

## АНАЛІЗ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Є. П. Почапський, Б. П. Клим, І. М. Коблан

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

E-mail: pochapskyu@ipm.lviv.ua; klym@ipm.lviv.ua; ihor.koblan@gmail.com

Запропонована та обґрунтована математична модель сигналу магнетопружної акустичної емісії (MAE) у вигляді випадкового імпульсного потоку. Виділено імпульсні та часові характеристики сигналу MAE. За результатами випробувань пластинчастих феромагнетних зразків зі сталі методом MAE оцінено деякі параметри її сигналу. В результаті отримано та апроксимовано залежності суми амплітуд та підсумкового рахунку сигналу від заданого порога за різних навантажень. Побудовано залежність коефіцієнта загасання апроксимувальної експоненти від прикладеного до зразка навантаження, яку запропоновано використовувати як градувальну під час діагностування залишкових напружень у феромагнетних об'єктах.

**Ключові слова:** магнетопружна акустична емісія, математична модель, інформативні параметри, феромагнетні матеріали.

## ANALYSIS OF INFORMATIVE PARAMETERS OF THE MAGNETOELASTIC ACOUSTIC EMISSION SIGNAL

Y. P. Pochapskyu, B. P. Klym, I. M. Koblan

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

The mathematical model of the magnetoelastic acoustic emission (MAE) signal in the form of a random pulse flow is proposed and substantiated. The pulse and time characteristics of the MAE signal are highlighted. Using the results of the experiment by the MAE method of plate ferromagnetic steel samples an estimation of a number of parameters of the MAE signal is made. As a result, the dependences of the sum of the amplitudes and the final account of the signal from the set threshold for different loads are obtained. The dependence of the final account on the set threshold for the various values of the exponent attached to the sample is approximated. The dependence of the attenuation coefficient of the approximating exponent on the magnitude of the applied to the load sample, which is proposed to be used as a calibration in diagnosing residual stresses in ferromagnetic objects, is constructed.

**Keywords:** magnetoelastic acoustic emission (MAE), mathematical model, informative parameters, ferromagnetic materials.

Феромагнетні матеріали об'єктів тривалого експлуатування зазнають суттєвого деградування, що призводить до відчутної зміни їх фізико-хімічних і магнетних властивостей. Тому сучасні методи технічного діагностування повинні базуватися на нових підходах до створення методології виявлення цих змін. Тут перспективний метод магнетопружної акустичної емісії (MAE), що виникає за перемагнетчення феромагнетного конструкційного матеріалу і пов'язана з ефектом Баркгаузена [1, 2]. Проте він недостатньо теоретично та методично обґрунтований [2, 3]. Через це актуально знайти нові додаткові інформативні параметри сигналу, що дасть змогу підвищити ефективність діагностування цим методом.

Аналіз механізму генерування сигналу MAE дає змогу виокремити характерні його ознаки: випадковість появи у часі окремих подій (випадковий потік імпульсів); обмеженість у часі; слабкість за енергією та потужністю; випадковість амплітуди [3, 4]. Ці чинники дають підставу розглядати сигнал у межах моделі випадкового імпульсного потоку.

У цьому випадку сигнал можна зобразити суперпозицією імпульсів, форму яких описує детермінована функція  $F(t)$ , нормована на одиницю в максимумі,

© Є. П. Почапський, Б. П. Клим, І. М. Коблан, 2017

причому імпульси можуть відрізнятися за амплітудою. Відповідний імпульсний потік запишемо у вигляді

$$X(t) = \sum_{k,i} A_{ki} F(t - t_{ki}), \quad (1)$$

де  $T$  – період перемагнечування;  $k = 1, 2, \dots$  – номер періоду;  $t_{ki}$  – випадковий момент появи  $i$ -го імпульсу в  $k$ -му періоді  $i = 0, 1, 2, \dots$ ;  $A_{ki}$  – його випадкова амплітуда;  $t_{ki}$  називають моментом появи умовно, припускаючи, що не обов'язково  $F(t - t_{ki}) = 0$ , якщо  $t < t_{ki}$ .

Функція  $F(t)$  може не володіти початковим значенням  $t_{ki}$ , до якого вона дорівнює нулю. Передбачаємо лише, що вона досить швидко прямує до нуля, якщо  $|t| \rightarrow \infty$ , тому  $\int_{-\infty}^{\infty} |F(t - t_{ki})| dt < \infty$ . Моменти часу  $t_{ki}$  можна пов'язати з будь-якою характерною точкою – з будь-яким із екстремумів  $F(t)$  або з будь-якою із точок переходу через нуль, якщо такі є [3].

Загальніше трактування випадкового імпульсного потоку полягає у тому, що випадковими передбачають, окрім амплітуди, також форму самих імпульсів, які залежать від сукупності деякої скінченної кількості  $m$  випадкових параметрів, тобто від  $m$ -вимірної випадкової величини  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$ :

$$X(t) = \sum_{k,i} A_{ki}(\mu) F(t - t_{ki}, \mu). \quad (2)$$

Зокрема, сигнал МАЕ залежить від параметрів перемагнечувального поля (значення амплітуди напруженості, частоти та форми сигналу) і чутливий до структурних змін феромагнетного матеріалу, режиму термообробки, пластичної деформації, залишкових напружень, наводнювання тощо. Здеградований матеріал міняє свою доменну структуру, через що змінюються параметри МАЕ [5, 6]. Експериментально виявлено, що відчутніше змінює потужність МАЕ пластичне деформування матеріалу, а дещо менше – водень, вплив якого, в свою чергу, залежить від концентрації у феромагнетіку [7, 8].

Грунтуючись на моделі (1), можна виділити імпульсні характеристики сигналу магнетопружної емісії: густину ймовірностей розподілу амплітуд імпульсів  $p(A)$ , суму амплітуд імпульсів за  $k$ -й період перемагнечення  $\sum_i A_{ki}$ , оригінальну сигнал МАЕ, згенерованого за період перемагнечення, а також вектор параметрів форми імпульсів  $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k\}$ . До часових характеристик відносять інтенсивність потоку імпульсів  $n(t)$ , густину ймовірностей розподілу  $q(\vartheta)$  інтервалів  $\vartheta_i = t_{i+1} - t_i$  між суміжними імпульсами потоку, підсумковий рахунок імпульсів за  $k$ -й період перемагнечення  $N_k = \sum_i H(t - t_{ki})$ , де  $H(\cdot)$  – функція Гевісайда.

До інформативної компоненти сигналу МАЕ додаються імпульсні та неперервні завади, тому модель (1) слід подати у вигляді

$$X(t) = \sum_{k,i} A_{ki} F(t - t_{ki}) + \sum_j B_j G_j(t - t_j) + S(t) + \gamma(t). \quad (3)$$

Тут  $B_j$  – амплітуда;  $G_j(t - t_j)$  – функція форми імпульсної завади, породженої роботою механізмів, електричними імпульсами в електромережі, електромагнетними імпульсами тощо;  $S(t) = S_0 \sin \omega t$  – неперервна гармонічна завада, яка виникає внаслідок впливу частоти промислової електромережі ( $S_0$  – її амплітуда;  $\omega$  – частота);  $\gamma(t)$  – стаціонарна неперервна випадкова завада, що породжена впливом радіочас-

тотних завад і шумами каналу передачі та яку можна описати в межах кореляційної теорії з математичним сподіванням  $\bar{\gamma}$ , дисперсією  $D_\gamma$ , густиною одновимірного розподілу  $f(\gamma)$  і нормованою автокореляційною функцією  $r_\gamma(\tau)$  ( $\tau$  – часовий зсув).

Завади також можуть суттєво спотворювати результати оцінювання інформативних характеристик сигналу. Тому, щоб отримати достовірну інформацію для коректного технічного діагностування, необхідно їх фільтрувати. Оскільки, сигнали МАЕ багато параметрові, то важливо для діагностування розробити алгоритми статистичного оцінювання їх параметрів з подальшим встановленням кореляційних зв'язків між ними та величинами, які характеризують стан досліджуваного феромагнетного об'єкта [9]. Експериментально методом МАЕ досліджували пластинчасті феромагнетні зразки зі сталі 19Г, які піддавали розтягу. На рис. 1 наведено одну з зареєстрованих при цьому реалізацій сигналу МАЕ.

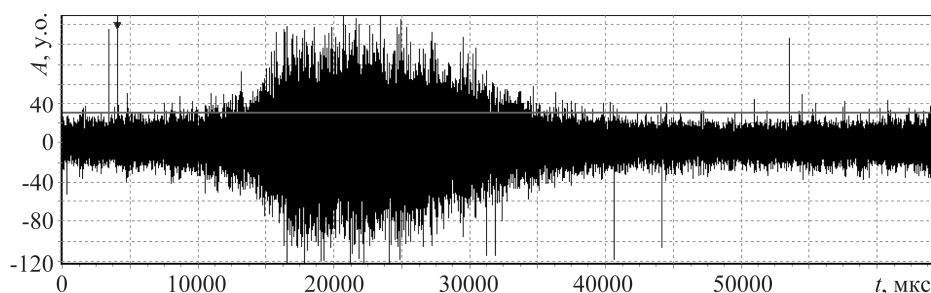


Рис. 1. Реалізація сигналу МАЕ, зареєстрована під час перемагнетнення пластинчастого феромагнетного зразка: частота перемагнетнення 9 Гц, амплітуда індукції магнетного поля 0,8 Тл.

На рис. 2 подано, відповідно, залежність кількості імпульсів сигналу  $N$  та суми їх амплітуд  $\sum_i A_i$  від заданого порога за різних навантажень.

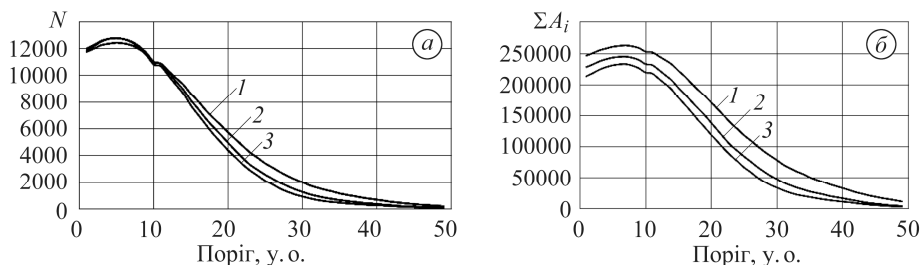


Рис. 2. Залежність кількості імпульсів сигналу МАЕ  $N$  (а) та суми їх амплітуд  $\sum_i A_i$  (б) від заданого порога за різних навантажень: 1 – 0 МПа; 2 – 125; 3 – 275 МПа.

Апроксимовано криві залежностей кількості імпульсів сигналу від заданого порога експонентою  $y(x) = A_0 \exp(-\alpha x)$  за різних навантажень (рис. 3) в інтервалі значень порога від 15 до 42 у.о. Нижню межу визначає середнє значення шумової складової сигналу.

У результаті для різних значень навантаження для коефіцієнта загасання експоненти одержали, відповідно:  $\alpha_1 = 0,151$ ;  $\alpha_2 = 0,142$ ;  $\alpha_3 = 0,113$  за високих значень коефіцієнта детермінації  $R^2$ .

На рис. 4 побудовано залежність коефіцієнта загасання апроксимувальної експоненти від прикладеного навантаження, яку можна використати як градувальну криву під час діагностування залишкових напружень у феромагнетних об'єктах тривалої експлуатації. Вона стійкіша до низки експериментальних чинників, які впливають на амплітудні характеристики сигналу (коефіцієнта підси-

лення сигналу МАЕ, якості контакту перетворювача акустичної емісії з поверхнею об'єкта, діаграми напрямленості перетворювача), ніж аналогічна суми амплітуд сигналу від прикладеного навантаження.

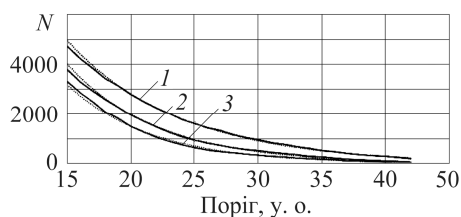


Рис. 3.

Рис. 3. Результати апроксимації залежностей кількості імпульсів сигналу  $N$  від заданого порога (штрихові криві): 1 – 0 МПа; 2 – 125; 3 – 275 МПа.

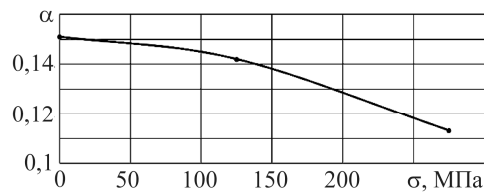


Рис. 4.

Рис. 4. Залежність коефіцієнта загасання  $\alpha$  від прикладеного навантаження  $\sigma$ .

### ВИСНОВКИ

Запропонована та обґрунтована математична модель сигналу МАЕ у вигляді випадкового імпульсного потоку. Виділено імпульсні та часові характеристики сигналу. За результатами досліджень методом МАЕ пластинчастих феромагнетних зразків зі сталі оцінено низку параметрів емісійного сигналу. Отримано та апроксимовано залежності суми амплітуд та підсумкового рахунку сигналу від заданого порога за різних навантажень; побудовано залежність коефіцієнта загасання апроксимувальної експоненти від прикладеного навантаження, яку запропоновано використовувати як градуовальну під час діагностування залишкових напружень у феромагнетних об'єктах.

1. Ono K., Shibata M. Magnetomechanical Acoustic Emission – a New Method of Nondestructive Stress Measurement // NDT Internal. – 1981. – P. 227–234.
2. Клим Б. П., Почапський Є. П., Скальський В. Р. Інформаційно-обчислювальна система обробки сигналів магнетопружної акустичної емісії // Техн. діагностика и неразр. контроль. – 2008. – № 2. – С. 43–49.
3. Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Почапський Є. П. Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів. – К.: Наук. думка, 2014. – 304 с.
4. Розроблення концепції побудови системи діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами магнетопружної акустичної емісії / В. Р. Скальський, Є. П. Почапський, Б. П. Клим, Я. Д. Толопоко, Н. П. Мельник, М. О. Рудак, І. М. Коблан // Матеріали доп. 8-ої Нац. наук.-техн. конф. з неруйнівного контролю та техн. діагностики. – Київ, 22–24 листопада 2016. – С. 249–254.
5. Мельник Н. П., Коблан І. М. Особливості огинаючої сигналів магнетопружної акустичної емісії у феромагнетних матеріалах // Мат. 13-го Міжнар. симп. укр. інж.-механіків у Львові. – Львів, 18–19 травня 2017. – С. 45–46.
6. Мельник Н. П., Коблан І. М. Вплив полів розмагнетчення на механізми генерування магнетопружної акустичної емісії у феромагнетних матеріалах // Пр. V Міжнар. наук.-техн. конф. “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”. – Тернопіль, 19–22 вересня 2017. – С. 94–97.
7. Application of magnetoacoustic emission for detection of hydrogen electrolytically absorbed by steel / Z. Nazarchuk., V. Skalsky, Ye. Pochapskyu, S. Hirnyj // Proc. 19<sup>th</sup> Europ. Conf. on Fracture “Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety”. – Kazan, Russia, 26–31 August 2012. – ID 405. – 8 p.
8. Магнетоакустичний метод контролю вмісту водню в феромагнетиках / В. Р. Скальський, Є. П. Почапський, Б. П. Клим, О. Г. Сімакович // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – Спец. вип. № 10., т. 2. – С. 505–509.
9. Коблан І. М. Оцінювання інформативних параметрів сигналу магнетопружної акустичної емісії // Тези доп. XXV відкритої наук.-техн. конф. молодих науковців і спеціалістів Фіз.-мех. ін-ту ім. Г. В. Карпенка НАН України. – Львів, 27–29 вересня 2017. – С. 206–209.

Одержано 28.09.2017