет индукции создаваемого приставным электромагнитом постоянного магнитного поля в ферромагнетике / В.Р.Скальський, Б.П. Клим, Е.П. Почапский // *Дефектоскопия*. – 2010. – № 5. – С. 14–24. 14. *Источники электропитания РЭА*. / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов и др. – М.: Радио и связь, 1986. – 576 с. 15. Клим Б.П. *Інформаційно-обчислювальна система обробки сигналів магнетопружної акустичної емісії* / Б.П. Клим, Є.П. Почапський, В.Р. Скальський // *Техническая диагностика и неразрушающ. контроль*. – 2008. – №2. – С. 43 – 49.

Поступила в редакцію 10.03.2011 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, ст.н. співр. Муравський Л. І.