

## ПОЛЯ ТА СИГНАЛИ У НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

---

УДК 621.794

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБУДЖЕННЯ СИГНАЛІВ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В. Р. Скальський, Є. П. Почапський, Б. П. Клим, І. М. Коблан

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

E-mail: skal@ipm.lviv.ua, pochapskyu@ipm.lviv.ua, klym@ipm.lviv.ua

Для підвищення точності діагностування феромагнетних елементів конструкцій методом магнетопружної акустичної емісії запропоновано структури систем збудження сигналу, які забезпечують стабільність та рівність наперед заданому значенню амплітуди струму перемагнення чи індукції збуджувального магнетного поля. Проаналізовано функціонування систем та оцінено їх динамічні властивості.

**Ключові слова:** феромагнетний матеріал, магнетопружна акустична емісія (MAE), немагнетний прошарок, накладний електромагнет, система збудження сигналу MAE.

### IMPROVING EXCITATION EFFICIENCY OF MAGNETOELASTIC ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

V. R. Skalskyi, Ye. P. Pochapskyu, B. P. Klym, I. M. Koblan

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

To increase the accuracy of diagnosis of ferromagnetic structural elements with magnetoelastic acoustic emission method the structure of signal excitation is proposed, providing stability and equality to predetermine the value of current amplitude magnetization or induction exciting magnetic field. The structures are implemented in the form of system of automatic stabilization, the main elements of which are adjustable signal generator, measuring unit current amplitude or induction and circle of negative feedback. The analysis of the operation and the estimation of their dynamic properties are presented. Obtained results depend on the number of steps of iterative process of a target setting relative error value of current or induction for certain values of the parameters defined by the design features of stabilization system. The simulation results show that the proposed system provides good quality transients and in the steady state the target value is maintained at a given level without error.

**Keywords:** ferromagnetic material, magnetoelastic acoustic emission (MAE), nonmagnetic layer, U-core magnet, excitation system of MAE signal.

Для діагностування феромагнетних елементів конструкцій ефективний метод магнетопружної акустичної емісії (MAE) [1], яка виникає за перемагнення феромагнетного конструкційного матеріалу і пов'язана з ефектом Баркгаузена. Пружні імпульси, що супроводжують стрибкоподібні зміни намагнетченості, виходять на поверхню зі значних глибин металу, їх реєструють і обробляють вимірювальними засобами.

Реалізація методу MAE в реальних умовах експлуатації феромагнетних елементів обладнання передбачає перемагнення певного об'єму діагностованого об'єкта. При цьому важливе значення має локальність і глибина області перемагнення. Тому актуально розрахувати розподіл індукції магнетного поля створюваного накладного електромагнета (НЕМ) у феромагнетному матеріалі і, ґрунтуючись на цих розрахунках, вибрати конструкцію НЕМ, оптимізувати його за геометричними розмірами, параметрами обмотки та значенням споживаного струму [2, 3].

© В. Р. Скальський, Є. П. Почапський, Б. П. Клим, І. М. Коблан, 2016

Зокрема, за П-подібної його форми магнетне поле заданої індукції швидше локалізується і глибше проникає у матеріал. Це сприяє ефективнішому перемагнетненню заданого об'єму феромагнетика для збудження сигналу МАЕ – носія інформації про фізичний стан досліджуваного об'єкта. На збудження сигналу МАЕ впливає низка чинників [4–8], зумовлених як досліджуваним об'єктом, так і конструкцією і режимами системи збудження.

Для діагностування методом МАЕ, щоб підвищити точність вимірювань, дуже важливо забезпечити стабільність амплітуди перемагнетнувального поля (чи амплітуди струму перемагнетнення) і її незалежність, зокрема, від зміни розміру немагнетного прошарку (що спостерігається в практиці діагностування реальних об'єктів).

Отже, мета досліджень – розроблення структури системи збудження сигналу МАЕ, яка б гарантувала стабільність і рівність наперед заданому значенню амплітуди струму перемагнетнення чи індукції збуджувального магнетного поля.

Для аналізу та виявлення чинників впливу побудували схему (рис. 1) збудження сигналів, що складається з блока формування сигналу перемагнетнення 1, накладного електромагнета, який містить П-подібний магнетопровід 2 і збуджувальну котушку 3, досліджуваного зразка 4, немагнетного прошарку між магнетопроводом та зразком 5, вимірювальних котушки 6 та резистора 7.

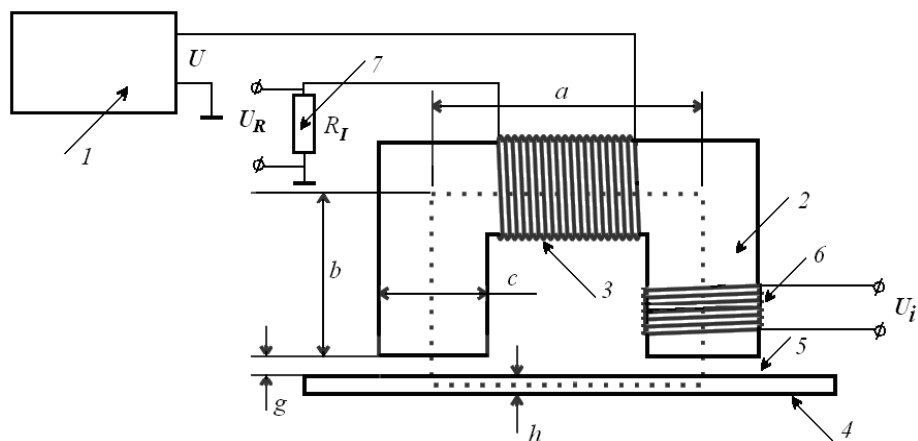


Рис. 1. Схема збудження сигналів МАЕ.

Другий закон Кірхгофа для магнетного кола, утвореного магнетопроводом, немагнетним прошарком та досліджуваним зразком, запишемо так:

$$F_m = \sum_i U_i^m. \quad (1)$$

Тут магнеторушійна сила

$$F_m = NI, \quad (2)$$

де  $N$  та  $I$  – відповідно кількість витків та струм в обмотці НЕМ.

Магнетна напруга

$$U_i^m = H_i l_i, \quad (3)$$

де  $H_i$  та  $l_i$  – напруженість магнетного поля та довжина  $i$ -ої ділянки магнетного кола. Беручи до уваги, що напруженість поля

$$H_i = \frac{B_i}{\mu_i \mu_0}, \quad (4)$$

де  $B_i$  – індукція магнетного поля;  $\mu_i$  – відносна магнетна проникність феромагнетного матеріалу;  $\mu_0$  – магнетна стала, а магнетний опір  $i$ -ої ділянки кола

$$R_i^m = \frac{l_i}{\mu_i \mu_0 A_i}, \quad (5)$$

де  $A_i$  – площа поперечного перерізу ділянки кола, для магнетної напруги одержуємо:

$$U_i^m = \Phi R_i^m. \quad (6)$$

Тут  $\Phi$  – магнетний потік у колі. Використовуючи вирази (1), (2) і (6), отримаємо співвідношення

$$\Phi = \frac{NI}{\sum_i R_i^m}. \quad (7)$$

Тобто потік обернено пропорційний до магнетного опору кола

$$R^m = R_c^m + R_g^m + R_s^m, \quad (8)$$

де магнетний опір магнетопроводу

$$R_c^m = \frac{l_c}{A_c \mu_0 \mu_c}, \quad (9)$$

прошарку

$$R_g^m = \frac{l_g}{A_g \mu_0} \quad (10)$$

і зразка

$$R_s^m = \frac{l_s}{A_s \mu_0 \mu_s}. \quad (11)$$

Тут  $\mu_c$ ,  $\mu_s$  – відносна магнетна проникність матеріалу магнетопроводу та зразка;  $A_c$ ,  $A_g$ ,  $A_s$  – поперечний переріз магнетопроводу, прошарку та зразка відповідно, а  $l_c = a + 2b$ ,  $l_g = 2g$ ,  $l_s$  – довжини відповідних ділянок магнетного кола (рис. 1).

Числовими методами одержали (рис. 2) залежність індукції магнетного поля П-подібного НЕМ від ширини немагнетного прошарку. Виявили зменшення індукції поля зі збільшенням ширини прошарку, а отже, згідно з виразом (10) зростання магнетного опору магнетного кола.

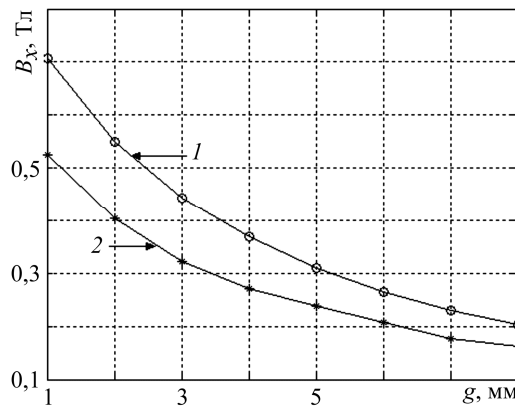


Рис. 2. Залежність індукції магнетного поля П-подібного НЕМ у зразку від ширини прошарку: 1 – на глибині 1 мм; 2 – 4 мм.

Для миттєвих струму  $I$  та напруги  $U$  у колі збудження схеми на рис. 1 можна записати:

$$U = L \frac{dI}{dt} + (R_c + R_I)I, \quad (12)$$

де  $L$  – індуктивність у колі;  $R_c$  – активний опір котушки збудження;  $R_I$  – еталонний опір, який використовують для вимірювання струму.

Амплітудні значення струму перемагнення  $I^0$  та напруги  $U^0$  пов'язані співвідношенням

$$I^0 = U^0 / Z = U^0 / \sqrt{(R_c + R_I)^2 + \omega^2 L^2}, \quad (13)$$

де  $Z$  – повний опір кола;  $\omega$  – циклічна частота струму.

На рис. 3 подано структурну схему системи автоматичної стабілізації амплітуди струму перемагнення, яка складається з генератора сигналу перемагнення 1, підсилювача сигналу перемагнення 2 з коефіцієнтом підсилення за напругою  $k_0$ , накладного електромагнета 3, еталонного опору 4, формувача керуючого сигналу 5, вимірювача амплітуди струму перемагнення 6, блока задання амплітуди струму перемагнення 7 та блока вимірювання різниці 8.

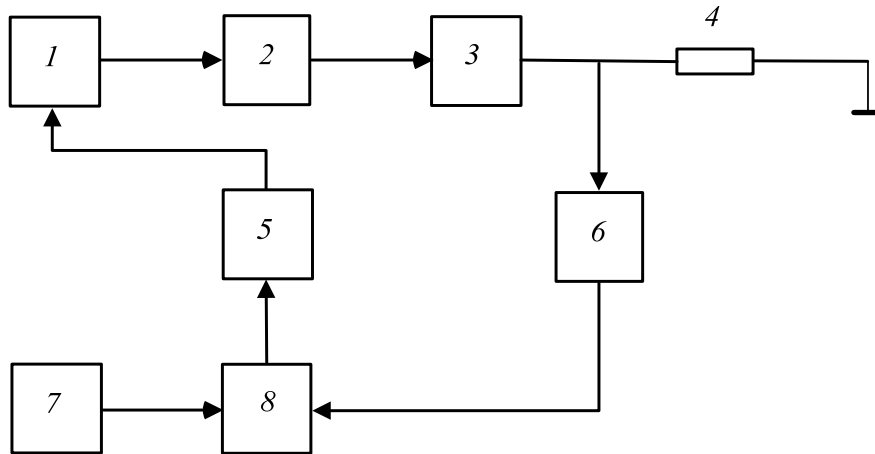


Рис. 3. Структурна схема системи автоматичної стабілізації амплітуди струму перемагнення.

Для досягнення цільового значення амплітуди струму перемагнення  $I_t^0$ , яке задають програмно в блоці 7, застосовують ітеративний підхід. За  $n$ -й період перемагнення в блоці 6 з допомогою еталонного опору 4 відбувається вимірювання амплітуди струму  $I_n^0$ . В блоках 8 та 5 обчислюється різниця  $(I_t^0 - I_n^0)$  та формується керуючий сигнал  $(I_t^0 - I_n^0)k$  для генератора перемагнечувального сигналу 1. Тут константа  $k$  визначає швидкість досягнення системою цільового значення струму. На  $n$ -му кроці ітеративного процесу на виході підсилювача 2

$$U_n^0 = U_{n-1}^0 + (I_t^0 - I_{n-1}^0)kk_0. \quad (14)$$

Оскільки  $I_{n-1}^0 = U_{n-1}^0 / Z$ , то

$$U_n^0 = I_t^0 kk_0 + U_{n-1}^0 \left( 1 - \frac{kk_0}{Z} \right). \quad (15)$$

Звідси одержуємо суму  $n$  членів геометричної прогресії зі знаменником  $q = \left( 1 - \frac{kk_0}{Z} \right)$

$$U_n^0 = I_t^0 k k_0 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{k k_0}{Z} \right) + \dots + \left( 1 - \frac{k k_0}{Z} \right)^{n-1} \right], \quad (16)$$

або після підсумування

$$U_n^0 = I_t^0 Z \left[ 1 - \left( 1 - \frac{k k_0}{Z} \right)^n \right]. \quad (17)$$

Якщо  $n \rightarrow \infty$  та  $0 < \left( 1 - \frac{k k_0}{Z} \right) < 1$ , то остаточно  $U^0 = I_t^0 Z$ , тобто система забезпечує цільовий струм перемагнення.

Дослідимо динамічні властивості системи стабілізації струму перемагнення. Нехай  $\Delta_t$  – допустима абсолютна похибка встановлення заданої амплітуди струму перемагнення, тоді відносна похибка

$$\delta = \Delta_t / I_t^0. \quad (18)$$

Припустимо, що після  $n$  кроків відносна похибка встановлення системою напруги

$$\frac{(U_t^0 - U_n^0)}{U_t^0} \leq \delta, \quad (19)$$

або

$$\left( 1 - \frac{k k_0}{Z} \right)^n \leq \delta. \quad (20)$$

Прологарифмувавши вираз (20), для кількості циклів, за які досягається задана відносна похибка встановлення амплітуди струму перемагнення, одержимо:

$$n \geq \frac{\lg(\delta)}{\lg\left(1 - \frac{k k_0}{Z}\right)}. \quad (21)$$

Побудували (рис. 4) залежності кількості циклів від відносної похибки встановлення заданого струму перемагнення за деяких значень параметра  $\xi = k k_0 / Z$ , який визначають особливості конструкції системи стабілізації.

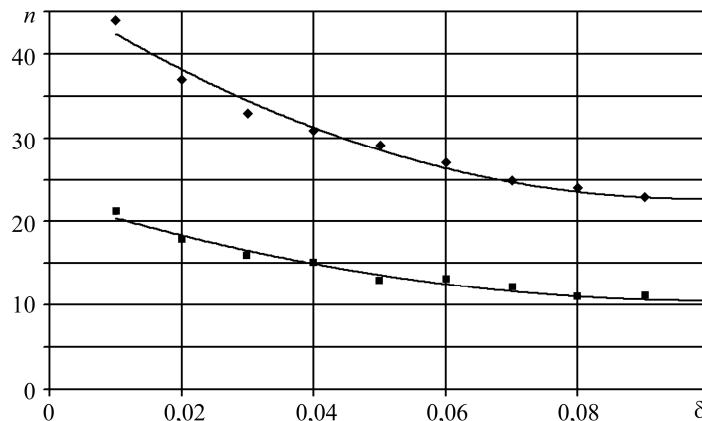


Рис. 4. Залежність кількості циклів від відносної похибки встановлення заданого струму перемагнення: 1 –  $\xi = 0,1$ ; 2 –  $0,2$ .

Структурна схема системи автоматичної стабілізації амплітуди індукції перемагнечувального поля (рис. 5) складається з генератора сигналу перемагнечення 1, підсилювача сигналу перемагнечення 2 з коефіцієнтом підсилення за напругою  $k_0$ , накладного електромагнета 3, вимірювальної котушки 4, формувача керуючого сигналу 5, блока задання амплітуди індукції перемагнечувального поля 6, блока вимірювання різниці 7 та вимірювача амплітуди індукції перемагнечувального поля 8.

Цільове значення амплітуди індукції  $B_t^0$  перемагнечувального поля задається програмно в блоці 6. За  $n$ -й період перемагнечення в блоці 8 з допомогою котушки 4 вимірюється амплітуда індукції перемагнечувального поля  $B_n^0 = \Phi_n^0 / A$ . Тут  $\Phi_n^0$  – амплітуда магнетного потоку в досліджуваному зразку чи магнетопроводі накладного електромагнета 2 (рис. 2) (вимірюють за допомогою котушки 6),  $A$  – їх поперечний переріз. У блоках 7 та 5 обчислюється різниця  $(B_t^0 A - \Phi_n^0)$  та формується керуючий сигнал  $(B_t^0 A - \Phi_n^0)k$  для генератора перемагнечувального сигналу 1.

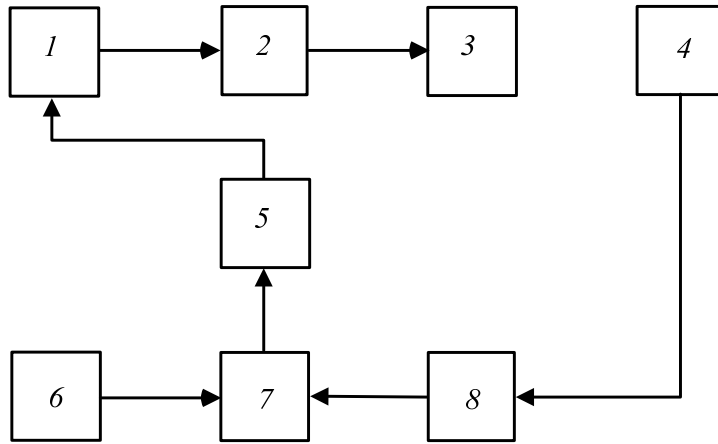


Рис. 5. Структурна схема системи автоматичної стабілізації амплітуди індукції перемагнечувального поля.

Тут константа  $k$  визначає швидкість досягнення системою цільового значення індукції. На  $n$ -му кроці ітеративного процесу напруга на виході підсилювача 2

$$U_n^0 = U_{n-1}^0 + (B_t^0 A - \Phi_{n-1}^0)kk_0, \quad (22)$$

або з урахуванням виразу (7)

$$U_n^0 = U_{n-1}^0 + \left( B_t^0 A - \frac{NI_{n-1}^0}{\sum_i R_i^m} \right) kk_0. \quad (23)$$

Оскільки  $I_{n-1}^0 = U_{n-1}^0 / Z$ , то

$$U_n^0 = U_{n-1}^0 + \left( B_t^0 A - \frac{NU_{n-1}^0}{Z \sum_i R_i^m} \right) kk_0, \quad (24)$$

а після перетворень

$$U_n^0 = B_t^0 A k k_0 + (1-g)U_{n-1}^0, \quad (25)$$

де  $g = N k k_0 / (Z \sum_i R_i^m)$ .

Останній вираз можна подати як суму  $n$  членів геометричної прогресії зі знаменником  $(1-g)$

$$U_n^0 = B_t^0 A k k_0 [1 + (1-g) + \dots + (1-g)^{n-1}], \quad (26)$$

або в згорнутому вигляді

$$U_n^0 = \frac{B_t^0 A Z \sum_i R_i^m}{N} [1 - (1-g)^n]. \quad (27)$$

Якщо  $n \rightarrow \infty$  за умови  $0 < (1-g) < 1$ , то остаточно одержуємо  $U_n^0 = B_t^0 [AZ \sum_i R_i^m / N]$ , тобто система забезпечує цільове значення амплітуди індукції поля перемагнення.

Для кількості циклів, за які досягається задана відносна похибка встановлення амплітуди індукції поля перемагнення, згідно з умовою (21) одержимо:

$$n \geq \lg(\delta) / \lg(1-g), \quad (28)$$

тобто залежності на рис. 4 також описуватимуть динаміку встановлення цільового значення амплітуди індукції за деяких значень параметра  $g = N / (Z \sum_i R_i^m)$ , який визначають особливості конструкції системи стабілізації, наведеної на рис. 5.

## ВИСНОВКИ

Запропоновано структури систем збудження сигналу МАЕ, які забезпечують стабільність та рівність наперед заданому значенню амплітуди струму перемагнення чи індукції збуджувального магнетного поля. Проаналізовано їх функціонування та оцінено динамічні властивості.

1. Ono K., Shibata M. Magnetomechanical Acoustic Emission of Iron and Steels // Mater. Evaluation. – 1980. – **38**. – P. 55–61.
2. Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Почапський Є. П. Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів. – К.: Наук. думка, 2014. – 304 с.
3. Клим Б. П., Почапський Є. П., Скальський В. Р. Інформаційно-обчислювальна система обробки сигналів магнітопружної акустичної емісії // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 2008. – № 2. – С. 43–49.
4. Ng D. H. L., Lo C. C. H. The effects of demagnetizing and stray fields on magnetoacoustic emission // J. Appl. Phys. – 1994. – **75**. – P. 709–711.
5. Ng D. H. L., Lo C. C. H., Cheng C. The dependence of magnetoacoustic emission on magnetic induction and specimen thickness // IEEE transactions on magnetics. – 1994. – **30**, № 6. – P. 4857–4859.
6. White S., Krause T., Clapham L. Control of flux in magnetic circuits for Barkhausen noise measurements // Measurement Scie. and Tech. – 2007. – **18**. – P. 3501–3510.
7. Augustyniak B., Piotrowski L., Chmielewski M. Impact of frequency and sample geometry on magnetoacoustic emission voltage properties for two steel grades // J. Electrical Eng. – 2008. – **59**, № 7/s. – P. 33–36.
8. Optimization of sensor design for Barkhausen noise measurement using finite element analysis / N. Gaunkar, O. Kypris, I. C. Nlebedim, and D. C. Jiles // J. Appl. Phys. – 2014. – **115**. – P. 17E512.

Одержано 19.05.2016