

ВИКОРИСТАННЯ КОМПОНЕНТНОГО ПІДХОДУ ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СПРЯМОВАНОЇ МОДИ

І. З. Лютак, З. П. Лютак, А. В. Хамурда

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
Інститут інформаційних технологій; вул. Карпатська, 15, Івано-
Франківськ, Україна, 76019; e-mail: ihorlt@gmail.com*

В роботі пропонується розроблення компонента системи контролю з розподіленими параметрами, що дозволить використовувати тип ультразвукових хвиль, які поширюються вздовж стінки труби і називаються спрямованими. Особливістю таких хвиль є її здатність не загасати на значних відстанях у порівнянні із об'ємними ультразвуковими хвилями. Математичний опис поширення ультразвукових хвиль спрощено описано, як поширення в пластині із відомою висотою. Коливання елементарного об'єму пружного середовища описали рівнянням Ейлера та закону Гука і представлено як систему двох диференціальних рівнянь, що описує поздовжні та поперечні коливання елементарного об'єму. Геометрична побудова моделі створюється в окремому компоненті, що має можливості параметрично описувати фігур та робити об'єднання шляхом застосування логічних методів, наприклад об'єднання, віднімання тощо. Для розв'язку моделі задаються нульові початкові умови, таблично заданий генеруючий сигнал, що інтерполюється та граничні умови по краях пластини як абсорбуючий шар. Абсорбуючий шар моделюється шляхом додавання значного масштабування системи. Також поняття абсорбуючого шару включає механізм фільтрування частот, щоб відфільтрує високочастотну складову коливань. Проведено обчислення побудованої моделі методом скінченних елементів для двох випадків: без неоднорідностей та із однією неоднорідністю. Порівняння отриманих результатів показано графічно. Виявлено можливість обчислювати відбитий від неоднорідності сигнал, та аналізувати етапи створення та поширення різних типів хвиль в пружному середовищі.

Ключові слова: *ультразвук, спрямовані хвилі, моделювання, скінченні елементи, неоднорідність, пружне середовище.*

Вступ

Створення нових методів ультразвукового контролю технічного стану трубопроводів є важливою задачею, оскільки власне ультразвуковий метод є найбільш поширеним в технічній діагностиці, а кількість

фахівців, що можуть застосовувати новітні методи є визначальним для створення таких методів. Сучасним трендом щодо побудови систем ультразвукового контролю протяжних об'єктів, до яких відносяться і трубопроводи є побудова систем із розподіленими параметрами [1]. В такі системи також включають і елементи візуалізації даних як веб-орієнтоване програмне забезпечення, що в свою чергу, включає системи зберігання даних та системи кіберзахисту інформації. Розроблення систем контролю із розподіленими параметрами є різномірним з точки зору технічної реалізації та використання технологій. Тому такі системи розробляються як окремі компоненти із погодженням зв'язків та системи передавання інформації. Можна виокремити окремі напрямки розроблення систем із розподіленими параметрами як розроблення систем збору первинної інформації. У випадку використання ультразвукового методу вимірювання до першого компоненту відноситься первинний ультразвуковий перетворювач та вторинний пристрій отримання та оброблення інформації. В ультразвукових пристроях, як правило, будеться складне програмне забезпечення, що збільшує точність оброблення сигналу та є безпосередньо налаштованим під спосіб генерування та прийому ультразвукових коливань. Первинні системи намагаються будувати найбільш дешевими, оскільки в розподілених системах їх кількість є найбільшою якщо порівнювати з іншими компонентами такої системи. Другим компонентом розподіленої системи вимірювання є передавання вимірювальної інформації, що може використовувати як провідні шляхи так і безпроводні. В таких компонентах важливим є збереження інформативної складової сигналу, дальність передавання сигналу та захист інформації від несанкціонованого відбору. Третім компонентом є власне представлення інформації, що включає і зберігання і методи оброблення і системи збору інформаційного сигналу. З приведення аналізу можна визначити, що методи направлені на зменшення кількості первинних перетворювачів є важливим чинником, що здешевлює всю систему контролю із розподіленими параметрами [2, 3].

Мета роботи

В роботі пропонується розроблення компонента системи контролю з розподіленими параметрами, що дозволить використовувати тип ультразвукових хвиль, які поширюються вздовж стінки труби і називаються спрямованими. Особливістю таких хвиль є її здатність не загасати на значних відстанях у порівнянні із об'ємними ультразвуковими хвилями.

Теоретичне обґрунтування

Математичний опис поширення ультразвукових хвиль в стінці труби спрощено будемо описувати, як поширення в пластині із відомою висотою. Границями розділу із двох сторін пластини є непровідне для ультразвукових коливань середовище, що відповідає повітрю при частоті хвилі в пластині більше ніж кілька сотень кілогерц. Середовище пластини будемо вважати пружним, що відповідає стінкам трубопрово-

дів із сталі чи інших металів. Коливання елементарного об'єму пружного середовища опишемо рівнянням Ейлера та закону Гука [3]:

$$C_{kl} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де C_{kl} – компоненти матриці констант жорсткості, $k, l = 1..6$; $i, j = 1, 2, 3$; ρ – густина пружного середовища; t – час; u – елементарний об'єм середовища.

Рівняння (1) є складним для обчислення з погляду забезпечення всіх початкових та граничних умов, тому вважатимемо, що при поширенні хвилі нормальний її стиск та зсув елементарного об'єму є визначальними[4]:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} &= c_{11} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + c_{12} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1 \partial x_2}, \\ \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} &= c_{22} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} + c_{12} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рівняння (2) можна використовувати для обчислення поширення пружного коливання в пластині. Проте, процес обчислення все ще ускладнюється заданням граничних умов та моделювання процесу загасання амплітуди. Вирішенням є представлення (2) у частотній області застосувавши перетворення Фур'є до коливань елементарного об'єму пружного середовища [5]:

$$\begin{aligned} -\rho \cdot \omega^2 \cdot \hat{u}_1 &= \hat{c}_{11} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1^2} + \hat{c}_{12} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_2^2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1 \partial x_2}, \\ -\rho \cdot \omega^2 \cdot \hat{u}_2 &= \hat{c}_{22} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_2^2} + \hat{c}_{12} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\mathbf{u} = \{\hat{u}_1, \hat{u}_2\}$ – перетворення Фур'є зміщення елементарного об'єму; $\hat{c}_{ik} = Re(\hat{c}_{ik}) + jIm(\hat{c}_{ik})$ – комплексне число, дійсна частина якого відповідає константі жорсткості пружного середовища, а уявна частина відповідає загасанню амплітуди.

Компонент геометричної побудови моделі обчислення

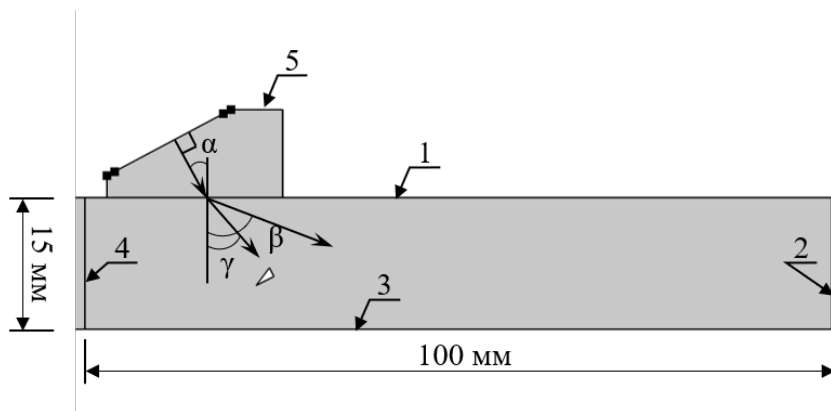
Геометрична побудова моделі створюється в окремому компоненті, що має можливість як з'єднання простих геометричних фігур, так і логічних операцій щодо модифікації у більш складну геометричну структуру. При цьому ми можемо виконувати параметричне задавання необхідних розмірів, рис. 1. Коливання задаються на зрізаній верхній грані призми, табл. 1.

Для створення нетабульованої функції задані в табл. 1 табульовані значення акустичного збурення на верхній границі призми описуються кубічним сплайном.

Кути заломлення та відбивання описуються законом Снеліуса:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{p1}} = \frac{\sin \beta}{c_{p2}} = \frac{\sin \gamma}{c_{s2}}, \quad (4)$$

де α, β, γ – кути падіння та заломлення ультразвукового променя; c_{p1} – швидкість падаючої ультразвукової хвилі; c_{p2}, c_{s2} – швидкість відповідно заломленої позадвожньої та поперечної ультразвукових хвиль.



1-4 – границі розділу середовище поширення ультразвуку – зовнішній простір, 5 – первинний перетворювач та проміжний шар (призма), α – кут падіння променя ультразвукової хвилі, β – кут заломлення поздовжньої об'ємної ультразвукової хвилі, γ – кут заломлення поперечної об'ємної ультразвукової хвилі.

Рис. 1. Геометрична побудова моделі обчислення

Основне середовище поширення створене шляхом об'єднання трьох прямокутних фігур. Основна фігура є алюмінієвою пластиною довжиною 10 см. Для моделювання поширення ультразвукових хвиль в пластині без ревербації необхідно створити відповідні граничні умови. В нашому випадку підходить невеликі за розміром прямокутні області, що мають властивості абсорбуючого шару.

Таблиця 1. Параметричне задавання збудження ультразвукового перетворювача

Час, с	Акустичний тиск, Па
0.00E+00	0.00
3.33E-08	-0.14
6.67E-08	-0.54
1.00E-07	-1.55
1.33E-07	-3.82
1.67E-07	-8.15
2.00E-07	-15.49
2.33E-07	-25.77
2.67E-07	-35.93
3.00E-07	-35.64
3.33E-07	-0.57
3.67E-07	116.36
4.00E-07	393.19
4.33E-07	939.68

Всередині середовища поширення ультразвукової хвилі побудовану малу трикутну фігуру, що відповідає за дефект суцільності середовища.

Всі геометричні розміри мають присвоєні до них змінні, що можуть використовуватись в наступних компонентах для завершення моделювання.

Компонент задавання фізико-математичних властивостей моделі обчислення

Абсорбуючий шар є важливою складовою для проведення обчислення моделі, оскільки за допомогою цього шару можна більш точно обчислювати пряму (не ревербаційну) складову основної згенерованої ультразвукової хвилі. Оскільки ми намагаємось визначити ревербаційну частину ультразвукових коливань викликаних взаємодією хвилі із неоднорідністю (дефектом) в середовищі поширення, накладання двох ревербаційних пружних полів значно ускладнить обчислення. На практиці, при проведенні ультразвукового контролю в стінці трубопроводу чи іншому технологічному об'єкті, де товщина стінки є набагато меншою довжини хвилеводу, зберігаються аналогічні умови.

Абсорбуючий шар моделюється шляхом додавання значного масштабування системи. Масштабування ефективно сповільнює поширення хвиль і забезпечує їх властивість поширюватись нормально до зовнішньої границі розділу середовищ. Це означає, що хвилі вдаряться до границь розділу зовнішнього середовища найбільш ближче до нормального напрямку.

Також поняття абсорбуючого шару включає механізм фільтрування частот, щоб відфільтрує високочастотну складову коливань. Частотні характеристики абсорбуючого шару ми задаємо в алгоритмі так, щоб максимально зменшити високочастотну складову коливань. Також на протилежній границі розділу середовищ абсорбуючого шару задаються низькочастотні відбивні умови, що мають на меті забрати всі решта пружних коливань.

Результати проведених обчислень

Обчислення поширення ультразвукових коливань проводилось у двох конфігураціях. У першій конфігурації середовище поширення ультразвукової хвилі було однорідним без дефектів. У другій конфігурації було змодельовано дефект. У двох конфігураціях початкові та граничні умови не змінювались, тобто параметри ультразвукового коливання були однаковими. На рис. 2, зображено отримані сигнали у двох конфігураціях обчислювальної моделі, де можемо спостерігати різницю сигналів в околі часу 15 мікросекунд. Отримана різниця амплітуд є ревербаційною ультразвуковою хвилею отриманою від взаємодії із дефектом.

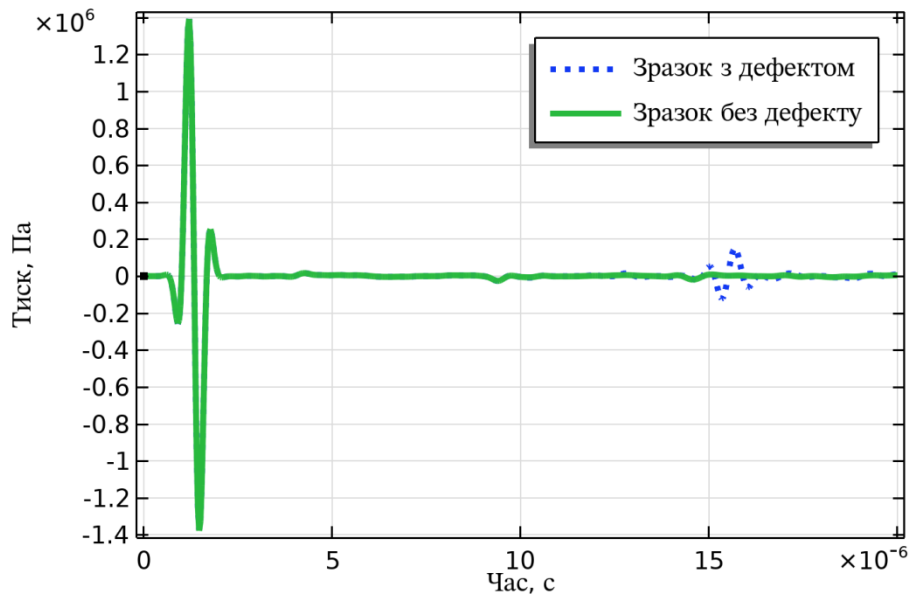


Рис. 2. Ультразвуковий сигнал

Порівнюючи амплітуди падаючої ультразвукової хвилі (на початку часової шкали) та відбитої від дефекту, стає очевидним важливість присутності в моделі абсорбуючих шарів, що могли б суттєво вплинути на можливість виявлення хвилі відбитої від дефекту.

Запропонований підхід обчислення поширення ультразвукових коливань в пружному середовищі проводиться методом скінченних елементів, тому є можливість побачити розподіл коливань у площині. На рис. 3, представлено розподіл коливань від початку генерування збуджуючого сигналу 2.3 мікросекунди. Тут можна побачити що в моделі в цьому часі є присутня тільки падаюча ультразвукова хвиля в проміжному шарі.

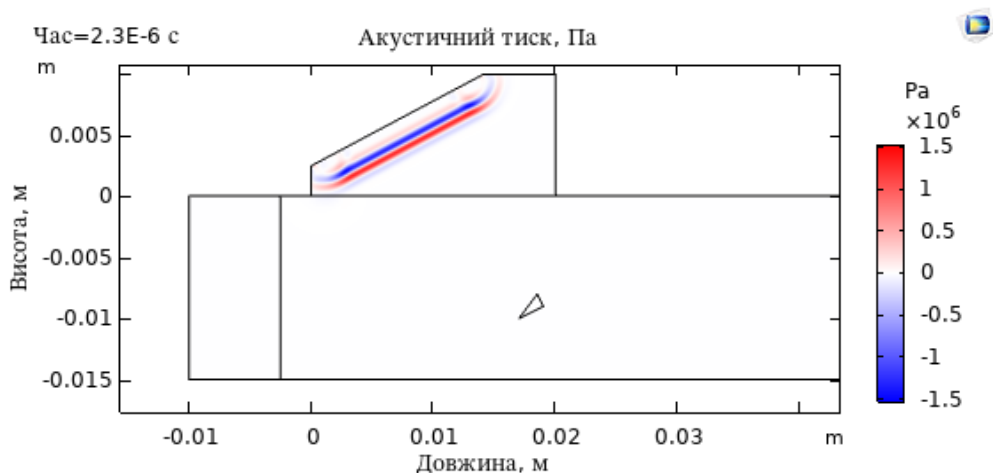


Рис. 3. Падаюча ультразвукова хвиля в моменті часу 2.3 мкс

З рис. 3 видно, що форма проміжного шару (призми) вносить вплив на розподіл хвильового поля в площині. Таким чином, ми можемо проектувати необхідні геометричні розміри призми, щоб мінімізувати вплив її геометрії на отриманий ревербаційний сигнал.

На рис. 4, представлено розподіл ультразвукових коливань в момент часу досягнення поздовжніми ультразвуковими хвилями границі розділу пружне середовище – дефект.

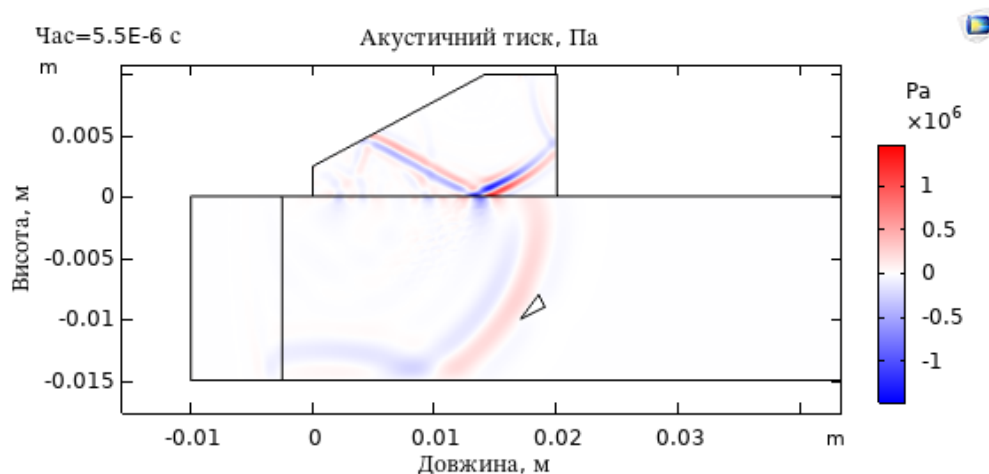


Рис. 4. Падаюча ультразвукова хвиля в моменті часу 5.5 мкс

Можна побачити, що в площині середовища поширення чітко виділяються дві заломлені хвилі, що відповідають поперечним та поздовжнім ультразвуковим хвилям. Причому в призмі також виокремились ультразвукові хвилі в залежності від напрямку коливань елементарного об'єму середовища, поздовжнього чи поперечного до напрямку поширення.

Взаємодія хвильового фронту із неоднорідність показано на рис. 5. Тут можна побачити, що частина хвильової енергії відбивається і її кількість хоча і менша за падаючий фронт, але є того ж порядку в околі неоднорідності. Тут потрібно зауважити, що форма неоднорідності є такою, що її найбільша границя розділу розташована нормально до фронту падаючої хвилі. Ми маємо можливість за допомогою розробленої моделі досліджувати інші форми неоднорідностей та співставити результати.

Очевидно, що при меншій довжині границі розділу неоднорідності і пружного середовища, ефективна площа нормально до напрямку падаючої хвилі якого буде меншою, кількість відбитої хвильової енергії буде меншою.

Також за допомогою запропонованої моделі можна оцінити ступень утворення відбитої хвилі від групи неоднорідностей. Проте така задача вимагатиме більшої кількості обчислювальних ресурсів.

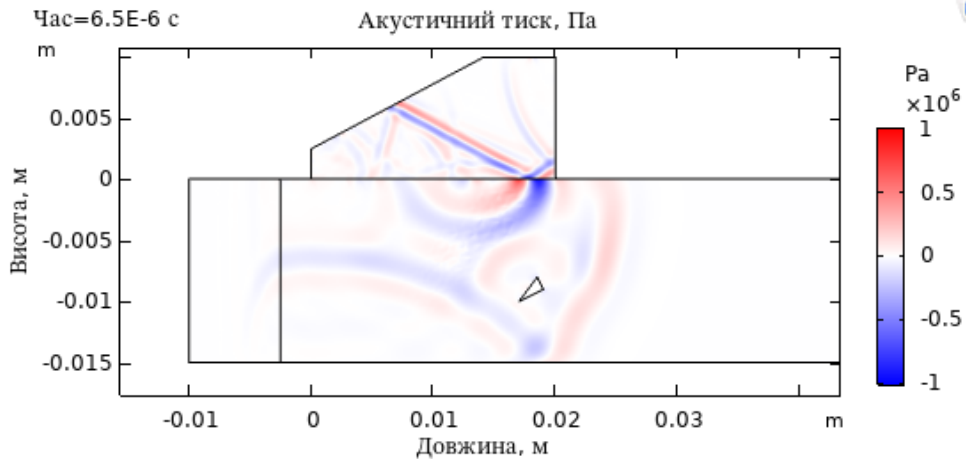


Рис. 5. Падаюча та відбита ультразвукові хвилі в моменті часу 6.5 мкс

Формування пройденої хвилі після неоднорідності показано з утворенням двох піків, що формує хвильовий пакет, який рухається із швидкістю групової моди.

Більш детально утворення пройденої хвилі можна побачити порівнявши розподіл хвильової енергії всередині середовища поширення із наступним часовим періодом, рис. 6. Видно утворення декількох фаз хвильового фронту, що має кут із границями розділу середовища поширення. Слід зауважити, що, оскільки хвиля поширюється на більший об'єм пружного середовища, то максимальна концентрація хвильової енергії знижується і на рис. 6, ми маємо максимальне значення шкали розподілу енергій на порядок мене ніж в попередній часовій відмітці.

У зменшеному діапазоні розподілу хвильової енергії можна побачити, що границі розділу неоднорідність – середовище поширення стає джерелом коливальної енергії. Особлива концентрація енергії є на гострих кінцях границь розділу неоднорідності.

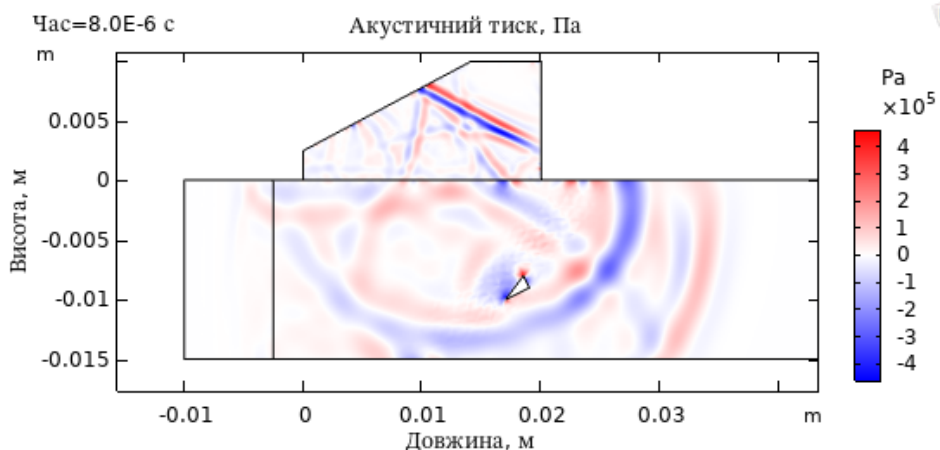


Рис. 6. Падаюча та відбита ультразвукові хвилі в моменті часу 8.0 мкс

На рис. 7, показано формування відбитої хвилі від неоднорідності, де хвильовий фронт є в протифазі з різних сторін неоднорідності. Оскільки частота коливань є однаковою то розділ коливань утворює пряму з відсутністю коливань елементарного об'єму середовища. Також можна спостерігати, що в призмі до цього моменту часу також є відбиті і заломлені коливання амплітуда яких спів розмірна із амплітудою хвиль в пружному середовищі поширення. Такі коливання не є інформативними та становлять додаткові складнощі при розпізнаванні відбитої від неоднорідності хвилі.

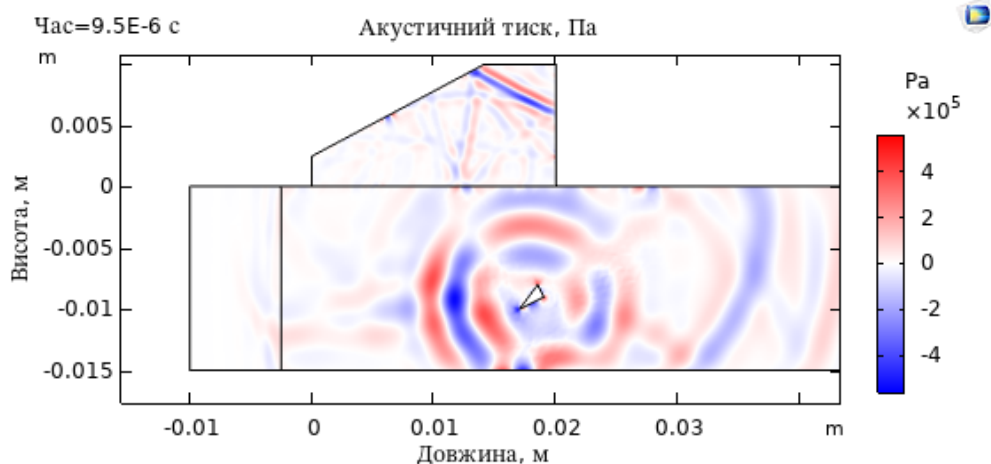


Рис. 7. Падаюча та відбита ультразвукові хвилі в моменті часу 9.5 мкс

Одним із підходів для більш чутливого розпізнавання відбитого від неоднорідності сигналу є порівняння двох станів при якому позиція генеруючого давача буде зміщена, або із сигналом отриманого від зразка без неоднорідностей.

На рис. 8 показано розподіл хвильового поля на часовому відліку 15 мкс від початку генерування ультразвукових коливань. Розподіл коливань в околі вводу заломленої хвилі в досліджувану пластину стає більш однорідним. Відбита хвиля від неоднорідності досягає поверхні призми на межі призма – первинний ультразвуковий перетворювач. Видно, що хвильова енергія відбитої від неоднорідності є вища ніж розподіл її всередині призми, оскільки в призмі коливання кілька разів заломлювались за інтерферували, переходили в пружне середовище пластини. Довжина фронту хвилі, яка залишилась в призмі є незначною у порівнянні із відбитою хвилею і таким чином механічні коливання на границі розділу призми передаються в первинний перетворювач як окремий сигнал, що зрушує поверхню чутливого елемента по всій його площі.

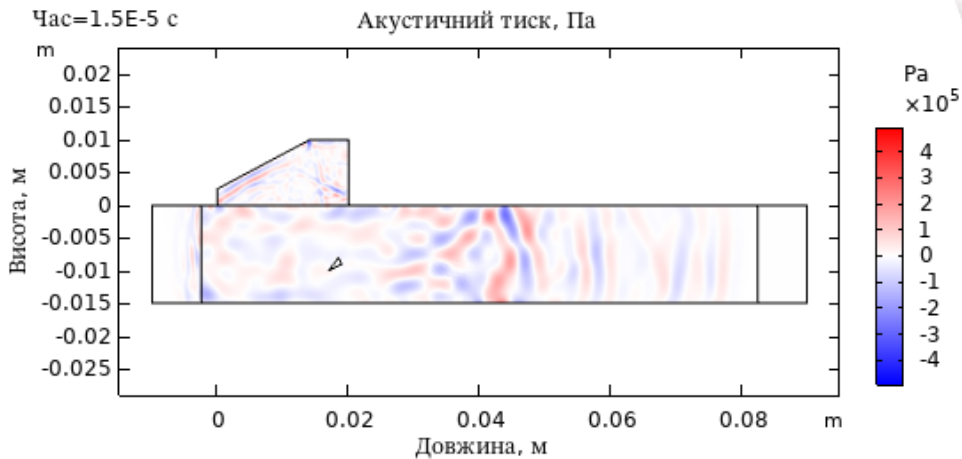


Рис. 8. Падаюча та відбита ультразвукові хвилі в моменті часу 15 мкс

У пружному середовищі, на відстані 40 мм від початку пластини починає формуватися фронт фази нормальний до границь розділу середовищ. Ці коливання утворюють стоячу хвилю, що поширюється вздовж границь розділу і називаються спрямованими ультразвуковими модами. Видно, що сформована нульові моди спрямованих ультразвукових хвиль на відстані 60 мм від початку пластини, та з дещо меншою енергією на відстані 75 мм. На відстані 45 мм від початку пластини формуються перші моди спрямованих хвиль. Їх енергія є в межах розподіленої хвильової енергії у першій половині пластини. Проте при поширенні вздовж пластини, що виступає в цьому випадку як хвилевід, енергія спрямованих хвиль буде рости у порівнянні із хвильовою енергією інших типів коливань, розподілених по пластині. Тому можна визначити ефективні місця реєстрації спрямованих хвиль ультразвуковим перетворювачем. Звичайно, як можна побачити із всього аналізу, структура спрямованих хвиль буде залежати від наявності неоднорідностей в пружному середовищі, що в свою чергу, дає інструмент для подальшого застосування ультразвукового контролю виявлення неоднорідностей в пружному середовищі.

Висновки

Запропонований підхід моделювання поширення ультразвукового коливання в пружному середовищі є ефективним методом оцінки типів дефектів, що можуть бути виявленими та дозволяє прогнозувати якість відбитого від дефекту сигналу включаючи параметри акустичного тракту.

Обчислення запропонованим алгоритмом поширення пружних коливань можуть проводитись на персональному комп'ютері. Ці обчи-

слення не вимагають великих об'ємів оперативної пам'яті чи частоти центрального процесора.

Запропонований підхід обчислень поширень пружних коливань не можна використовувати в пристроях вимірювань в реальному часі, оскільки повний цикл обчислень триває десятки хвилин.

На основі запропонованого підходу обчислення отриманого ультразвукового коливання від дефекту можна скласти цифрову базу даних дефектів, що може лягти в основу побудови алгоритму розпізнавання дефектів.

Література

1. Zeebaree, S. R., Shukur, H. M., Haji, L. M., Zebari, R. R., Jacksi, K., & Abas, S. M. (2020). Characteristics and analysis of hadoop distributed systems. *Technology Reports of Kansai University*, 62(4), 1555-1564.
2. Balasubramaniam, Krishnan, and Suresh Periyannan. "Ultrasonic waveguide technique for distribute sensing and measurements of physical and chemical properties of surrounding media." U.S. Patent Application No. 16/726,123.
3. Hosten B. Finite elements methods for modeling the guided waves propagation in structures with weak interfaces / B. Hosten, M. Castaings // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2005. – Vol 760. – P. 142 – 149. - ISSN 0001-4966.
4. B. R. Ibrahim, S. R. M. Zeebaree, and B. K. Hussan, "Performance Measurement for Distributed Systems using 2TA and 3TA based on OPNET Principles," *Science Journal of University of Zakho*, vol. 7, no. 2, pp. 65–69, Jun. 2019, doi: 10.25271/sjuoz.2019.7.2.603.
5. Lyutak, I. Z., Z. P. Lyutak, and A. V. Khamurda. "Веб-орієнтована компонентна система контролю трубопроводів ультразвуковими спрямованими хвилями." *Methods and devices of quality control* 1 (46) (2021): 63-74.

Стаття надійшла до редакційної колегії 20.10.2022 р.

USING A COMPONENT APPROACH IN CALCULATING PARAMETERS OF PROPAGATION OF AN ULTRASONIC GUIDED MODE

I. Z. Lyutak, Z. P. Lyutak, A. V. Khamurda

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; Institute of Information Technologies; St. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019; e-mail: ihortl@gmail.com

The paper proposes the development of components of the control system with distributed parameters, which allow the use of the type of ultrason-

ic waves that propagate along the pipe wall and are called guided. The peculiarity of such waves is their ability not to fade over significant distances compared to bulk ultrasonic waves. The mathematical description of ultrasonic wave propagation has been described simply as propagation in a plate with a known height. Fluctuations of the elementary volume of the elastic medium were described by Euler's equation and Hooke's law and are presented as a system of two differential equations describing longitudinal and transverse fluctuations of the elementary volume. The geometric construction of the model is created in a separate component, which can parametrically describe shapes and make a union by applying logical methods, for example, logical union, subtraction, etc. To solve the model, zero initial conditions have been applied. A table-specified generating signal that interpolates, and boundary conditions along the edges of the plate as an absorbing layer have been set. The absorbing layer is modelled by adding significant system scaling. Also, the concept of an absorbing layer includes a frequency filtering mechanism to filter out the high-frequency component. The calculation of built model by finite elements approach was carried out for two cases: without homogeneity and with homogeneity. The comparison of the obtained results is shown graphically. The possibility of calculating the back propagated signal from heterogeneity has been revealed. Also, an analyse the stages of creation and propagation of various wave types in an elastic medium has been shown.

Keywords: *ultrasound, guided waves, modelling, finite elements, heterogeneity, elastic medium.*