

УДК 004.94:534.2

doi:10.20998/2413-4295.2025.02.07

COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ: МОЖЛИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПРИКЛАДИ

Л. В. ЗАЙЦЕВА

Кафедра комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
e-mail: Liliia.zaitseva@khi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Досліджено застосування програмного пакету COMSOL Multiphysics для моделювання ультразвукового контролю, що є важливим методом неруйнівного контролю в багатьох галузях промисловості. Розглянуто можливості COMSOL Multiphysics у порівнянні з іншими поширеними програмами для моделювання ультразвукового контролю, такими як Ansys, MATLAB, Abaqus та PZFlex. Проаналізовано переваги COMSOL Multiphysics, зокрема його здатність моделювати мультифізичні процеси, зручний графічний інтерфейс та широкі можливості інтеграції з іншими програмними інструментами. Зосереджено увагу на тому, як COMSOL Multiphysics дозволяє враховувати взаємодію різних фізичних явищ, що є критично важливим для точного моделювання ультразвукового контролю, де необхідно аналізувати складну взаємодію ультразвукових хвиль з досліджуванним матеріалом та наявними в ньому дефектами. COMSOL Multiphysics надає широкий спектр інструментів та модулів, що дозволяють моделювати різні аспекти ультразвукового контролю. У статті детально описано модулі та інструменти COMSOL Multiphysics, які використовуються для моделювання акустичних хвиль, включаючи Acoustics Module, Structural Mechanics Module та Multiphysics Coupling. Розглянуто можливість моделювання різних типів ультразвукових хвиль за допомогою COMSOL, включаючи поздовжні, поперечні та поверхневі хвилі. Представлено результати моделювання ультразвукового контролю з використанням COMSOL Multiphysics. Візуалізовано процеси поширення хвиль, розподіл тиску, розподіл електричного потенціалу в датчику та розподіл механічних напружень у досліджуваному зразку. Проаналізовано вплив наявності дефектів у матеріалі на характеристики сигналів ультразвукового контролю. Отримані дані моделювання дозволяють наочно продемонструвати можливості COMSOL Multiphysics для візуалізації та аналізу ультразвукового контролю. Підтверджено, що COMSOL Multiphysics є потужним інструментом для дослідження та розробки методів неруйнівного контролю, зокрема ультразвукового. Запропоновано напрямки подальших досліджень з використанням COMSOL Multiphysics в області ультразвукового контролю, спрямовані на розробку нових методів діагностики та оптимізацію існуючих.

Ключові слова: COMSOL Multiphysics; ультразвуковий контроль; неруйнівний контроль; моделювання; дефекти; хвилі; сигнали.

COMSOL MULTIPHYSICS FOR MODELING ULTRASONIC WAVES: OPPORTUNITIES, APPLICATIONS AND EXAMPLES

L. ZAITSEVA

Department of Computer and Radio-electronic Systems for Testing and Diagnostics, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The use of the COMSOL Multiphysics software package for modeling ultrasonic inspection, which is an important method of non-destructive testing in many industries, is investigated. The capabilities of COMSOL Multiphysics in comparison with other common ultrasonic inspection simulation programs, such as Ansys, MATLAB, Abaqus, and PZFlex are considered. The advantages of COMSOL Multiphysics are analyzed, in particular, its ability to model multiphysics processes, user-friendly graphical interface, and extensive integration with other software tools. Attention is paid to how COMSOL Multiphysics allows to take into account the interaction of various physical phenomena, which is critical for accurate modeling of ultrasonic inspection, where it is necessary to analyze the complex interaction of ultrasonic waves with the material under study and the defects present in it. COMSOL Multiphysics provides a wide range of tools and modules that allow you to model various aspects of ultrasonic inspection. This article describes in detail the COMSOL Multiphysics modules and tools used for acoustic wave modeling, including the Acoustics Module, Structural Mechanics Module, and Multiphysics Coupling, are described in detail. The possibility of modeling various types of ultrasonic waves using COMSOL, including longitudinal, transverse, and surface waves, is considered. The results of modeling ultrasonic control using COMSOL Multiphysics are presented. The processes of wave propagation, pressure distribution, distribution of electric potential in the transducer, and distribution of mechanical stresses in the test sample are visualized. The influence of the presence of defects in the material on the characteristics of ultrasonic inspection signals is analyzed. The obtained simulation data allow us to clearly demonstrate the capabilities of COMSOL Multiphysics for visualization and analysis of ultrasonic inspection. It is confirmed that COMSOL Multiphysics is a powerful tool for the research and development of non-destructive testing methods, including ultrasonic testing. Directions for further research using COMSOL Multiphysics in the field of ultrasonic inspection aimed at developing new diagnostic methods and optimizing existing ones are proposed.

Keywords: COMSOL Multiphysics; ultrasonic testing; non-destructive testing; modeling; visualization; defects; waves.

Вступ

У сучасному світі, де безпека та надійність конструкцій відіграють критично важливу роль,

неруйнівний контроль (НК) є невід'ємною частиною виробничого процесу та експлуатації обладнання. Серед різноманітних методів НК ультразвуковий контроль (УЗК) займає особливе місце завдяки своїй

здатності виявляти дефекти на ранніх стадіях, не пошкоджуючи досліджуваній об'єкт.

УЗК ґрунтується на аналізі поширення ультразвукових хвиль у матеріалі та їх взаємодії з різноманітними дефектами, такими як тріщини, пори, включення тощо. Проте, інтерпретація отриманих сигналів може бути досить складною через вплив багатьох факторів, таких як властивості матеріалу, геометрія виробу, тип дефекту та інші.

У цьому контексті комп'ютерне моделювання відіграє вирішальну роль, надаючи фахівцям потужний інструмент для дослідження процесів поширення ультразвуку та їх взаємодії з дефектами. Моделювання дозволяє не тільки краще розуміти фізичну природу явищ, але й оптимізувати параметри контролю, розробляти нові методи діагностики та підвищувати ефективність інтерпретації результатів.

На сьогоднішній день існує кілька програмних продуктів, які використовуються для моделювання ультразвукового контролю, серед яких можна виділити Ansys, MATLAB, Abaqus, PZFlex та COMSOL Multiphysics. Кожен з них має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного інструменту залежить від поставлених завдань та вимог до моделі.

У даній роботі ми зосередимось на COMSOL Multiphysics, оскільки цей програмний пакет поєднує в собі потужність та функціональність з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та широкими можливостями для моделювання мультифізичних процесів, таких як поширення хвиль, теплопередача, механічні деформації тощо. Це робить його ідеальним інструментом для моделювання ультразвукового контролю.

Мета роботи

Показати місце COMSOL Multiphysics серед інших інструментів моделювання, таких як Ansys, MATLAB, Abaqus, PZFlex, шляхом порівняльного аналізу їх функціональності та можливостей. Надати комплексне уявлення про потенціал COMSOL Multiphysics для моделювання УЗК, демонструючи конкретні приклади його застосування для вирішення типових задач неруйнівного контролю, та сприяти його ширшому застосуванню в практиці.

Виклад основного матеріалу

Комп'ютерне моделювання відіграє значну роль у сфері НК, надаючи фахівцям потужний інструмент для підвищення ефективності та точності процесів діагностики. Воно дозволяє вирішувати широкий спектр завдань, від розробки та оптимізації методів контролю до навчання персоналу та зниження витрат [1].

Ключові переваги та сфери застосування комп'ютерного моделювання у НК:

1. Розробка та оптимізація методів контролю:

✓ Симуляція процесів: Комп'ютерне моделювання дозволяє створювати віртуальні моделі різних методів НК, таких як ультразвуковий, магнітопорошковий, вихрострумний та інші. Це дає змогу досліджувати особливості поширення фізичних полів (хвиль, магнітних полів тощо) у матеріалах з різними дефектами, що є особливо важливим для розуміння процесів, які відбуваються під час контролю.

✓ Оптимізація параметрів: За допомогою моделювання можна оптимізувати параметри контролю, такі як частота ультразвуку, сила магнітного поля, розташування датчиків тощо, для досягнення найкращої чутливості та роздільної здатності методу. Наприклад, моделювання може допомогти визначити оптимальну частоту ультразвуку для виявлення конкретного типу дефекту в даному матеріалі.

✓ Розробка нових методів: Моделювання допомагає в розробці нових, більш ефективних методів НК, враховуючи особливості конкретних матеріалів та типів дефектів. Наприклад, моделювання може бути використано для розробки нових алгоритмів обробки сигналів або для створення нових типів ультразвукових датчиків.

2. Аналіз та інтерпретація результатів:

✓ Візуалізація дефектів: Комп'ютерне моделювання дозволяє візуалізувати форму та розміри дефектів на основі отриманих сигналів контролю. Це полегшує ідентифікацію та класифікацію дефектів, особливо у випадках, коли сигнали є складними та неоднозначними.

✓ Оцінка характеристик: За допомогою моделювання можна оцінити такі характеристики дефектів, як розмір, орієнтація, тип тощо, що важливо для прогнозування їх впливу на міцність та довговічність конструкцій. Наприклад, моделювання може допомогти визначити, наскільки критичним є виявлений дефект для безпечної експлуатації об'єкта.

✓ Автоматична обробка даних: Комп'ютерне моделювання сприяє створенню алгоритмів автоматичної обробки та аналізу даних контролю, що зменшує вплив людського фактора та підвищує швидкість діагностики.

3. Навчання та підготовка персоналу:

✓ Віртуальні тренажери: За допомогою комп'ютерного моделювання можна створювати віртуальні тренажери для навчання фахівців з НК. Це дозволяє відпрацьовувати навички проведення контролю та інтерпретації результатів без ризику пошкодження реального обладнання або конструкцій.

✓ Імітація різних ситуацій: Моделювання дозволяє створювати різні ситуації контролю, включаючи складні випадки з дефектами різного типу та розміру, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу та підвищенню кваліфікації персоналу.

4. Зниження витрат та підвищення ефективності:

✓ Зменшення кількості експериментів: Комп'ютерне моделювання дозволяє зменшити кількість дорого вартісних та трудомістких експериментів з реальними зразками, оскільки багато досліджень може бути проведено віртуально.

✓ Прискорення розробки: Моделювання сприяє прискоренню розробки нових методів та обладнання для НК, оскільки дозволяє швидко та ефективно досліджувати різні варіанти та оптимізувати параметри.

✓ Підвищення якості контролю: Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє підвищити якість та достовірність результатів контролю, що забезпечує безпеку та надійність експлуатації обладнання та конструкцій.

Для вирішення цих завдань використовуються різні програмні пакети, такі як COMSOL Multiphysics, Ansys, MATLAB та інші. Проте, COMSOL Multiphysics вирізняється своїм інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, потужними інструментами для мультифізичного моделювання та широкими можливостями для інтеграції з іншими програмними продуктами, що робить його оптимальним вибором для моделювання ультразвукового неруйнівного контролю [2].

Огляд програмного забезпечення для моделювання УЗК

Сучасні методи ультразвукового контролю (УЗК) часто потребують комп'ютерного моделювання для оптимізації процесів, інтерпретації сигналів та розробки нових методів. Існує кілька програмних пакетів, які можуть бути використані для моделювання УЗК, кожен з яких має свої переваги та недоліки. У цьому розділі ми порівняємо COMSOL Multiphysics з іншими популярними програмами, такими як Ansys, MATLAB, Abaqus та PZFlex, та обґрунтуємо вибір COMSOL Multiphysics для моделювання УЗК.

Порівняльний аналіз програмного забезпечення.

MATLAB. Потужне середовище для математичного моделювання та обробки даних, яке може використовуватися для розробки власних алгоритмів та моделей для НК. Має широкий спектр функцій та інструментів для аналізу сигналів, обробки зображень та візуалізації даних. Але не є спеціалізованим програмним забезпеченням для моделювання УЗК. Потребує значних знань в області програмування та математики [3].

Ansys. Потужний та функціональний програмний пакет для інженерного аналізу, який включає широкий спектр інструментів для моделювання різних методів УЗК. Має модульну структуру, що дозволяє користувачам обирати лише ті модулі, які їм потрібні для конкретних завдань. Добре підходить для моделювання як простих, так і складних систем. Має недоліки: складний інтерфейс та потребує спеціальних знань для ефективного використання. Висока вартість [4,5].

Abqus. Потужний програмний комплекс для скінченно-елементного аналізу, який широко використовується в інженерному аналізі для моделювання поведінки конструкцій під впливом різних навантажень, включаючи акустичні. Має потужні інструменти для моделювання поширення хвиль. Серед недоліків: складний інтерфейс та потребує спеціальних знань. Висока вартість [4, 5].

PZFlex. Спеціалізоване програмне забезпечення, призначене для моделювання п'єзоелектричних та ультразвукових пристроїв. Має унікальні можливості для моделювання взаємодії ультразвукових хвиль з п'єзоелектричними перетворювачами. Недоліком є обмежена область застосування (лише п'єзоелектричні та ультразвукові пристрої) [6-8].

COMSOL Multiphysics. Переваги даного програмного забезпечення:

Мультифізичність: COMSOL Multiphysics спеціалізується на моделюванні мультифізичних процесів, що є дуже важливим для УЗК, де часто потрібно враховувати взаємодію різних фізичних явищ (наприклад, поширення ультразвуку в матеріалі та взаємодія з дефектами) [2].

Зручний інтерфейс: COMSOL має інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, що полегшує створення моделей та налаштування параметрів.

Широкі можливості: COMSOL пропонує широкий набір інструментів та модулів для моделювання різних методів УЗК, таких як ультразвуковий, магнітопорошковий, вихрострумний та інші.

Інтеграція з MATLAB: COMSOL має можливість інтеграції з MATLAB, що дозволяє використовувати потужні інструменти MATLAB для обробки та аналізу даних.

Недоліки: COMSOL є досить дорогим програмним забезпеченням, що може бути бар'єром для деяких користувачів; для складних моделей COMSOL може потребувати значних обчислювальних ресурсів.

З урахуванням всього цього представлена порівняльна таблиця 1 програм, які можуть бути використані для моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль.

Обґрунтування вибору COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics є оптимальним вибором для моделювання УЗК завдяки своїй мультифізичності, зручному інтерфейсу та широким можливостям. Він дозволяє моделювати складні процеси поширення ультразвуку в різних середовищах, враховувати взаємодію з різними типами дефектів та інтегруватися з іншими програмними продуктами для обробки та аналізу даних.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця для програм, які можна використовувати для неруйнівного контролю

Параметр	COMSOL Multiphysics	Ansys	MATLAB	Abaqus	PXFlex
Основне призна-чення	Мультифізичне моделювання	Інженерний аналіз та моделювання	Чисельні обчислення та алгоритмічне моделювання	Механіка суцільного середовища	Акустика та ультразвук
Методи розрахунку	Метод скінченних елементів (FEM)	Метод скінченних елементів (FEM), метод скінченних різниць (FDM)	Чисельні методи (FEM, FDM, FDTD)	Метод скінченних елементів (FEM)	Метод скінченних різниць у часі (FDTD)
Сфера застосування в НК	Ультразвуковий контроль, тепловізійний аналіз, магнітний контроль	Ультразвуковий контроль, електромагнітне моделювання, механічні тести	Обробка даних НК, розробка алгоритмів розпізнавання дефектів	Аналіз механічних напружень, руйнування матеріалів	Ультразвуковий контроль, п'єзоелектричні сенсори
Рівень складності	Високий	Високий	Середній	Високий	Середній
Графічний інтер-фейс	Інтуїтивний, але складний	Потужний, але складний для новачків	Обмежений, переважно кодовий інтерфейс	Висока складність	Інтуїтивний
Можливості програмування	MATLAB, Python	Python, C, APDL	MATLAB, Simulink	Python, Fortran	MATLAB, Python
Вартість	Висока	Висока	Відносно доступний (залежно від пакета)	Висока	Середня
Популярність у НК	Висока	Висока	Висока	Середня	Низька (з вузькою сферою застосування)

Незважаючи на відносно високу вартість та вимогливість до ресурсів, COMSOL Multiphysics є потужним та ефективним інструментом, який дозволяє вирішувати широкий спектр завдань ультразвукового контролю та сприяє розвитку цієї галузі.

Модулі та інструменти COMSOL Multiphysics для моделювання акустичних хвиль

COMSOL Multiphysics включає ряд спеціалізованих модулів для моделювання акустичних хвиль, серед яких найбільш значущими є:

Acoustics Module – дозволяє моделювати акустичні хвилі в повітрі, рідинах і твердих тілах;

Structural Mechanics Module – забезпечує моделювання вібраційних ефектів і механічної взаємодії хвиль;

Multiphysics Coupling – дає змогу комбінувати різні фізичні явища, наприклад, взаємодію акустики з електромагнітними або термічними полями.

COMSOL Multiphysics дозволяє ефективно моделювати різні типи ультразвукових хвиль:

Поздовжні хвилі – використовуються у традиційних методах ультразвукового контролю;

Поперечні хвилі – застосовуються для виявлення тріщин і неоднорідностей у матеріалах;

Поверхневі хвилі (Rayleigh waves) – ефективні для контролю покриттів та виявлення дефектів у поверхневих шарах матеріалів.

Однією з ключових можливостей COMSOL є симуляція взаємодії ультразвукових хвиль з різними типами дефектів, що включає: тріщини та пори; включення чужорідних матеріалів; ламінацію в композитах; корозійні пошкодження.

Це дозволяє проводити точний аналіз розсіювання хвиль, визначати локалізацію дефектів та оцінювати їх критичність.

COMSOL Multiphysics підтримує моделювання ультразвукових хвиль у різних середовищах:

Тверді тіла – для аналізу хвильового процесу в металах, кераміці, полімерних матеріалах;

Рідини – для дослідження ультразвукових методів діагностики та тестування біологічних тканин.

Також COMSOL Multiphysics забезпечує широкі можливості інтеграції з іншими програмними засобами:

MATLAB – для автоматизації розрахунків, постпроцесингу даних та розробки спеціалізованих алгоритмів аналізу;

LabVIEW – для створення комплексних експериментальних стендів та обробки результатів вимірювань в реальному часі;

Python API – для розширення функціоналу та взаємодії з іншими програмними рішеннями [2].

Візуалізація та аналіз ультразвукового контролю за допомогою COMSOL Multiphysics

Дане дослідження спрямоване на візуалізацію та аналіз процесів ультразвукового контролю (УЗК) з використанням програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. COMSOL дозволяє моделювати різні аспекти УЗК, такі як поширення ультразвукових хвиль, взаємодія з дефектами, робота датчиків. Можливості даного програмного продукту безмежні [9–11]. В даній статті продемонстровано лише найпростіший приклад і основні можливості, які можуть бути використані для моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль для різних задач. На рис. 1 зображено модель, що включає алюмінієвий зразок та п'єзoeлектричний перетворювач (ПЕП). Для збудження ультразвукових хвиль використано модульований гаусів імпульс з частотою 1,5 МГц. Моделювання здійснюється за допомогою мультифізичного інтерфейсу Piezoelectric

Waves, Time Explicit, який поєднує Elastic Waves, Time Explicit та Electrostatics для опису поведінки п'єзoeлектричних матеріалів. З метою мінімізації відбиттів від меж з'язка, на його лівому та правому торцях застосовано поглинаючі шари та низьковідбиваючі граничні умови. Результати моделювання представлені на рис.2–7.

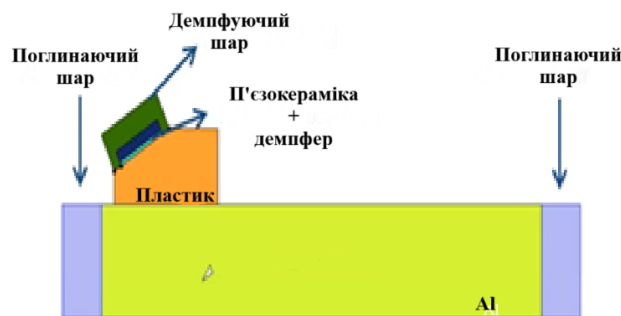


Рис. 1 – Модель розповсюдження ультразвукових хвиль у зразку [2]

На рис. 2 представлено розподіл величини швидкості ультразвукових хвиль у різні моменти часу. За допомогою цієї візуалізації можна проаналізувати поширення хвиль у зразку та їх взаємодію з дефектом, що, в свою чергу, дозволяє зрозуміти вплив дефекту на характеристики сигналу, що приймається датчиком.

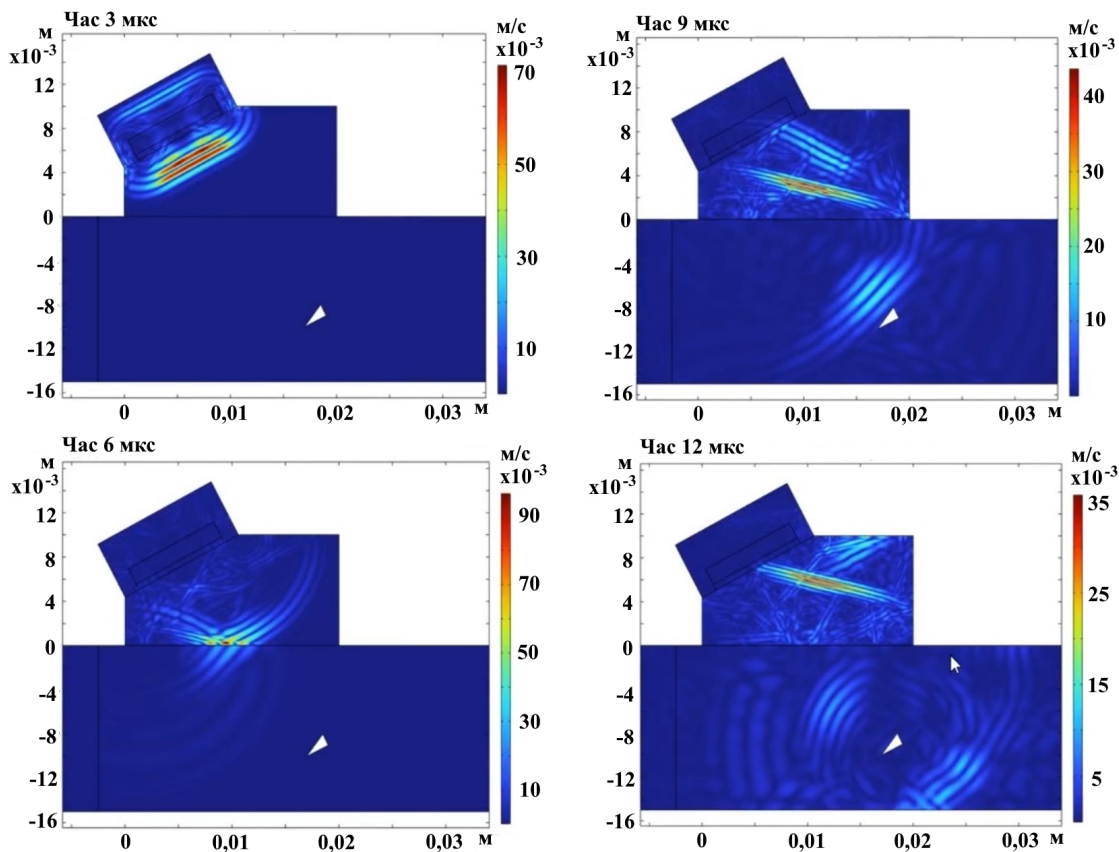


Рис. 2 – Розповсюдження ультразвукових хвиль в різні моменти часу: 3,6, 9 та 12 мкс [2]

На рис.3 зображено результати моделювання розподілу ультразвукових хвиль у зразку з дефектом у певний момент часу. Це допомагає зрозуміти, як хвилі взаємодіють з дефектами та як це впливає на характеристики сигналу, що приймається датчиком. Також COMSOL дозволяє моделювати різні типи дефектів та досліджувати, як вони впливають на розподіл тиску ультразвукових хвиль. Це допомагає

розробляти методи виявлення дефектів за допомогою ультразвукового контролю. Порівнюючи ці зображення, які відрізняються часом, можна побачити, як хвилі поширюються в просторі та як вони взаємодіють з дефектом. Таким чином, можна отримати уявлення про динаміку процесу ультразвукового контролю.

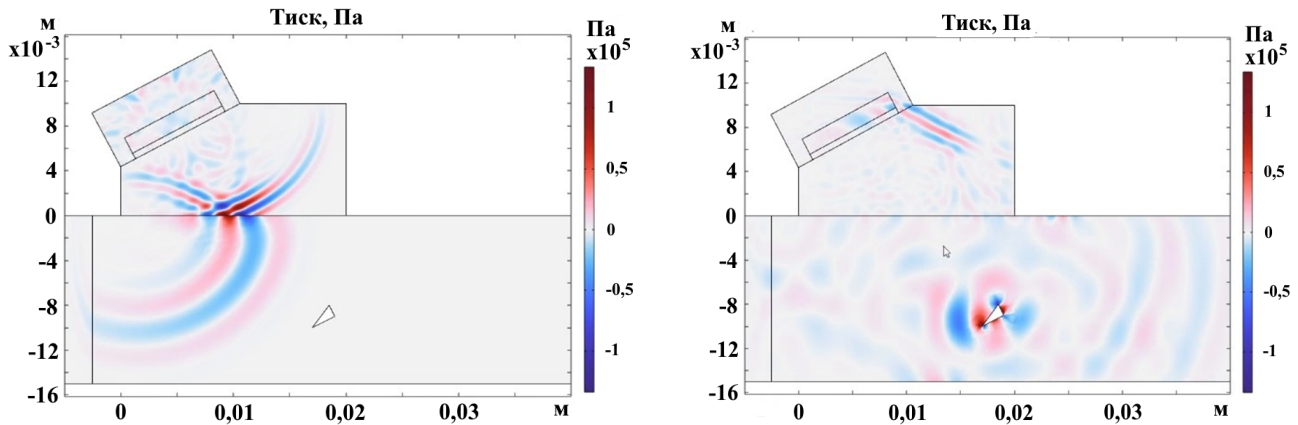


Рис. 3 – Розподіл тиску ультразвукових хвиль у зразку в різний час розповсюдження (лівий – $6 \cdot 10^{-6}$ с, правий – $10.133 \cdot 10^{-6}$ с) [2]

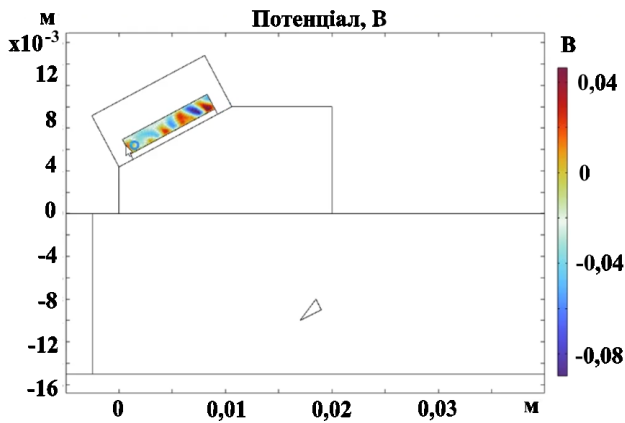


Рис. 4 – Розподіл потенціалу в ультразвуковому датчику в певний момент часу ($2 \cdot 10^{-5}$ с) [2]

На рис. 4 зображено розподіл електричного потенціалу в ультразвуковому датчику в певний момент часу. На рисунку видно, як потенціал розподілений в п'єзоелектричному елементі датчика. COMSOL дозволяє моделювати поведінку п'єзоелектричних матеріалів та аналізувати їх роботу під впливом механічних напружень та електричних полів.

На рис. 5 зображено розподіл тиску в певний момент часу, що дана функція допомагає зрозуміти, як деформації впливають на роботу ультразвукового датчика та дозволяє детально аналізувати поведінку п'єзоелектричних матеріалів під впливом механічних напружень та електричних полів.

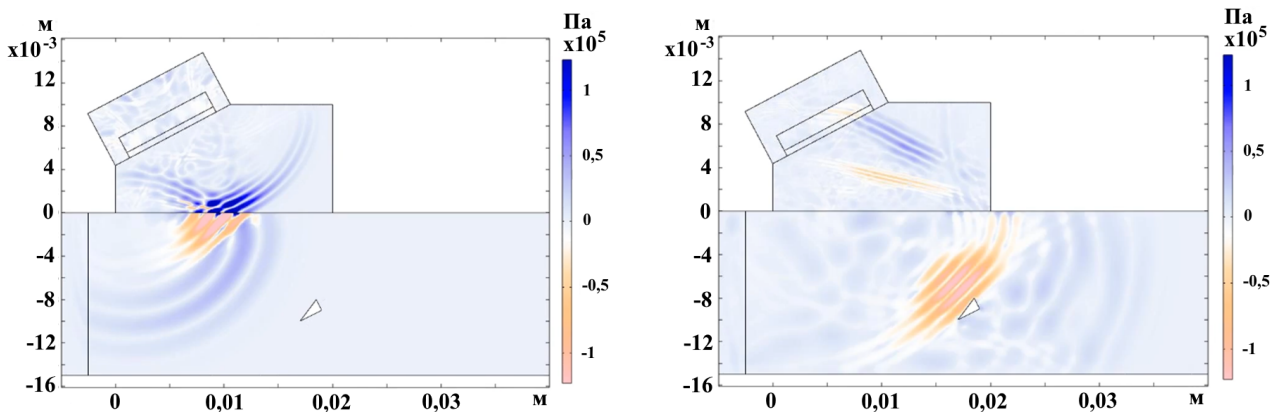


Рис. 5 – Розподіл тиску в різний час розповсюдження (лівий – $6 \cdot 10^{-6}$ с, правий – $9.2 \cdot 10^{-6}$ с) [2]

Цей рисунок показує розподіл тиску, викликаний напруженнями в датчику. Візуалізація розподілу тиску допомагає зрозуміти, як деформації впливають на роботу ультразвукового датчика. Для повного аналізу необхідно розглядати всі компоненти датчика, а також розподіл інших фізичних величин, таких як частота та швидкість хвиль.

На рис. 6 показано сигнал, що генерується ультразвуковим датчиком під час контролю матеріалу. Аналізуючи форму, тривалість та частоту сигналу, можна отримати інформацію про властивості матеріалу та наявність дефектів.

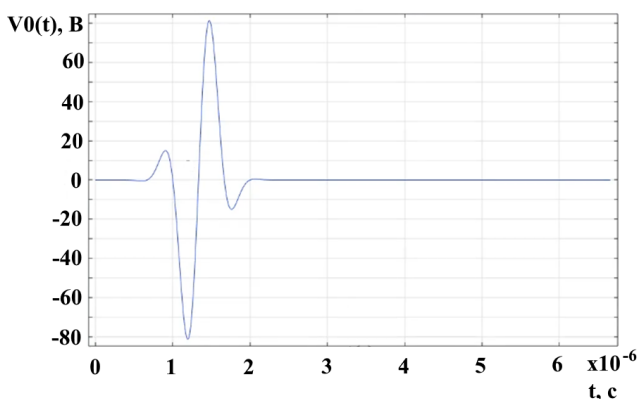


Рис. 6 – Залежність входної напруги (V) від часу (t) для ультразвукового датчика [2]

На рис. 7 зображено графіки залежності вихідної напруги від часу для двох випадків: без дефекту та з дефектом.

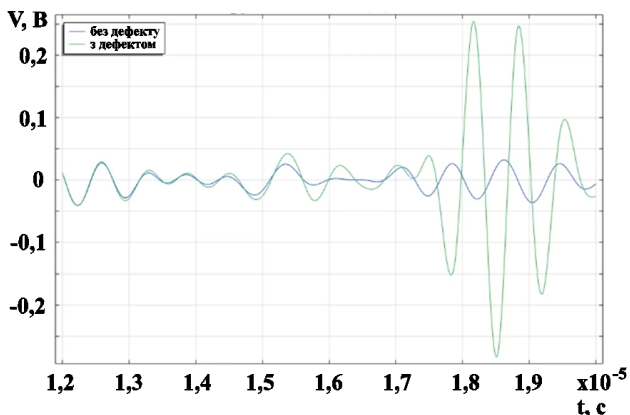


Рис. 7 – Залежність вихідної напруги (V) від часу (t) (без дефекту – зелений колір, з дефектом – синій) [2]

COMSOL дозволяє порівнювати результати моделювання для різних випадків, наприклад, з дефектом та без дефекту, використовувати різні матеріали для моделювання, зразки і перетворювачі різної форми і параметрів. А також дозволяє аналізувати характеристики сигналів, такі як частота, форма. Порівнюючи результати моделювання, можна розробляти методи виявлення дефектів та підвищувати точність ультразвукового контролю.

Можливості даної програми досить широкі, тому можна запропонувати декілька напрямків подальших досліджень: моделювання більш складних геометрій та дефектів, оптимізація параметрів ультразвукового контролю, розробка нових методів ультразвукового контролю, інтеграція COMSOL з іншими методами неруйнівного контролю [12].

Використання COMSOL для навчання та підготовки фахівців. Завдяки можливості моделювання різних аспектів УЗК, COMSOL є корисним інструментом для інженерів, дослідників та фахівців з УЗК, який допомагає їм покращити розуміння процесу УЗК та підвищити його ефективність.

Обговорення результатів

Моделювання ультразвукового контролю в COMSOL Multiphysics дозволило отримати детальну інформацію про процеси поширення ультразвукових хвиль, їх взаємодію з дефектами та межами розділу середовищ. На рис. 2–7 представлені результати моделювання, які демонструють можливості COMSOL для візуалізації та аналізу різних аспектів ультразвукового контролю.

На рис. 2 і 3 можна побачити, як ультразвукові хвилі поширюються в зразку. За допомогою кольорової шкали візуалізовано розподіл величини швидкості (рис. 2) та тиску (рис. 3) ультразвукових хвиль. COMSOL дозволяє моделювати різні типи дефектів та досліджувати, як вони впливають на розподіл тиску ультразвукових хвиль, що допомагає розробляти методи виявлення дефектів.

На рис. 4 зображено розподіл потенціалу та рис. 5 – механічних напружень в ультразвуковому датчику в певний момент часу. COMSOL дозволяє моделювати поведінку п'єзоелектричних матеріалів, які використовуються в ультразвукових датчиках, та аналізувати їх роботу під впливом механічних напружень та електричних полів.

На рис. 6 і 7 представлено графіки залежності вихідного сигналу від часу. На рисунку 6 показано сигнал, що генерується ультразвуковим датчиком під час контролю матеріалу. На рис. 7 порівнюються сигнали для двох випадків: без дефекту та з дефектом. COMSOL дозволяє порівнювати результати моделювання для різних випадків, використовувати різні матеріали для моделювання, зразки і перетворювачі різної форми і параметрів. А також дозволяє аналізувати характеристики сигналів, такі як амплітуда, частота, форма.

В рамках даного дослідження було проведено моделювання ультразвукового контролю в COMSOL Multiphysics. За допомогою програми було візуалізовано поширення хвиль, розподіл тиску, потенціалу та механічних напружень. Також було проведено аналіз впливу дефектів на характеристики сигналів ультразвукового контролю. Результати моделювання підтвердили, що COMSOL є потужним

інструментом для дослідження та розробки методів неруйнівного контролю.

Результати моделювання в COMSOL Multiphysics демонструють, що ця програма є потужним інструментом для дослідження та аналізу ультразвукового контролю. COMSOL дозволяє візуалізувати поширення хвиль, розподіл тиску, електричного потенціалу та інші фізичні величини, що допомагає зрозуміти процеси, що відбуваються під час контролю. Програма також дозволяє порівнювати результати моделювання для різних випадків та аналізувати характеристики сигналів, що допомагає розробляти методи виявлення дефектів та підвищувати точність ультразвукового контролю.

Висновки

Проведено аналіз можливостей COMSOL Multiphysics для моделювання ультразвукового контролю. Серед різних програмних продуктів, таких як Ansys, MATLAB, Abaqus та PZFlex, було обрано COMSOL Multiphysics завдяки його мультифізичності, зручному інтерфейсу та широким можливостям для моделювання та аналізу. COMSOL дозволяє моделювати складні процеси поширення ультразвуку в різних середовищах, враховувати взаємодію з різними типами дефектів та інтегруватися з іншими програмними продуктами для обробки та аналізу даних.

Продемонстровано основні можливості COMSOL для моделювання ультразвукового контролю, включаючи візуалізацію поширення хвиль, розподілу тиску, потенціалу та напружень. За допомогою COMSOL було проведено моделювання та аналіз впливу дефектів на характеристики сигналів ультразвукового контролю.

Результати моделювання підтверджують, що COMSOL Multiphysics є потужним інструментом для дослідження та розробки методів неруйнівного контролю, зокрема ультразвукового. COMSOL дозволяє детально досліджувати процеси, що відбуваються під час контролю, та оптимізувати параметри контролю для досягнення максимальної ефективності.

Список літератури

1. Кравченко І. В., Микитенко В. І., Тимчик Г. С. *Комп'ютерне моделювання: системи і процеси: підручник* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
2. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. COMSOL AB, 2023. URL: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf (дата звернення: 25.10.2023).
3. *PTC Mathcad Prime 4.0 User's Guide*. PTC Inc., 2017. URL: <https://www.ptc.com/en/support/mathcad/documentation> (дата звернення: 26.10.2023).
4. Салам Буссі. Особливості використання механізмів електромагнітно-акустичного перетворення при

- контролі якості прокатних виробів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2019. № 11. С. 70–75.
5. Івіцька А. В. *Розробка методу та засобів електроємнісного неруйнівного контролю полімерних композиційних матеріалів*: магістерська дисертація. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.
 6. Harvey G., Gachagan A. Noninvasive field measurement of low-frequency ultrasonic transducers operating in sealed vessels. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2006. Vol. 53. No. 10. P. 1749–1758. doi:10.1109/TUFFC.2006.171.
 7. Wang D. *Characterising the Effects of Power Ultrasonic Devices on Surrogate Tissue Materials*: PhD thesis. Glasgow: University of Glasgow, 2014. 226 p.
 8. Qiao S., Jackson E., Coussios C. C., Cleveland R. O. Simulation of nonlinear propagation of biomedical ultrasound using PZFlex and the Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov Texas code. *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. Vol. 140. P. 2039–2046. doi:10.1121/1.4962791.
 9. Wei Z., Weavers L. K. Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. Vol. 31. P. 490–498. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.036.
 10. Rokad V., Pandya D. H. Development of 3D improved acoustic transient model for vibro cleaner using COMSOL multiphysics. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44(1). P. 732–736. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.635.
 11. Rokad V., Pandya D. H. Erosive investigation of various erosion models for vibro cleaner developed based on ultrasonic technique using COMSOL multiphysics. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2021. Vol. 13(2). P. 33-41. doi: 10.4314/ijest.v13i2.4.
 12. Zaitseva L., Gorkunov B. Theoretical Aspects of Excitation and Reception of Acoustic Waves for Non-Destructive Testing of Electromechanical and Conversion Systems. In: *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. IEEE, October 2023. P. 10312998–10312998. doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312998.

References (transliterated)

1. Kravchenko I. V., Mykytenko V. I., Tymchuk H. S. *Kompiuternye modelirovaniya: sistemy i protsesy: podruchnik [Computer Modeling: Systems and Processes: Textbook]*, Kyiv. KPI im. Ighoria Sikorskoho, 2022.
2. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. COMSOL AB, 2023. Available at: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf (accessed: 25.10.2023).
3. *PTC Mathcad Prime 4.0 User's Guide*. PTC Inc., 2017, Available at: <https://www.ptc.com/en/support/mathcad/documentation> (accessed: 26.10.2023).
4. Salam Bussi. Osoblyvosti vykorystannia mekhanizmiv elektromagnitno-akustychnoho peretvorennia pry kontroli yakosti prokatnykh vyrobiv [Features of Using Electromagnetic-Acoustic Conversion Mechanisms for Quality Control of Rolled Products]. *Visnyk NTU "KhPI"*. Seriya: *Innovatsiini tekhnologii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii*, 2019, № 11, pp. 70–75.
5. Ivitska A. V. *Rozrobka metodu ta zasobiv elektroemnisnogo neruinyvnoho kontroliu polimernykh kompozitsiynykh*

- materialiv: mahisterska dysertatsiia [Development of a Method and Tools for Capacitance-Based Non-Destructive Testing of Polymeric Composite Materials: Master's Thesis].* Kyiv. KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2017.
- Harvey G., Gachagan A. Noninvasive field measurement of low-frequency ultrasonic transducers operating in sealed vessels. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2006, Vol. 53, no. 10, pp. 1749–1758, doi:10.1109/TUFFC.2006.171.
 - Wang D. *Characterising the Effects of Power Ultrasonic Devices on Surrogate Tissue Materials: PhD thesis*, Glasgow. University of Glasgow, 2014, 226 p.
 - Qiao S., Jackson E., Coussios C. C., Cleveland R. O. Simulation of nonlinear propagation of biomedical ultrasound using PZFlex and the Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov Texas code. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2016, Vol. 140, pp. 2039–2046, doi:10.1121/1.4962791.
 - Wei Z., Weavers L. K. Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, Vol. 31, pp. 490–498, doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.01.036.
 - Rokad V., Pandya D. H. Development of 3D improved acoustic transient model for vibro cleaner using COMSOL multiphysics. *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 44(1), pp. 732–736, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.635.
 - Rokad V., Pandya D. H. Erosive investigation of various erosion models for vibro cleaner developed based on ultrasonic technique using COMSOL multiphysics. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2021, Vol. 13 (2), pp. 33-41, doi: 10.4314/ijest.v13i2.4.
 - Zaitseva L., Gorkunov B. Theoretical Aspects of Excitation and Reception of Acoustic Waves for Non-Destructive Testing of Electromechanical and Conversion Systems. In: *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. IEEE, October 2023, pp. 10312998–10312998, doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312998.

Відомості про авторів (About authors)

Зайцева Лілія Василівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних системи контролю та діагностики; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4405-1531; e-mail: Liliia.zaitseva@khpi.edu.ua.

Zaitseva Liliia – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Computer and Radio-electronic Systems for Testing and Diagnostics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4405-1531; e-mail: Liliia.zaitseva@khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Зайцева Л. В. COMSOL Multiphysics для моделювання ультразвукових хвиль: можливості, застосування та приклади. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 2 (24). С. 49-57. doi:10.20998/2413-4295.2025.02.07.

Please cite this article as:

Zaitseva L. COMSOL Multiphysics for modeling ultrasonic waves: opportunities, applications and examples. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 2(24), pp. 49-57, doi:10.20998/2413-4295.2025.02.07.

*Надійшла (received) 08.01.2025
Прийнята (accepted) 12.06.2025*