

# РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ, МЕТОДИКИ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН ТА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО ЕФЕКТУ\*

**В.П. Бабак<sup>1</sup>, Ю.В. Куц<sup>1</sup>, І.В. Богачев<sup>1</sup>, В.В. Хайдуров<sup>1</sup>, В.М. Зварич<sup>2</sup>, М.В. Мислович<sup>2</sup>, Л.М. Щербак<sup>2</sup>,  
Ю.І. Гижко<sup>2</sup>, М.С.Гуторова<sup>2</sup>, Л.Б. Остапчук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України. 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2-а. E-mail: [admin@itf.kiev.ua](mailto:admin@itf.kiev.ua)

<sup>2</sup>Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56. E-mail: [ied1@ied.org.ua](mailto:ied1@ied.org.ua)

Розроблено та апробовано метод і математичні моделі прямих та обернених задач ультразвукового контролю та діагностики складних металевих конструкцій на наявність дефектів. Виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок системи магнітострикційного контролю елементів досліджуваних об'єктів. Проведено математичне моделювання процесів ультразвукового контролю з використанням програмного середовища MATLAB та COMSOL Multiphysics. Адекватність математичних моделей підтверджена результатами їх порівняння з реальними фізичними експериментами. Бібліогр. 7, табл. 4, рис. 17.

*Ключові слова: будівельні металеві конструкції, ультразвуковий контроль, малоапертурні перетворювачі, прямі та обернені задачі ультразвукового контролю*

Технічний стан більшості будівельних та металевих конструкцій досяг критичної межі, що підвищує ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій. Темпи відновлення таких конструкцій є надзвичайно низькими внаслідок економічної ситуації в країні. Тому першочерговим завданням є забезпечення надійної експлуатації існуючого фонду споруд і конструкцій.

Особливої актуальності набувають питання управління експлуатаційною надійністю та довговічністю відповідних об'єктів шляхом визначення їх технічного стану і залишкового ресурсу. Для отримання достовірної інформації про фактичний стан різних вузлів будівельних машин і конструкцій застосовуються різні методи неруйнівного контролю і діагностики. Найбільшого поширення набули методи ультразвукової дефектоскопії.

Методам, що базуються на застосуванні ультразвукових хвиль у комплексі з п'єзоелектричними перетворювачами, притаманні певні обмеження та незручності при їх практичному застосуванні. Це пов'язано з необхідністю попередньої підготовки поверхонь досліджуваних вузлів перед розташуванням на них п'єзоелектричних перетворювачів. Також на точність діагностичних

вимірювань суттєво впливає геометрична форма досліджуваних об'єктів.

Переважну більшість вказаних недоліків вдається усунути завдяки застосуванню методів, що базуються на магнітострикційному ефекті. Використання малоапертурних магнітострикційних перетворювачів (МСП) надає можливість проводити діагностичні обстеження об'єктів складної форми, які можуть нагріватись до високих температур. Розробка методів з використанням малоапертурних МСП дозволяє проводити діагностику цих об'єктів в умовах будівельних майданчиків та підвищити точність та вірогідність виявлення можливих дефектів.

Метою роботи була розробка системи контролю стану металевих будівельних конструкцій, що базується на використанні малоапертурних МСП. Розробка інформаційно-вимірювальної системи починається з побудови та дослідження математичних моделей об'єктів та процесів [1–6]. На основі результатів дослідження побудованих математичних моделей сформульовані основні вимоги до геометричних розмірів малоапертурних МСП. Було розроблено декілька різних моделей та проведено обчислювальні експерименти.

\*За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

В.П. Бабак – <http://orcid.org/0000-0002-9066-4307>, Ю.В. Куц – <http://orcid.org/0000-0002-8493-9474>,

І.В. Богачев – <http://orcid.org/0000-0001-7781-5767>, В.В. Хайдуров – <http://orcid.org/0000-0002-4805-8880>,

В.М. Зварич – <http://orcid.org/0000-0002-1271-4954>, М.В. Мислович – <http://orcid.org/0000-0002-6245-7917>,

Л.М. Щербак – <http://orcid.org/0000-0002-1536-4806>, Ю.І. Гижко – <http://orcid.org/0000-0002-5702-4738>,

М.С.Гуторова – <http://orcid.org/0000-0003-4259-7530>, Л.Б. Остапчук – <http://orcid.org/0000-0002-5565-0313>

© В.П. Бабак, Ю.В. Куц, І.В. Богачев, В.В. Хайдуров, В.М. Зварич, М.В. Мислович, Л.М. Щербак, Ю.І. Гижко, М.С.Гуторова, Л.Б. Остапчук, 2020

Для вирішення проблеми визначення впливу дефектів на формування вихідного сигналу розроблена математична модель прямої задачі виявлення дефектів у тілах складної геометричної форми на основі класичного хвильового рівняння в області  $G \subset \mathbb{R}^n$  [7]:

$$\frac{\partial^2 U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial t^2} = v^2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i^2} + \gamma \sum_{i=1}^n \frac{\partial U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i} + f(\bar{\mathbf{x}}, t), \quad (1)$$

причому

$$t \in [0, T_{fin}]; x_i \in [a_i, b_i]; a_i \in \mathbb{R}; b_i \in \mathbb{R};$$

$$G = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_n, b_n]; i = \overline{1, n}.$$

де  $x_i$  – просторова координата під номером  $i$ ;  $\bar{\mathbf{x}}$  – вектор просторових координат;  $t$  – час;  $U$  – шуканий розв’язок моделі;  $v$  – швидкість поширення звуку в середовищі;  $T_{fin}$  – кінцевий час досліджень;  $\gamma$  – коефіцієнт затухання хвилі у конкретному середовищі.

Початкові умови мають вигляд:  $U(\bar{\mathbf{x}}, 0) = g_1(\bar{\mathbf{x}})$ ,  $U_t(\bar{\mathbf{x}}, 0) = g_2(\bar{\mathbf{x}})$ . Граничні умови задаються в за-

лежності від постановки задачі (що відповідає конкретному фізичному процесу).

В обчислювальних експериментах було змодельоване проходження сигналу через дефект, що дало змогу відповісти на одне з основних запитань дослідження – вплив ступеню дефекту на проходження сигналу через нього. У такому випадку визначаються амплітуда та частота отриманого сигналу.

Контурні графіки (лінії рівня), які зображені на рис. 1, показують, що при проходженні ультразвукового сигналу через завади, такі, як тріщини, утворюються розриви. Основні фрагменти розриву у прийнятому сигналі показані на рис. 2.

Слід зазначити, що прояви дефектів найпомітніші у випадку їх положення, яке перпендикулярне до лінії, що з’єднує джерело (збудник коливань) та приймач. Згідно з результатами математичного моделювання видно, що відбувається суттєва зміна амплітуди прийнятого сигналу (рис. 3).

Для визначення впливу розмірів тріщини на природу прийнятого сигналу при проходженні через неї проведено низку обчислювальних експериментів. Визначено вплив довжини дефекту (типу тріщини) на амплітуду й частоту прийнятого сигналу, що пройшов через цей дефект (рис. 4).

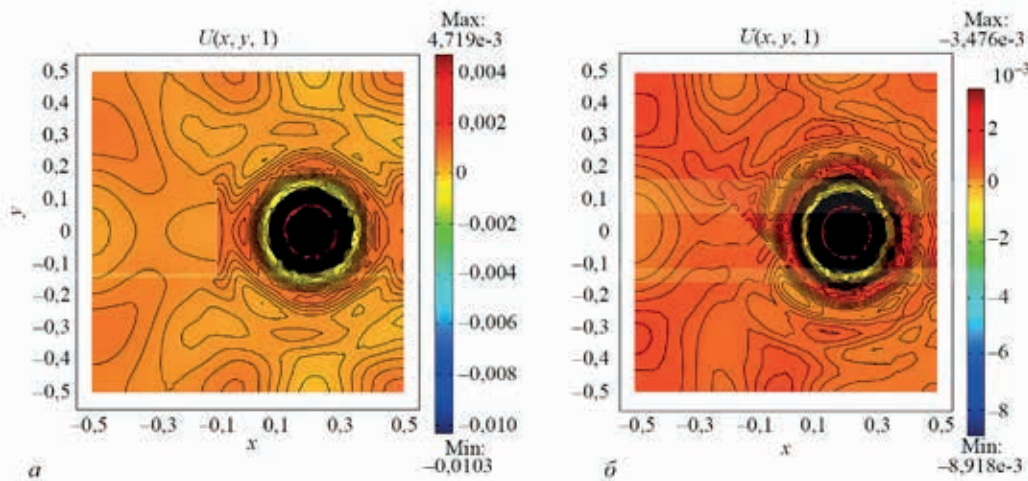


Рис. 1. Визначення хвильового поля на поверхні тіл з дефектами у вигляді тріщин: *a* – дефект має вертикальне положення; *b* – дефект знаходиться під кутом 45° до горизонталі

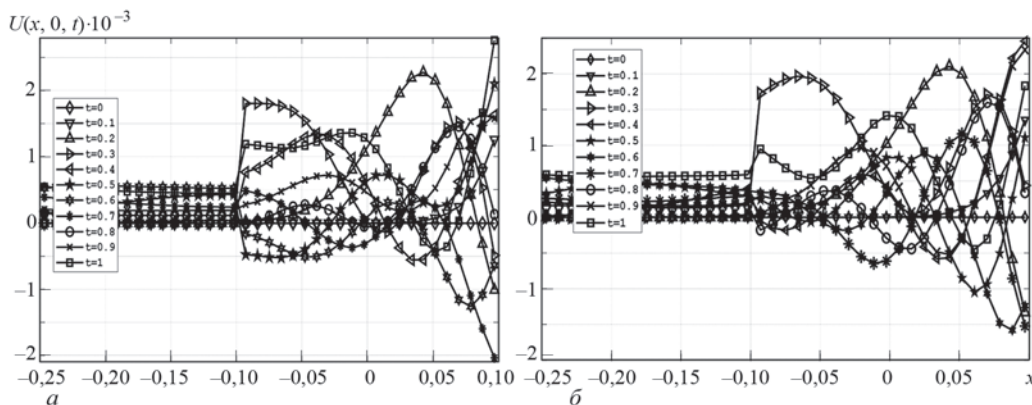


Рис. 2. Порівняння сигналу, який проходить через тріщину: *a* – яка має вертикальне положення; *b* – знаходиться під кутом 45° до горизонталі

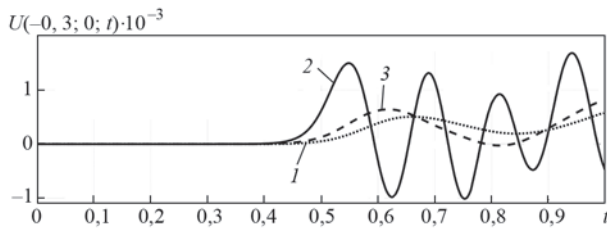


Рис. 3. Графічне представлення сигналу в точці  $(-0,3; 0)$  протягом проміжку часу  $[0; 1]$  при проходження через дефекти типу тріщини (1), без дефекту (2) та при проходженні через тріщину під кутом (3)

При проходженні звукових хвиль через тріщини зменшуються амплітуда і частота отриманого сигналу (порівняно з початковим). Отриманий сигнал має нелінійну складову. Результати досліджень було використано у дослідженні композитних елементів деталей, що містять помітну неоднорідність.

Також розроблена модель визначення положення джерела ультразвукових коливань [7]. Поширення ультразвукових хвиль може бути математично описано хвильовим рівнянням (лінійним та нелінійним) другого порядку.

Математична модель задачі має оптимізаційну постановку, в якій потрібно знайти мінімум функції:

$$F(x^{source}, y^{source}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \int_{\tau_i^{beg}}^{\tau_i^{end}} (s_i(x^{source}, y^{source}, t) - s_i^{experimental}(t))^2 dt \right] \rightarrow \min. \quad (2)$$

Обмеження на (2) накладається у вигляді:

$$\begin{cases} s_i(x^{source}, y^{source}, t) = U(x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t), \\ 0 \leq \tau_i^{beg} \leq \tau_i^{end} \leq T, i = \overline{1, n}, \\ \partial^2 U / \partial t^2 = \Delta U \text{ on } \Omega, t \in [0; T], \\ U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0, \\ \partial U / \partial \bar{n} = 0, t \in [0; T], \\ U(x^{source}, y^{source}, 0) = A \sin(2\pi ft). \end{cases} \quad (3)$$

де  $n$  – загальна кількість сенсорів;  $\tau_i^{beg}$  – час початку спостереження на  $i$ -му сенсорі;  $\tau_i^{end}$  – час закінчення спостереження на  $i$ -му сенсорі;

$s_i^{experimental}(t)$  – зняті дані  $i$ -м сенсором протягом певного проміжку часу  $[\tau_i^{beg}; \tau_i^{end}]$ ;  $T$  – загальний час проведення експерименту;  $\Omega$  – розрахункова область задачі (досліджуваній об’єкт);  $A, f$  – амплітуда й частота;  $(x_i^{sensor}, y_i^{sensor})$  – положення  $i$ -го сенсора;  $(x^{source}, y^{source})$  – положення збудника коливань.

Математична модель виду (2) відноситься до моделей класу нелінійної глобальної оптимізації. Функція виду (2) є нелінійною, отже для її мінімізації можна використовувати стохастичні або популяційні методи, оскільки можуть бути отримані локальні для неї мінімуми.

Нижче наведені результати виконаних обчислювальних експериментів з використанням прикладного програмного середовища MATLAB 2019b. Математична модель задачі (2) розв’язана з використанням методу скінченних різниць. Розрахункова сітка –  $60 \times 60$  вузлів,  $w = 32$  – кількість біт для кодування генетичним алгоритмом.

На рис. 5 показано чисельний розв’язок хвильового рівняння для моменту часу  $t = 1,45$ .

Рис. 6 містить графічні дані, зчитані з сенсорів, геометричне розташування яких наведено у табл. 1. Всі сенсори отримують дані протягом одного й того ж проміжку часу.

Для визначення фізичних характеристик джерела ультразвукових коливань в об’єктах була розроблена математична модель [7]. Процедура діагностики передбачає створення математичних моделей для визначення залишкових робочих ресурсів таких систем, а також проведення різних обчислювальних експериментів з метою здійснення апробації та адаптації параметрів розроблених математичних моделей до процесів, які поширюються у цих об’єктах та системах.

Досліджувалось поширення звуку в пластині, фізичні та геометричні характеристики якої відомі. Пропонується оптимізаційна математична модель

Таблиця 1. Геометричне розташування сенсорів

$x_i$	0,5333	0,7167	0,4500	0,1500	0,3167	0,1000	0,8667	0,4167
$y_i$	0,0667	0,9167	0,1167	0,3500	0,8500	0,2833	0,5167	0,9000

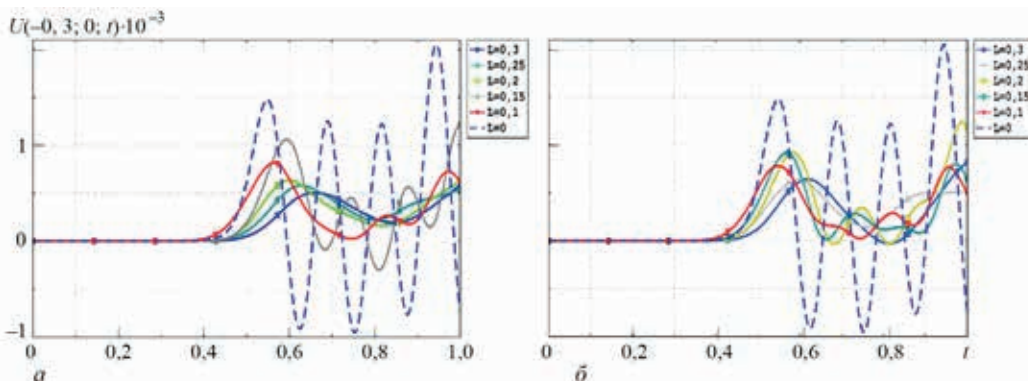


Рис. 4. Вплив розмірів дефекту типу тріщини на пройдений через нього сигнал



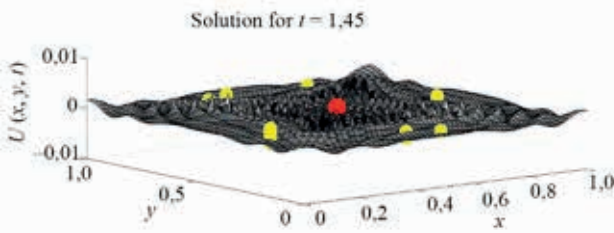


Рис. 5. Схематичне розташування сенсорів та джерела у розрахунковій області протягом певного періоду часу

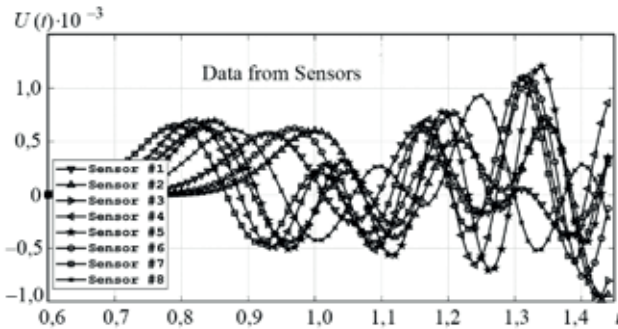


Рис. 6. Зчитані дані вісьмома сенсорами протягом одного й того ж проміжку часу

визначення амплітуди й частоти точкового джерела звукового сигналу на основі експериментальних даних, що отримуються сенсорами. Модель має вигляд:

$$F(A, f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \int_{\tau_i^{beg}}^{\tau_i^{end}} (s_i(A, f, t) - s_i^{experimental}(t))^2 dt \right] \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$\begin{cases} s_i(A, f, t) = U(A, f, x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t); \\ 0 \leq \tau_i^{beg} < \tau_i^{end} \leq T, i = \overline{1, n}; t \in [0; T]; \\ \partial^2 U / \partial t^2 = c^2 (\partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2), \\ \Omega = (x, y) \in [a; b] \times [c; d], a, b, c, d \in \mathbb{R}; \\ \left( \partial U / \partial \bar{n} \right) \Big|_{\Gamma} = 0, t \in [0; T]; \\ U(A, f, x^{source}, y^{source}, t) = A \sin(2\pi ft), \end{cases} \quad (5)$$

де  $n$  – загальна кількість сенсорів;  $\tau_i^{beg}$  – час початку спостереження на  $i$ -му сенсорі;  $\tau_i^{end}$  – час закінчення спостереження на  $i$ -му сенсорі;  $s_i^{experimental}(t)$  – зняті дані  $i$ -м сенсором протягом певного проміжку часу  $[\tau_i^{beg}; \tau_i^{end}]$ ;  $T$  – загальний час проведення експерименту;  $\Omega$  – розрахункова область задачі (досліджуваній об’єкт);  $A, f$  – амплітуда та частота відповідно;  $(x_i^{sensor}, y_i^{sensor})$  – положення  $i$ -го сенсора;  $(x^{source}, y^{source})$  – положення джерела (збудник коливань).

На рис. 7 показані результати моделювання для (4)–(5) методом скінченних різниць. Для оптимізації (4) було використано класичний генетичний алгоритм. Розрахункова сітка  $60 \times 60$  вузлів,  $w = 32$  – кількість біт для кодування у генетичному алгоритмі. Кількість ітерацій класичного генетичного алгоритму 100. Кількість обчислювальних експериментів 5.

За результатами обчислювальних експериментів встановлено, що класичний алгоритм знаходить чисельний розв’язок поставленої задачі досить точно. Знайдені значення  $A = 0,33334$ ;  $f = 9,0000154$ . Реальні значення параметрів  $A$  та  $f$  – це  $1/30$  та  $9$  відповідно.

Математична модель (3) може бути використана при дослідженні елементів та конструкцій з метою визначення дефектів, наприклад, мікротріщин та вибоїн.

Для визначення швидкості поширення звукових хвиль у твердих тілах розроблена математична модель на основі хвильових рівнянь математичної фізики другого порядку.

Прикладом моделі поширення хвильових процесів, які здійснюються точковим джерелом, є пряма модель, яка описується рівнянням:

$$\partial^2 U / \partial t^2 = \partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2; \quad (x, y) \in [0; 1]^2; t \in [0; 2]. \quad (6)$$

Початкові умови мають вигляд:

$$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0. \quad (7)$$

Граничні умови мають вигляд:

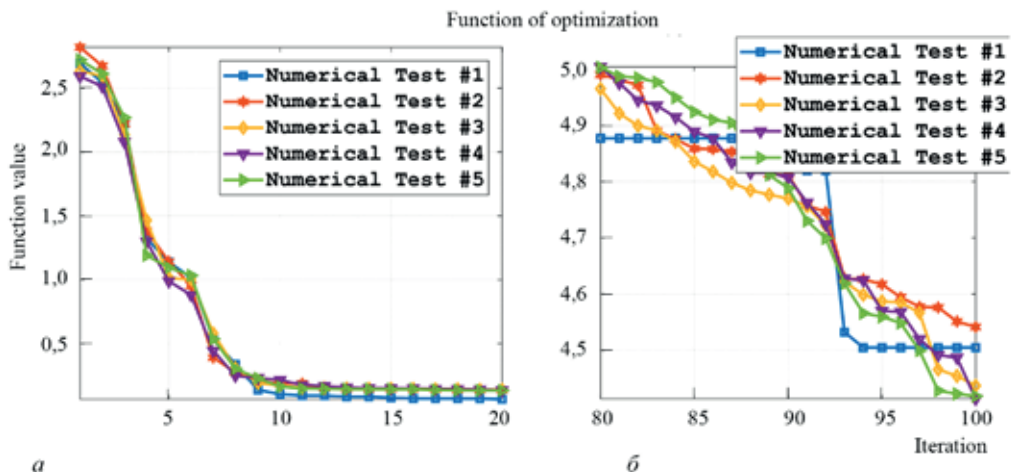


Рис. 7. Збіжність класичного генетичного алгоритму:  $a$  – перші 20 ітерацій;  $b$  – останні 20 ітерацій

$$\partial U / \partial \bar{n} \Big|_{\Gamma} = 0, t > 0. \quad (8)$$

Внутрішня умова має вигляд:

$$U(0,5; 0,5; t) = 30^{-1} \sin 18\pi t, 0 < t < 0,2. \quad (9)$$

Внутрішня умова (9) задає гармонічні коливання, які здійснюються точковим джерелом безпосередньо всередині досліджуваного об'єкта.

На рис. 8 зображені розв'язки математичної моделі (6)–(9).

В процесі виконання роботи розроблено систе-

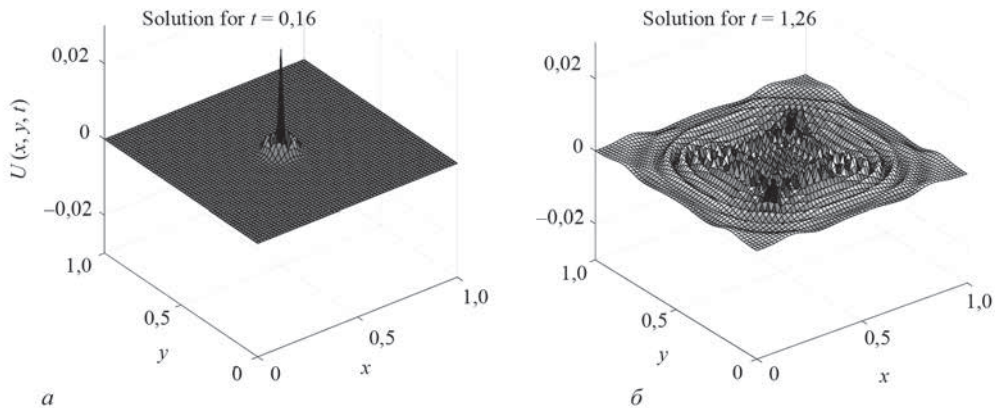


Рис. 8. Чисельний розв'язок математичної моделі у різні моменти часу



Рис. 9. Основний блок системи ультразвукового контролю об'єктів складної геометричної форми

му для ультразвукового контролю об'єктів складної геометричної форми (рис. 9) [7], основні технічні характеристики наведені в табл. 2.

Були проведені експериментальні дослідження розробленої системи ультразвукового контролю Зразки, які виготовлені зі сплаву на основі алюмінію (рис. 10), були надані Українським НДІ авіаційних технологій.

Для визначення швидкості поширення хвилі нанесено розмітку на деталь (рис. 10, точки а–в).

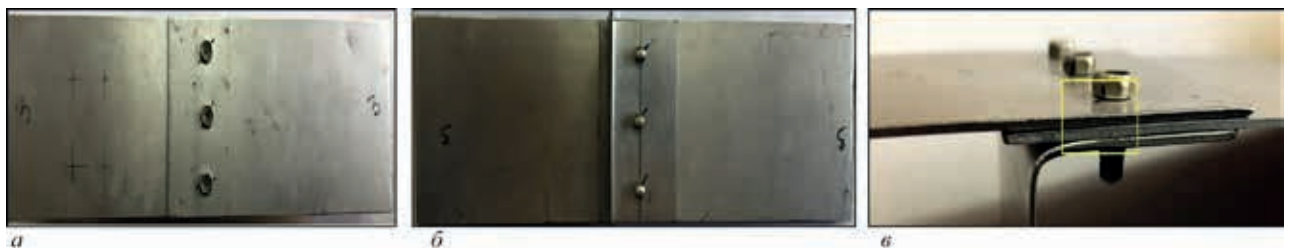


Рис. 10. Фото досліджуваного зразка: а – зверху; б – знизу; в – збоку (рамкою виділена область, де знаходиться тріщина)

В заданих точках було розміщено перетворювачі і знято осцилограму (рис. 11). За допомогою розмітки на екрані осцилографа визначено параметри сигналів.

Для дослідження різних зразків методом ультразвукового контролю використані засоби вимірювальної техніки та допоміжне обладнання. Розміри зразка 255×75×1 мм. Розміри штучно вировошеної тріщини в клепаному з'єднанні: довжина 17 мм; глибина 1 мм (на всю товщину зразка),

Таблиця 2. Основні технічні характеристики системи ультразвукового контролю

Частота заповнення радіоімпульсу, МГц	Менше 0,1...10,0
Тривалість імпульсу	1...8 періодів заповнюючого коливання
Амплітудне значення напруги на випромінювачі, В	0...10 на навантаженні 0,5 Ом
Вхідний опір, кОм	більше 3,0
Максимальна вихідна напруга, В	10
Коефіцієнт підсилення	2300

розкрив тріщини 0,05...0,1 мм.

Час, за який сигнал надходить від випромінювача до приймача, становить 14 мкс,  $t = 14 \cdot 10^{-6}$  с. Далі проводиться з'єднання перетворювачів разом (рис. 12) і зняття осцилограм (рис. 13) для визначення часу сумарної затримки сигналу у хвилеводах випромінювача та приймача.

Таблиця 3. Параметри прийнятих сигналів

	Без тріщини	З тріщиною
$t, \text{с}$	$13,6 \cdot 10^{-6}$	$14,4 \cdot 10^{-6}$
$2U_m, \text{В}$	5	0,5



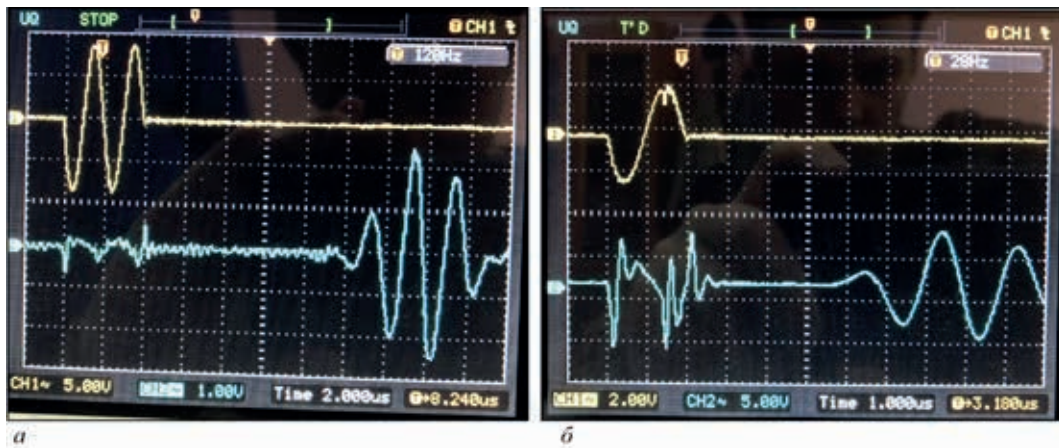


Рис. 11. Осцилограми сигналів: *a* – під час дослідження швидкості хвилі; *б* – при з’єднаних перетворювачах

Час, за який сигнал від випромінювача надходить до приймача, становить 6 мкс. Отже час затримки  $t_3 = 6 \cdot 10^{-6}$  с. Тому швидкість хвилі в зразку  $v = L/(t - t_3)$  становить:  $v = (0,02)/(13,2 \cdot 10^{-6} \dots 7 \cdot 10^{-6}) = 3225$  м/с.

На рис. 13 зображені осцилограми сигналу при проходженні бездефектної ділянки і ділянки з тріщиною. Виміряні значення амплітуди і затримки сигналів наведено в табл. 3. У табл. 3 позначено:  $t$  – час затримки,  $2U_m$  – подвійна амплітуда.



Рис. 12. Фото перетворювачів, з’єднаних між собою

Алгоритм досліджень та порівнянь отриманих результатів зображений на рис. 14.

Отримані експериментальні дані усереднювались, що дало можливість мінімізувати вплив завад типу білого шуму.

Генеровані сигнали передаються з використанням АЦП через USB-підключення до ПК та мають вигляд, який наведено у табл. 4.

Чисельні дані, які представлені у табл. 4, містять дані про генеровані сигнали розробленим прибором ультразвукового контролю.

Графічне представлення генерованих сигналів та їх усереднення наведено на рис. 15.

Аналогічно на рис. 16 показано сигнали-відгуки, що отримані при проходженні через тріщину в об’єкті, який зображено на рис. 10.

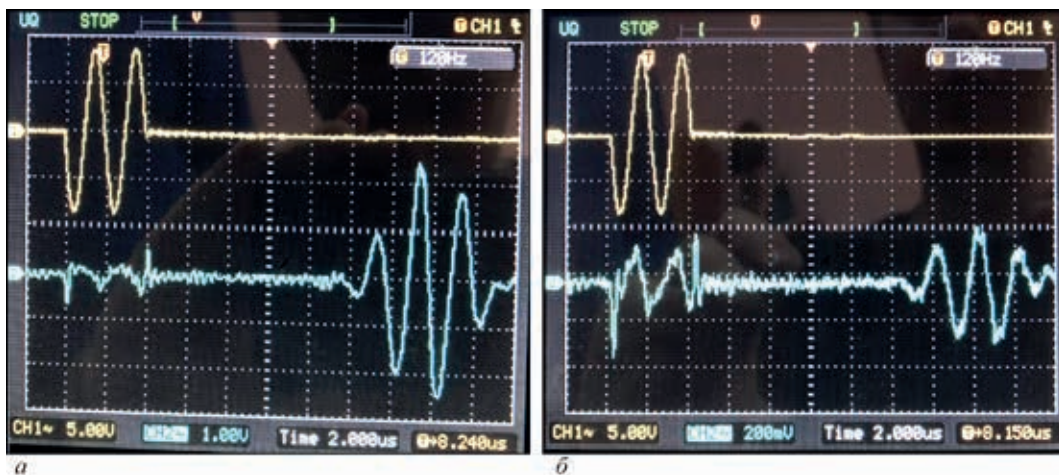


Рис. 13. Осцилограми сигналів при проходженні: *a* – бездефектної ділянки; *б* – ділянки зразка з тріщиною

Таблиця 4. Формат генерованих даних фізичних експериментів

Point	1	2	3	...	998	999	1000
Experiment no 1	0,0475	0,0475	0,0475	...	-0,0170	0,0475	0,0152
Experiment no 2	-0,2106	-0,2428	-0,2428	...	-0,2751	-0,3074	-0,2751
Experiment no 3	-0,2106	-0,2428	-0,2106	...	-0,2428	-0,2428	-0,2428
Experiment no 4	0,0152	0,0475	0,0475	...	0,0475	0,0152	0,0152
Experiment no 5	0,0798	0,0475	0,0798	...	0,0475	0,0798	0,0475
Experiment no 6	-0,0493	-0,0170	-0,0170	...	-0,0493	-0,0815	-0,0493
Experiment no 7	0,0152	0,0152	0,0152	...	0,0152	-0,0170	0,0152
Experiment no 8	-0,0493	-0,0815	-0,1138	...	-0,0815	-0,0815	-0,0815

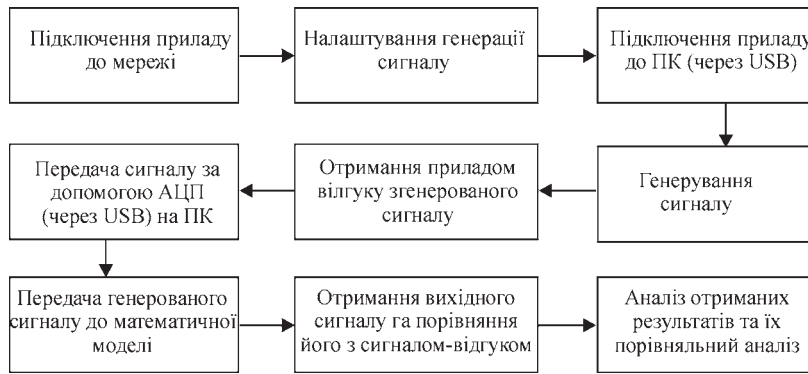


Рис. 14. Загальна стратегія формування даних та їхнього опрацювання на ПК з метою верифікації математичної моделі визначення сигналу-відгуку

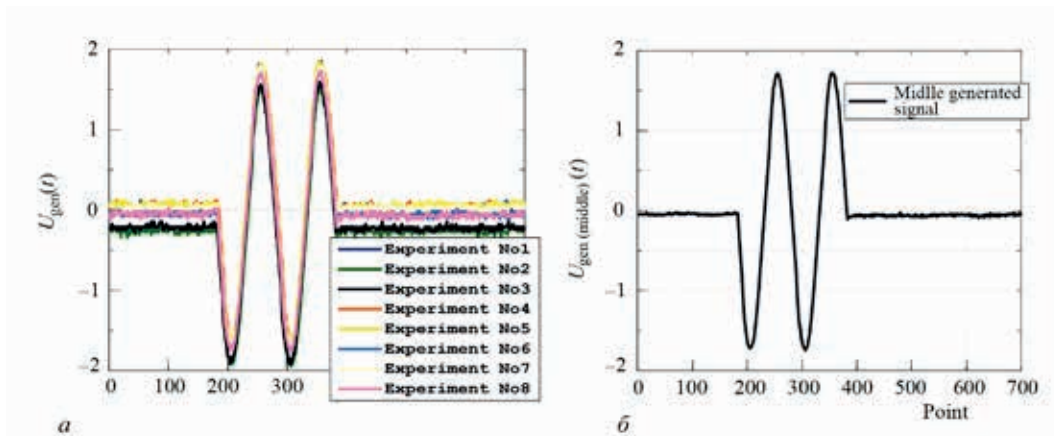


Рис. 15. Графічне представлення сгенерованих сигналів (перші 700 точок): *a* – кожен тестовий приклад окремо; *б* – результат усереднення

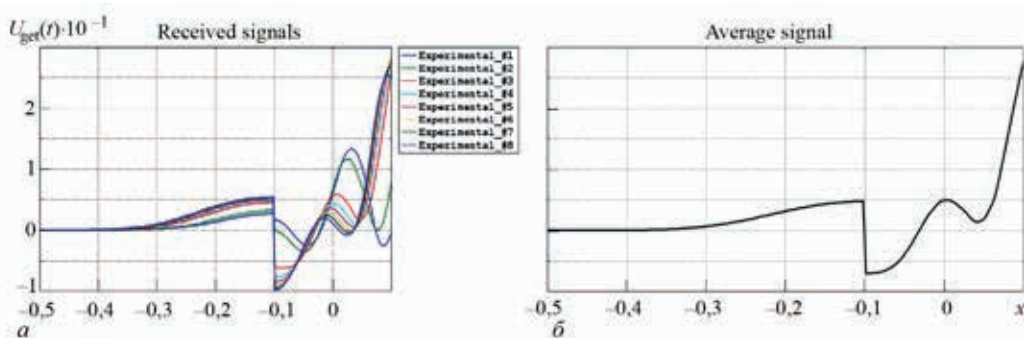


Рис. 16. Графічне представлення згладжених сигналів-відгуків в околі дефектів (тріщини) для фізичних експериментальних тестів зі сгенерованими сигналами: *a* – кожен тестовий приклад окремо; *б* – результат усереднення

Показником якості отриманих математичних моделей ультразвукової діагностики суцільних твердих тіл є результати перевірки реального сигналу, який був отриманий у результаті виконання фізичного експерименту з сигналом, що був отриманий самою математичною моделлю із завданням усередненого сгенерованого сигналу, що зображено на рис. 15, *б*. Результати порівняння наведені на рис. 17.

Результати експериментальних досліджень показують, що відхилення сигналу-відгуку, який отримано в результаті проведення фізичного експерименту, мало помітно відрізняється від сигналу-відгуку, який отримано в результаті математичного моделювання методом ультразвукового контролю з використанням прикладних програмних пакетів MATLAB та COMSOL Multiphysics.

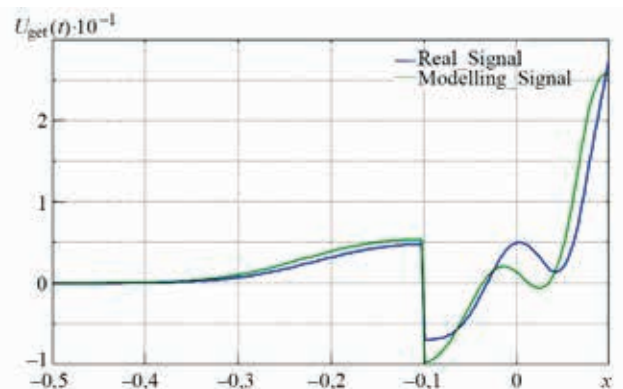


Рис. 17. Графічне представлення сигналу-відгуку, який отримано в результаті пропускання сгенерованого усередненого сигналу через модель ультразвукового контролю

Експериментально встановлено, що амплітуда сигналу, що проходить через тріщину розміром 0,05...0,1 мм, зменшується майже в 10 разів, що дозволяє використовувати МСП для знаходження таких дефектів. Зміна часу затримки обумовлена зміною швидкості розповсюдження сигналу всередині тріщини, і в наведеному експерименті затримка склала 0,8 мкс, що в подальшому можна використати для знаходження розміру тріщини.

**Список літератури**

1. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. (1991) *Акустические методы контроля*. Москва, Высшая школа.
2. Кретов Е.Ф. (2014) *Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении*. СПб, СВЕН.
3. Хамидуллин В.К. (1989) *Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы*. Ленинград, Издательство Ленинградского университета.
4. Щербинский В.Г. (2005) *Технология ультразвукового контроля сварных соединений*. Москва, Тиссо.
5. Hyzhko, Y., Hutorova, M., Myslovych, M., Ostapchuk, L. (2019) On Peculiarities of Development of Information Support for Technical Diagnostics Multilevel Systems of Electrical Equipment. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 1.9, 2, 34–41.
6. Бабак В.П., Єременко В.С., Куц Ю.В. та ін. (2019) *Модели та міри у вимірюваннях. Монографія*. Бабак В.П. (ред.). Київ, Наукова думка. <http://itff.kiev.ua/wp-content/uploads/2020/05/monogr-2019.pdf>

7. Бабак В.П., Богачев І.В., Хайдуров В.В. (2020) Визначення розмірів дефектів та їх положення при ультразвуковому контролі методами математичного та комп'ютерного моделювання. *Теплофізика та теплоенергетика*, 3, 43–48.

**References**

1. Ermolov, I.N., Alyoshin, N.P., Potapov, A.I. (1991) Acoustic methods of testing. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
2. Kretov, E.F. (2014) Ultrasonic flaw detection in power engineering. St.-Petersburg, SVEN [in Russian].
3. Khamidullin, V.K. (1989) Ultrasonic testing and measurement devices and systems. Leningrad, Izd-vo Leningrad. Universiteta [in Russian].
4. Shcherbinsky, V.G. (2005) Technology of ultrasonic testing of welded joints. Moscow, Tisso [in Russian].
5. Hyzhko, Yu., Hutorova, M., Myslovych, M., Ostapchuk, L. (2019) On peculiarities of development of information support for technical diagnostics multilevel systems of electrical equipment. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 9(2), 34–41.
6. Babak, V.P., Yeremenko, V.S., Kuts, Yu.V., Myslovych, M.V., Shcherbak, L.M. (2019) Models and measures in measurements: Monograph. Ed. by V.P. Babak. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian]. <http://itff.kiev.ua/wp-content/uploads/2020/05/monogr-2019.pdf>
7. Babak, V.P., Bogachev, I.V., Haidurov, V.V. (2020) Determination of sizes of defects and their localization in ultrasonic testing by the methods of mathematical and computer modeling. *Teplofizyka ta Teploenergetyka*, 3, 43–48 [in Ukrainian].

**DEVELOPMENT OF THE METHOD, PROCEDURE AND MEANS OF CONTROL OF ELEMENTS OF CONSTRUCTION MACHINERY AND METAL STRUCTURES USING MAGNETOSTRICTION EFFECT**

V.P. Babak<sup>1</sup>, Yu.V. Kuts<sup>1</sup>, I.V. Bogachev<sup>1</sup>, V.V. Khaidurov<sup>1</sup>, V.M. Zvorych<sup>2</sup>, M.V. Myslovych<sup>2</sup>, L.M. Shcherbak<sup>2</sup>, Yu.I. Hyzhko<sup>2</sup>, M.S. Hutorova<sup>2</sup>, L.B. Ostapchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Engineering Thermophysics of NASU. 2-a Marii Kapnist str., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: [admin@itff.kiev.ua](mailto:admin@itff.kiev.ua)  
<sup>2</sup>Institute of Electrodynamics of NASU. 56 Prosp. Peremohy, 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: [ied1@ied.org.ua](mailto:ied1@ied.org.ua)

A method and mathematical models of direct and inverse problems of ultrasonic testing and diagnostics of complex metal structures for defect detection have been developed and tested. A test sample of the system for magnetostrictive control of elements of the objects of study was made and experimentally verified. Mathematical modeling of the processes of ultrasonic testing was performed, using MATLAB and COMSOL Multiphysics software. The adequacy of mathematical models was confirmed by the results of comparing them with the real physical experiments. 7 Ref., 4 Tables, 17 Fig.

*Keywords: building metal structures; ultrasonic testing, low-ampere transducers, direct and inverse problems of ultrasonic testing*

Надійшла до редакції 28.09.2020

**ЖУРНАЛИ для професіоналів**



Видається з 1989 р.  
 Виходить 4 рази на рік  
 ISSN 0235-3474  
[doi.org/10.15407/tdnk](https://doi.org/10.15407/tdnk)  
 Передплатний індекс 74475



Видається з 1948 р.  
 Виходить 12 разів на рік  
 ISSN 0005-111  
[doi.org/10.15407/as](https://doi.org/10.15407/as)  
 Передплатний індекс 70031



Видається з 1985 р.  
 Виходить 4 рази на рік  
 ISSN 2415-8445  
[doi.org/10.15407/sem](https://doi.org/10.15407/sem)  
 Передплатний індекс 70693

(380-44) 200-8277

[journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)

[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)