

УДК 658.562:620.179.16:620.179.17

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.01

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МОДИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО – АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ТРУБАХ ІЗ ТОВСТОЮ СТІНКОЮ

А. Г. АЛЕКСІЇВ, Г. М. СУЧКОВ*, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ

кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА
*e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

АНОТАЦІЯ Найбільш поширеним методом контролю якості труб являється ультразвуковий. На відміну від традиційного ультразвукового контролю останнім часом використовують електромагнітно – акустичний метод збудження і прийому ультразвукових імпульсів, який має суттєві переваги, в тому числі, при використанні хвиль нормального типу: Релея, Лемба тощо. Однак такі хвилі мають дисперсійні властивості, оскільки їхні швидкості поширення залежать від товщини стінок труб, а також від частоти ультразвуку, що потребує раціонального підходу щодо встановлення їхніх параметрів. Показано, що для використання хвиль Лемба мод SV_1 або SV_2 , які мають підвищену чутливість щодо виявлення дефектів труб, необхідно, для даного матеріалу труб, побудувати дисперсійні залежності швидкості поширення ультразвукових хвиль від добутку товщини стінки труби на частоту ультразвукових коливань. За дисперсійними залежностями необхідно визначити частоту ультразвукових хвиль, за величиною якої встановлюється довжина хвилі, яка буде використовуватися для проведення контролю. Визначена довжина хвилі Лемба є базовою для створення меандрової високочастотної котушки індуктивності з кроком, що дорівнює довжині ультразвукової хвилі даної моди. Окрім хвиль Лемба доцільно також використовувати хвилі Релея з довжиною, близькою до товщини об'єкту контролю. Такі хвилі називають квазірелеєвськими і вони не схильні до дисперсії. Вони мають перевагу при контролі труб в експлуатації, оскільки існує знос товщини стінки труби і розрахована частота ультразвукових імпульсів Лемба не буде відповідати раціональним умовам контролю. Визначені теоретичні передумови дають можливість розрахувати крок високочастотної котушки індуктивності електромагнітно-акустичного перетворювача. Приклади розрахунків були виконані для товщин стінок труб у діапазоні 8...16 мм, які найбільш часто використовуються у промисловості. Результати теоретичних і практичних досліджень були перевірені та підтверджені експериментами на розробленому стенді на зразках труб з моделями дефектів у вигляді наскрізних отворів і пропилів. Таким чином показано, що для конкретних умов ультразвукового контролю з використанням безконтактного електромагнітно-акустичного методу збудження і прийому пакетних імпульсів необхідно визначити який тип хвилі доцільно використати і на основі цього розробляти технологію дефектоскопії.

Ключові слова: труба; дефект; ультразвуковий контроль; електромагнітно-акустичний; хвилі Релея і Лемба; дисперсія

JUSTIFICATION FOR THE SELECTION OF ULTRASONIC WAVE MODES AND PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS FOR THE RATIONAL DETECTION OF DEFECTS IN THICK-WALLED PIPES

A. ALEKSIIV, H. SUCHKOV, S. PLIESNETSOV

Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The most widespread method of quality control of pipes is ultrasonic testing. Unlike traditional ultrasonic inspection, in recent years the electromagnetic-acoustic method of excitation and reception of ultrasonic pulses has been used, which has significant advantages, including when using normal-type waves: Rayleigh, Lamb, etc. However, such waves possess dispersive properties, since their propagation velocities depend on the pipe wall thickness as well as the ultrasonic frequency, which requires a rational approach to determining their parameters. It is shown that to use Lamb waves of modes SV_1 or SV_2 , which exhibit increased sensitivity to detecting pipe defects, it is necessary for the given pipe material to construct dispersion curves of the ultrasonic wave propagation speed as a function of the product of pipe wall thickness and ultrasonic frequency. Based on these dispersion curves, the ultrasonic wave frequency must be determined, from which the wavelength used for testing is established. The defined Lamb wavelength is the basis for creating a meander-type high-frequency inductive coil with a pitch equal to the wavelength of the corresponding mode. In addition to Lamb waves, it is advisable to use Rayleigh waves with a wavelength close to the wall thickness of the inspected object. Such waves are called quasi-Rayleigh waves and are not subject to dispersion. They offer advantages when inspecting pipes in operation, since wall thickness wear occurs and the previously calculated Lamb wave ultrasonic frequency will no longer correspond to the rational inspection conditions. The theoretical prerequisites make it possible to calculate the pitch of a high-frequency inductive coil of the electromagnetic-acoustic transducer. Examples of calculations were performed for pipe wall

thicknesses in the range 8...16 mm, which are most used in industry. The results of theoretical and practical studies were verified and confirmed by experiments on a developed stand using pipe samples with defect models in the form of through-holes and slots. Thus, it is shown that under specific conditions of ultrasonic inspection using a contactless electromagnetic-acoustic method of excitation and reception of pulse packets, it is necessary to determine which wave type is advisable to use and, based on this, develop the defectoscopy technology.

Keywords: pipe; defect; ultrasonic testing; electromagnetic-acoustic; Rayleigh and Lamb waves; dispersion

Вступ

Електромагнітно-акустичний (ЕМА) метод збудження і прийому ультразвукових (УЗ) імпульсів у металовиробах [1,2] допускає наявність діелектричного прошарку між безконтактним ультразвуковим перетворювачем і поверхнею об'єкта контролю (ОК) на відміну від традиційного методу ультразвукового контролю (УЗК) із застосуванням п'єзоперетворювачів [1,3,4], чутливість яких великою мірою залежить від якості та стабільності передачі ультразвукових імпульсів через контактну рідину [1,3]. Тому результати УЗК ЕМА методом практично не залежать від зовнішніх умов та стану ОК [5–8].

У той же час, як вважається деякими фахівцями, ефективність ЕМА методу являється недостатньою [1,9]. При цьому під ефективністю ЕМА перетворювачів (ЕМАП) вважається отримане в результаті подвійного ЕМА перетворення (збудження-прийм УЗ імпульсів) відношення амплітуд сигнал/завада [5,6], тобто чутливість ЕМАП. Недостатня чутливість ЕМАП може мати місце при УЗК металовиробів значної довжини, в тому числі труб з значною (більше 15 мм) товщиною стінки, наприклад, магістральних нафто-і газопроводів, листового прокату, корпусів суден і цистерн [3–5,10]. Це пов'язано із розтіканням магнітного потоку в об'ємі масивного феромагнітного ОК і відповідним зменшенням амплітуди збуджуваних ультразвукових імпульсів, яка квадратично залежить від величини індукції поляризуючого магнітного поля ЕМАП [11,12].

Серед доволі нових методів УЗК довгомірних ОК почав використовуватися хвилеводний спосіб [4,13,14]. Перші розробки використовували контактний метод контролю довгомірних ОК або введення і прийом УЗ імпульсів через повітряний прошарок [1].

Останнім часом ведуться розробки з використанням ЕМА методу збудження і прийому ультразвукових імпульсів у феромагнітних ОК, розвинутих в одному напрямку. Аналіз нових розробок [5,10,13] показує, що підвищення чутливості ЕМА перетворення може бути отримано як за рахунок раціонального вибору моди ультразвукових коливань [13], оптимізації намагнічуючої системи ЕМАП [11,12] та застосування нових методів генерації ультразвукових хвиль [14–16]. Важливим питанням є використання мод нормальних ультразвукових коливань з найменшими значеннями загасання і дисперсії швидкості розповсюдження у ОК [13]. Тому потрібні

значні експериментальні дослідження поширення УЗ коливань різних мод у об'єктах значної довжини, які збуджуються безконтактним ЕМА методом. Особливо це важливо при хвилеводному УЗК ОК з великою товщиною стінки, що являється складною задачею, пов'язаною із поширенням поляризуючого магнітного поля в об'ємі феромагнітних металовиробів.

Оскільки питання УЗК довгомірних виробів важливе для промисловості нашої країни з розгалуженою системою транспортування нафти і газу, його необхідно виконувати відповідно до законодавства України [17,18].

Мета роботи

Обґрунтування вибору мод ультразвукових хвиль та параметрів електромагнітно – акустичних перетворювачів для проведення контролю якості труб з товстими стінками.

Виклад основного матеріалу

Обґрунтування вибору моди ультразвукових хвиль для раціонального виявлення дефектів в трубах з товстою стінкою

Для хвилепровідного методу контролю, як правило, застосовують хвилі Лемба (нормальна хвиля у шарі ОК з вільними поверхнями, що характеризується хвилепровідним механізмом поширення і збуджується при жорстких співвідношеннях між товщиною h шару металовиробу та частотою f ультразвукових коливань, а також фазової і групової швидкості. Швидкість розповсюдження цих хвиль залежить від величини hf [1].

Для УЗК також можуть використовуватися хвилі Релея (поверхнева хвиля, що характеризується еліптичним рухом частинок металовиробу та ефективною глибиною проникнення у поверхню металу меншою, ніж довжина ультразвукової хвилі), або нормальні поперечні хвилі (поперечна хвиля, в якій частинки середовища коливаються перпендикулярно площині падіння) [2].

Хвилі Лемба поділяються на дві групи: симетричні й асиметричні (рис.1).

У симетричних хвилях рух елементів середовища відбувається симетрично щодо середньої лінії перетину виробу ($z=0$, рис. 1а), а асиметричних – асиметрично щодо площини ($z=0$, рис. 1б).

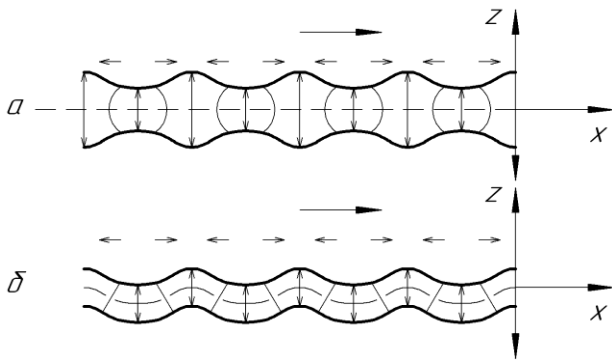


Рис. 1 – Схематичне зображення руху частинок середовища в пластині при розповсюдженні в них симетричної (а) та асиметричної (б) хвиль Лемба; стрілками показано напрямки коливань частинок матеріалу по осях x і z [2]

У пластині завтовшки $h/2$ при частотах f може поширюватися певне кінцеве число симетричних та асиметричних хвиль Лемба, що відрізняються одна

від однієї фазовими та груповими швидкостями та розподілом зміщень та напружень по товщині h пластини. Кількість мод тим більше, чим більше значення $h/V_{\text{фаз}}$, де $V_{\text{фаз}}$ – фазова швидкість розповсюдження зсувних хвиль в даному матеріалі ОК. Дисперсійні криві, що показують залежність фазових швидкостей ультразвукових хвиль від товщини виробу та частоти збуджуваних ультразвукових хвиль [2], наведені на рис. 2.

При хвилеводному контролі об'єктів із товщиною стінки до 8...12 мм можна використовувати моду 1 або 2 хвилі Лемба бо вони мають високі відношення сигнал/завада для встановленого значення частоти заповнення ультразвукових імпульсів [13].

Для об'єктів із товщиною стінки понад 8 мм доцільно використовувати хвилю Релея із довжиною хвилі до 6 мм на частоті близько 500 кГц.

В ідеальному випадку хвиля Релея поширюється поблизу поверхні «товстого» металовиробу (проти довжини ультразвукової хвилі).

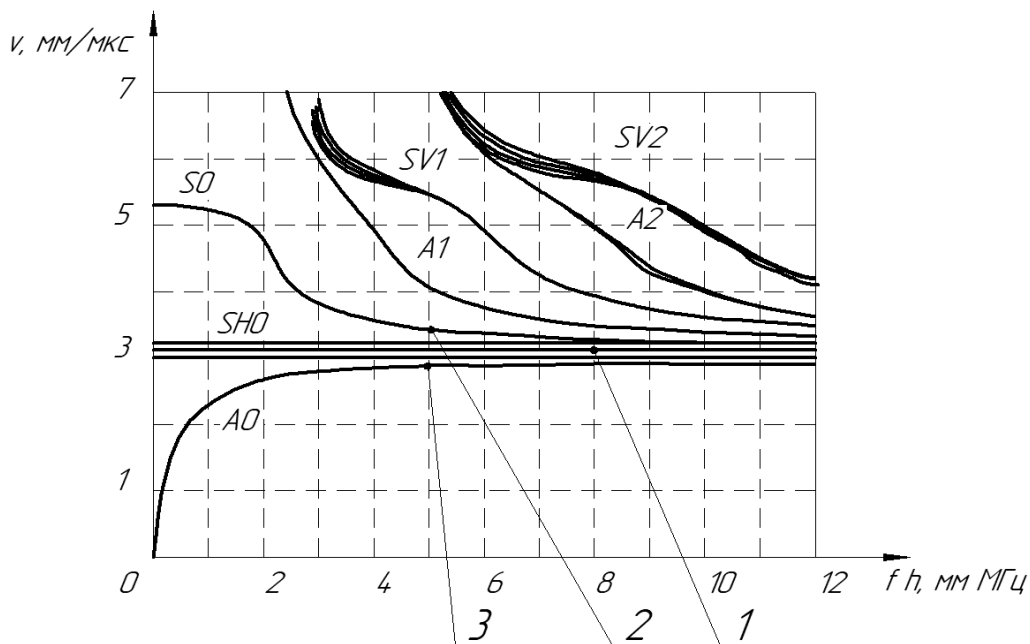


Рис. 2 – Дисперсійні залежності та фазові швидкості ультразвукових хвиль нормального типу [2]

Довгомірний феромагнітний об'єкт, що має кінцеву товщину, порівнянну з довжиною хвилі, напівпростором не є. Тому для коректного розгляду питання необхідно проаналізувати дисперсійні криві (рис. 2). При товщині шару h , що відповідає значенням кривої 2 більше відміченої точкою 1 на рис. 2, фазова швидкість (отже і умови збудження хвилі Релея, а не хвилі Лемба) практично збігаються з фазовою швидкістю нульової симетричної (SH0) і нульовий асиметричної (A0) нормальних хвиль, які випромінюються з практично однаковими швидкостями. При товщині

шару h металу менше відміченої точкою 2, хвиля Релея «розділяється» на нормальні хвилі, але їхні швидкості помітно відрізняються (точки 2 і 3 на рис. 2). Поширюючись, хвилі A0 та S0 взаємодіють одна з одною. Поблизу від випромінюючого ультразвукового перетворювача, де різниця фаз між ними близька до нуля, їх сумарне ультразвукове поле подібно до ультразвукового поля хвилі Релея, тому визначену сукупність хвиль A0 та S0 можна назвати «квазірелеївською». Таким чином можна зробити висновок про доцільність використання

«квазірелеївської» хвилі для контролю труб з товщиною стінки більше 8...10 мм з урахуванням пружних властивостей матеріалу ОК.

Для експериментальних досліджень було розроблено стенд, спрощена блок-схема якого наведена на рис. 3.

У складі стенду: 1 – зразок труби; 2 – ультразвуковий електромагнітно-акустичний перетворювач; 3 – генератор зондуючих імпульсів струму для живлення ЕМАП; 4 – підсилювач ультразвукових імпульсів; 5 – реєструючий прилад; 6 – блок синхронізації елементів стенду.

На рис. 4 наведено зображення височастотних котушок ЕМАП, що збуджують і приймають ультразвукові імпульси квазірелеївських хвиль.

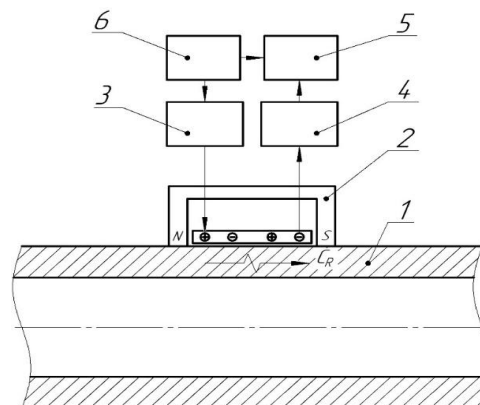
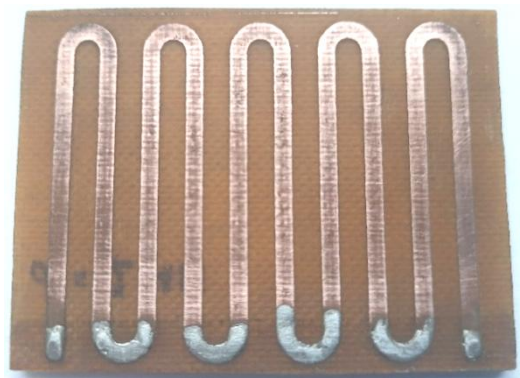
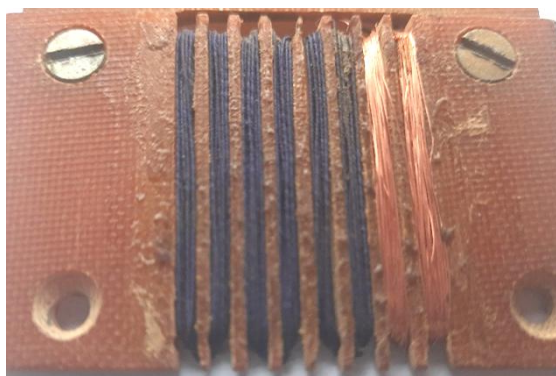


Рис. 3 – Спрощена блок-схема стенда для досліджень з використанням квазірелеївських хвиль та хвиль Лемба для виявлення дефектів труб



а



б

Рис. 4 – Зображення плоских височастотних котушок ЕМАП з періодичною структурою для збудження і прийому квазірелеївських ультразвукових імпульсів хвиль та хвиль Лемба, що виготовлена шляхом травлення (а) та шляхом намотування тонким дротом (б)

Як дослідні зразки використано відрізки труб з товщиною стінки 9, 11 та 16 мм, виготовлених з трубної сталі.

Стенд працює наступним чином. Блок 6 включає генератор зондуючих імпульсів струму, який живить ЕМАП 2. Взаємодія магнітного і електромагнітного полів в поверхневому шарі зразка 1 збуджує ультразвукові імпульси, що розповсюджуються вздовж поверхні ОК 1. За наявності в зразку 1 дефектів ультразвукові імпульси відбиваються, приймаються ЕМАП 2 і посилюються блоком 4. Прийняті ультразвукові імпульси відображаються блоком 5. Експериментальні дослідження довгомірних феромагнітних труб різного діаметру, з різною товщиною з моделями дефектів у вигляді канавок і наскрізних свердлінь на зовнішніх поверхнях труб показали, що хвилю Релея можна успішно використовувати на ОК з товщиною стінки більше 12...16 мм. При цьому відбиті з виробу ультразвукові імпульси не розділяються. Тобто отримуємо однозначний результат щодо виявлення

моделей дефектів.

При ультразвукових дослідженнях феромагнітних труб з товщинами стінки 9, 11 та 16 мм отримані результати, які наведені на рис. 5.

Аналіз результатів наведених на рис. 5а показує, що при товщині стінки труби 9 мм відбиті від дефектів імпульси суттєво розділяються на два, як для імпульсів мод А0, так і для S0. При товщинах стінки труби 11 мм розділення імпульсів цих мод незначне. Тобто реєструється квазірелеївська хвиля. Така різниця обумовлена дисперсією розповсюдження мод імпульсів хвиль Лемба. Ці хвилі, при відомих їх швидкостях, також можна використовувати при контролі об'єктів з товщиною стінки менше 11 мм. При товщині стінки труби менше 10 мм хвилі мод А0 і S0 остаточно розділяються і від одного дефекту реєструються два сигнали (рис. 3а). В той же час використання імпульсів хвиль Релея не приводить до розділення імпульсів відбитих від дефектів в стінці труби товщиною 16 мм.

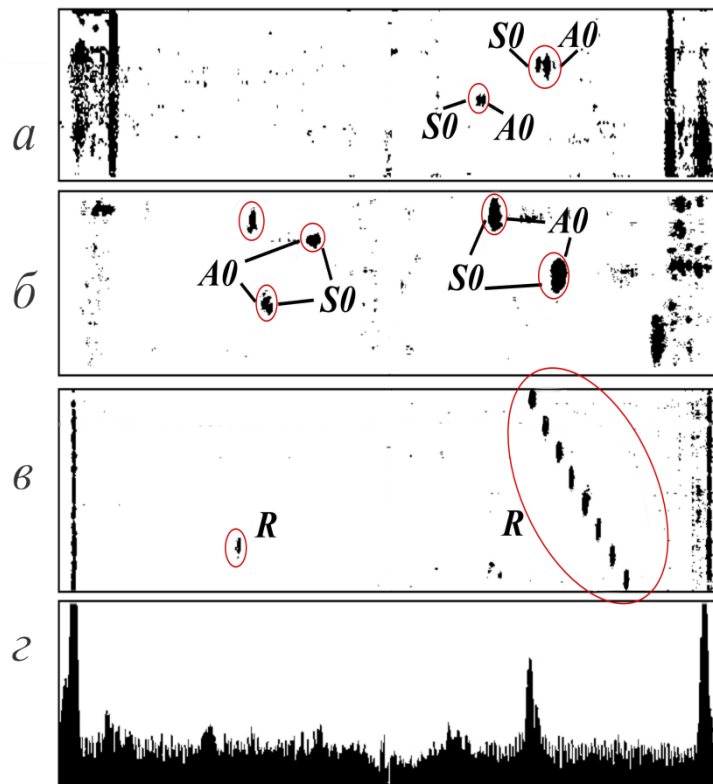


Рис. 5 – Результати досліджень труб з моделями дефектів: а – результати контролю труби з товщиною стінки 9 мм; б – результати контролю труби з товщиною стінки 11 мм; в – результати контролю імпульсами хвиль Релея труби з товщиною стінки 16 мм; г – типова розгортка на екрані реєструючого приладу (А-скан)

Розрахунок геометричних параметрів ЕМА перетворювачів для обраної ультразвукової моди.

Форма і кількість витків ультразвукового ЕМА перетворювача визначається конкретною постановкою задачі щодо виявлення дефектів в ОК. Як було вказано високочастотна котушка ЕМАП повинна мати періодичну структуру з кроком, що відповідає довжині квазірелеєвської ультразвукової хвилі або моди хвиль Лемба, вибраної для проведення контролю. Крок витків котушки визначає моду, яка буде збуджуватися і прийматися ЕМАП при відомій товщини стінки труби. Високочастотна котушка виготовляється шляхом укладання лакованого мідного дроту товщиною 0,1...0,2 мм на каркас чи підкладку або шляхом травлення фольгованого склотекстоліту, рис. 4, причому кількість витків котушки зворотно пропорційна частоті вибраної моди ультразвукової хвилі.

Для розрахунку геометричних характеристик ультразвукових ЕМА перетворювачів, необхідно встановити товщину стінки об'єкта контролю, потім за дисперсійними залежностями (рис. 2) визначити частоту ультразвукових коливань, що

забезпечує контроль квазірелеєвськими хвилями або хвилями Лемба, фазову швидкість для обраної моди ультразвукової хвилі, і розрахувати за формулою $\lambda = V_{\text{фаз}} / f$ її довжину. За відповідності ширини кроку меандру (рис. 4) та визначеної довжини ультразвукової хвилі ефективність як прямого, так і зворотного ЕМА перетворень буде максимальна і, відповідно буде максимальна амплітуда прийнятих імпульсів по відношенню до завад. Наприклад, при збудженні моди SV1 на ОК з товщиною стінки труби 8 мм необхідно вибрати найбільш полого ділянку на дисперсійній кривій, що відповідає даній моді, рис. 2. На цій ділянці виберемо робочу точку, в якій $V_{\text{фаз}} = 5,8$ мм/мс, а співвідношення $fh=4$, тобто $f=500$ кГц, а $\lambda = 11,6$ мм. Тоді для збудження та прийому моди SV1 хвилі Лемба необхідно виготовити котушку у формі меандру з кроком періоду близько 12 мм і сформувані в ній струм збудження ультразвукових пакетних [15] імпульсів з частотою 500 кГц. Параметри первинних ЕМА перетворювачів для збудження мод SV1 і SV2 хвилі Лемба та нормальної поперечної хвилі SH0 наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку частоти та довжини хвиль для відомих товщин стінок труб необхідних для конструювання височастотних котушок ЕМАП для збудження імпульсів ультразвукових мод SV1, SV2 хвиль Лемба та квазірелеєвської хвилі [15]

УЗ хвилі	$f \cdot h$, МГц · мм	$V_{фаз}$, мм/мкс	f , МГц	Товщина h стінки труби, мм				
			λ , мм	8	10	12	14	16
SV 1	4	5,8	f	0,48	0,4	0,33	0,28	0,25
			λ	11,6	14,5	17,5	20,7	23,2
SV 2	7,8	5,7	f	0,97	0,78	0,65	0,56	0,48
			λ	5,8	7,3	8,8	10,2	11,9
Квазірелеєвська	7,8	3	f	0,97	0,78	0,65	0,56	0,48
			λ	3	3,9	4,6	5,4	6,25
Квазірелеєвська	6	3	f	0,75	0,6	0,5	0,43	0,37
			λ	4	5	6	6,9	8,1
SHO	4	3	f	0,5	0,4	0,33	0,29	0,25
			λ	6	7,5	9,1	10,3	12

Обговорення результатів

Теоретичний розгляд, на основі дисперсійних залежностей показує, що для ультразвукового контролю перспективними є моди хвиль Лемба SV1 і SV2, оскільки вони мають високу чутливість до виявлення дефектів труб при їх поширенні вздовж утворюючої. Важливе значення для ультразвукового контролю мають квазірелеєвські хвилі з причини, що їхні швидкості поширення не залежать від товщини стінки труби.

Конкретні розрахунки конструкцій ЕМАП показують, що при зміні товщини стінки труби зміняться $V_{фаз}$ і λ , тому необхідно, керуючись дисперсійними кривими, рис. 2, заново обрати частоту імпульсу струму, що збуджує ультразвукову хвилю. Так, при зміні товщини стінки труби з 8 мм до 10 мм необхідно знизити частоту живлення ЕМАП з 500 кГц до 400 кГц. Довжина хвилі λ при цьому збільшиться з 11,6 мм до 14,5 мм. Використовувати меандр з періодом 12 мм все ще можна, але співвідношення сигнал/шум у такому разі зменшиться у кілька разів.

Висновки

Встановлено, що для якісного ультразвукового хвилепровідного контролю труб з відомими товщинами стінки необхідно використовувати хвилі Лемба симетричного або не симетричного типу.

У випадку ультразвукового контролю труб, в яких можливі зміни товщини стінки доцільно використовувати імпульси квазірелеєвських хвиль.

Наведено перелік технологічних операцій для розрахунку конструкції ЕМАП при відомій товщині стінки труби і правило вибору частоти ультразвукових хвиль.

Список літератури

1. Цапенко В. К., Куц Ю. В. *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*: підручник. Київ: НТУУ «КПІ». 2010. 448 с.
2. Петрищев О. Н. *Теоретичні основи розрахунку та проєктування ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу*: автореф. дис. д.т.н. Київ: НТУУ «КПІ». 2009. 36 с.
3. Карпаш М. О., Рибіцький І. В., Котурбаш Т. Т., Бондаренко О. Г., Карпаш О. М. *Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі*. Монографія. Вид-во: ІФНТУНГ. 2012. 420 с.
4. Троїцький В. О. *Борис Патон фондатор науки з дефектоскопії та моніторингу конструкцій*. НК інформ. Київ. Вид-во Інтерсервіс. 2023. 60 с.
5. Плеснецов С. Ю. *Розвиток методів та засобів для електромагнітно-акустичного контролю стрижневих, трубчастих та листових металовиробів*: автореф. дис. д-ра техн. наук: спец. 05.11.13 «Прилади та методи контролю та визначення складу речовин». Харків. 2021. 40 с.
6. Десятніченко О. В. *Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями*: дис. канд. техн. наук: 05.11.13. Харків. 2015. 172 с.
7. Салам Буссі, Плеснецов С. Ю. Практичні розробки електромагнітно-акустичних перетворювачів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2019. 26 (1351). С. 57–65.
8. NORDINKRAFT. URL: <https://www.nordinkraft.de/> (дата звернення: 12.09.2025).
9. Сучков Г. М., Мигушенко Р. П., Плеснецов С. Ю., Плеснецов Ю. О., Курандо О. І., Алексіїв А. Г., Бороденко О. М., Бутенко О. І., Рибалко А. О. Підвищення чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю, вимірювання і діагностики феромагнітних металовиробів за рахунок збільшення величини індукції магнітного поля (огляд). *Технічна електродинаміка*. 2025. 2. С. 85–95. doi: 10.15407/techned2025.02.085.
10. Сучков Г. М., Катасонов Ю. А., Гарькавий В. В.

- Возможности бесконтактных электромагнитных методов неразрушающего контроля качества труб. Питання розвитку газової промисловості України. Вип. XXVIII. *Діагностування трубопроводів, технологічного і енергомеханічного обладнання нафтової та газової промисловості*. УкрНДІГаз, 2000. С.102–109.
11. Bolyukh V. F., Suchkov G. M., Mygushchenko R. P., Kalnytskyi M. E. Determination of parameters of an autonomous source of a constant magnetic field for a portable electromagnetic-acoustic transducer. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. 4. P. 72–79. doi: 10.20998/2074-272X.2025.4.09.
 12. Suchkov G. M., Bolyukh V. F., Kocherga A. I., Mygushchenko R. P., Kropachek O. Yu. Increasing the Efficiency of the Surface-Mounted Ultrasonic Electromagnetic-Acoustic Transducer Due to the Magnetic Field Source. *Технічна електродинаміка*. 2. 2023. С. 3–8. doi: 10.15407/techned2023.02.003.
 13. Jianpeng He, Steve Dixon, Samuel Hill, Ke Xu. A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate. *Sensors*. 2017. Vol. 17(5). P. 10–23. doi: 10.3390/s17051023.
 14. Ohtsuka Y., Yoshimura T., Ueda Y. P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*. 2007. P. 1609–1612. doi: 10.1109/ULTSYM.2007.405.
 15. Pechenkov A. N., Shcherbinin V. E., Smorodinskiy J. G. Analytical model of a pipe magnetization by two parallel linear currents. *NDT. & E International*. 2011. Vol. 44. 8. P. 718–720. doi: 10.1016/j.ndteint.2011.07.014.
 16. Pei C., Zhao S., Xiao P., Chen Z. A modified meander-line-coil EMAT design for signal amplitude enhancement. *Sens. Actuators A Phys.* 2016. 247. 539–546. doi: 10.1016/j.sna.2016.07.006.
 17. Закон України № 3715-VI від 05.12.2012 «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема за напрямком «Приладобудування, як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробництва». *Відомості Верховної Ради (ВВР)*, 2024, № 3, ст. 21. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/3534-20#Text> (дата звернення: 22.08.2025).
 18. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року: від 15.03.2006р. № 145-р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua>. (дата звернення: 25.08.2025).
 4. Troitskiy V. O. *Borys Paton fundator nauky z defektoskopii ta monitorynhu konstruktсии [Borys Paton as the founder of defectoscopy and structural monitoring science]*. Kyiv, Interservis, 2023, 60 p.
 5. Pliesnetsov S. Yu. *Rozvytok metodiv ta zasobiv dlia elektromahnitno-akustychnoho kontroliu stryzhnevyykh, trubchastykh ta lystovykh metalovyrobiv [Development of methods and means for electromagnetic-acoustic testing of rod, tubular and sheet metal products]*. Extended abstract of Doctor's thesis, specialty 05.11.13 «Devices and methods of control and determination of substance composition». Kharkiv, 2021, 40 p.
 6. Desiatnichenko O. V. *Elektromahnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychnymi pokryttiamy [Electromagnetic-acoustic thickness gauge for inspection of metal products with dielectric coatings]*. PhD thesis, specialty 05.11.13. Kharkiv, 2015, 172 p.
 7. Salam Bussi, Pliesnetsov S. Yu. *Praktychni rozrobky elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv [Practical developments of electromagnetic-acoustic transducers]*. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]*, 2019, no. 26 (1351), pp. 57–65.
 8. NORDINKRAFT. Available at: <https://www.nordinkraft.de/> (accessed 12.09.2025).
 9. Suchkov H. M., Myhushchenko R. P., Pliesnetsov S. Yu., Pliesnetsov Yu. O., Kurando O. I., Aleksiiv A. H., Borodenko O. M., Butenko O. I., Rybalko A. O. Pidvyshchennia chutlyvosti elektromahnitno-akustychnykh peretvoriuvachiv dlia kontroliu, vymiriuvannia i diahnostryky feromahnitnykh metalovyrobiv za rakhunok zbilshennia velychyny induktsii mahnitnoho polia (ohliad) [Increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic transducers for inspection, measurement and diagnostics of ferromagnetic metal products by increasing magnetic field induction (review)]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical Electrodynamics]*, 2025, no. 2, pp. 85–95, doi:10.15407/techned2025.02.085.
 10. Suchkov H. M., Katasonov Yu. A., Harkavyi V. V. *Vozmozhnosti beskontaktnykh elektromagnitnykh metodov nerazrushaiushchego kontrolya kachestva trub [Possibilities of contactless electromagnetic methods for non-destructive quality control of pipes]*. Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy. Issue XXVIII. *Diahnostuvannia truboprovodiv, tekhnolohichnoho i enerhomekhanichnoho obladdannia naftovoi ta hazovoi promyslovosti [Issues of development of the gas industry of Ukraine. Diagnostics of pipelines, technological and power-mechanical equipment of oil and gas industry]*. Kharkiv, UkrNDIGaz, 2000, pp. 102–109.

References (transliterated)

1. Tsapenko V. K., Kuts Yu. V. *Osnovy ultrazvukovoho neruinivnogo kontroliu [Fundamentals of ultrasonic non-destructive testing]*. Kyiv, NTUU «KPI», 2010, 448 p.
2. Petryshchev O. N. *Teoretychni osnovy rozrakhunku ta proektuvannia ultrazvukovykh peretvoriuvachiv elektromahnitnoho typu [Theoretical foundations of calculation and design of electromagnetic-type ultrasonic transducers]*. Extended abstract of Doctor's thesis. Kyiv, NTUU «KPI», 2009, 36 p.
3. Karpash M. O., Rybitskiy I. V., Koturbash T. T., Bondarenko O. H., Karpash O. M. *Akustychnyi kontrol konstruktсии ta ustatkuvannia u naftohazovii haluzi [Acoustic inspection of structures and equipment in the oil and gas industry]*. Ivano-Frankivsk, IFNTUUNH, 2012, 420 p.
11. Bolyukh V. F., Suchkov G. M., Mygushchenko R. P., Kalnytskyi M. E. Determination of parameters of an autonomous source of a constant magnetic field for a portable electromagnetic-acoustic transducer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, 4, pp. 72–79, doi: 10.20998/2074-272X.2025.4.09.
12. Suchkov H. M., Bolyukh V. F., Kocherga A. I., Mygushchenko R. P., Kropachek O. Yu. Increasing the efficiency of the surface-mounted ultrasonic electromagnetic-acoustic transducer due to the magnetic field source. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical Electrodynamics]*, 2023, no. 2, pp. 3–8, doi:10.15407/techned2023.02.003.
13. Jianpeng He, Steve Dixon, Samuel Hill, Ke Xu. A New Electromagnetic Acoustic Transducer Design for Generating

- and Receiving S0 Lamb Waves in Ferromagnetic Steel Plate. *Sensors*, 2017, vol. 17(5), pp. 10–23, doi: 10.3390/s17051023.
14. Ohtsuka Y., Yoshimura T., Ueda Y. P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2007, pp. 1609–1612, doi: 10.1109/ULTSYM.2007.405.
15. Pechenkov A. ., Shcherbinin V. E., Smorodinskiy J. G. Analytical model of a pipe magnetization by two parallel linear currents. *NDT. & E International*, 2011, vol. 44, 8, pp. 718–720, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.07.014.
16. Pei C., Zhao S., Xiao P., Chen Z. A modified meander-line-coil EMAT design for signal amplitude enhancement. *Sens. Actuators A Phys.*, 2016, 247, 539-546, doi:10.1016/j.sna.2016.07.006.
17. Law of Ukraine No. 3715-VI of 05 December 2012 Pro priorityetni napriamy innovatsiinoi diialnosti v Ukraini [On Priority Areas of Innovation Activity in Ukraine], in particular «Instrument engineering as the basis of high-tech modernization of all branches of production». *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine]*, 2024, no. 3, art. 21. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/3534-20#Text> (accessed 22.08.2025).
18. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 145-r of 15 March 2006 *Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku [On approval of the Energy Strategy of Ukraine until 2030]*. Available at: <http://zakon.rada.gov.ua> (accessed 25.08.2025).

Відомості про авторів (About authors)

Алексій Антон Геннадійович – аспірант, кафедра інформаційно – вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0001-1878-526X; e-mail: anton7aleks@gmail.com.

Aleksii Anton – post-graduate student, Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0009-0001-1878-526X; e-mail: anton7aleks@gmail.com.

Сучков Григорій Михайлович – доктор технічних наук, професор, кафедра інформаційно – вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1805-0466; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Suchkov Hryhorii – Doctor of Science, Professor, Professor at the Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-1805-0466; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Плєснецов Сергій Юрійович – доктор технічних наук, кафедра інформаційно – вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8428-5426; e-mail: Serhii.Pliesnetsov@khpі.edu.ua.

Pliesnetsov Serhii – Doctor of Science, Docent at the Department of Information and Measurement Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0001-8428-5426; e-mail: Serhii.Pliesnetsov@khpі.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Алексій А. Г., Сучков Г. М., Плєснецов С. Ю. Обґрунтування вибору моди ультразвукових хвиль та параметрів електромагнітно – акустичних перетворювачів для раціонального виявлення дефектів у трубах із товстою стінкою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 3-10. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.01.

Please cite this article as:

Aleksii A., Suchkov H., Pliesnetsov S. Justification for the selection of ultrasonic wave modes and parameters of electromagnetic-acoustic transducers for the rational detection of defects in thick-walled pipes. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 3–10, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.01.

*Надійшла (received) 01.02.2026
Прийнята (accepted) 14.03.2026
Опублікована (published) 02.04.2026*