

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МАЩЕНКО Володимир Андрійович



УДК 620.17 (043.3)

**ПРИЛАДОВІ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МОДУЛІВ
ПРУЖНОСТІ ТА КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА КОНСТРУКЦІЙНИХ
ПОЛІМЕРНИХ ТА ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ**

05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне).

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Коробко Іван Васильович,
директор навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

доктор технічних наук, професор
Подчашинський Юрій Олександрович,
завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Державного університету «Житомирська політехніка»,

доктор технічних наук, професор
Середюк Орест Євгенович,
професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Захист відбудеться 18 вересня 2025 р. об 11:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226, головний навчальний корпус.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,

доктор технічних наук, професор



Химко О.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із важливих завдань сучасної метрологічної науки є підвищення точності вимірювання динамічних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона конструкційних полімерних матеріалів. Полімерні матеріали сьогодні широко використовують у різних технічних системах і для надійного функціонування таких систем важливо, щоб їх елементи мали необхідні в'язкопружні властивості.

Особливо важливим є розроблення ефективних методів та засобів визначення механічних характеристик гетерогенних матеріалів, які перебувають під дією руйнівних навантажень, у потенційно небезпечних технічних об'єктах. У такому випадку ключовим питанням метрології є вибір методів і засобів вимірювання динамічних модулів пружності таких матеріалів, що дозволить прогнозувати їх працездатність при критичних режимах.

Забезпечення високоточних вимірювань коефіцієнта Пуассона та динамічних модулів пружності полімерних матеріалів може бути реалізовано за допомогою класичних методик із застосуванням різних типів і мод акустичних коливань, зокрема поздовжніх, поперечних ультразвукових хвиль та поверхневих хвиль Релея. Водночас розвиток електроніки та інформаційних технологій дозволяє суттєво розширити можливості використання акустичних методів за рахунок нових методів обробки сигналів та автоматизації вимірювань. Отже, удосконалення методів вимірювання коефіцієнта Пуассона та динамічних модулів пружності полімерних матеріалів, а також розроблення систем вимірювання на основі сучасних цифрових засобів та алгоритмів опрацювання сигналів є актуальними науково-прикладними завданнями, вирішення яких дає можливість розв'язати комплексну проблему підвищення точності вимірювання параметрів конструкційних полімерних матеріалів для забезпечення функціональності та надійності вузлів і елементів конструкцій промислових апаратів та розроблення приладових систем для вимірювання модулів пружності гетерогенних матеріалів для моніторингу стану технічних об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, а також пов'язана з держбюджетною тематикою Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі «Біомеханіка зубощелепної системи, верхніх та нижніх кінцівок: математичне моделювання та практичні рекомендації» (номер держреєстрації 0119U002007, 2018–2020 р.), «Розробка, дослідження електротехнічних і автоматизованих систем та їх елементів» (номер держреєстрації 0123U105012, 2023–2028 р.). Приладова система для визначення динамічних модулів пружності гетерогенних матеріалів та окремі положення дисертаційної роботи розроблені та виконані в межах науково-дослідної роботи «Фізичні закономірності геодинамічних процесів техногенного характеру у геотехнічних системах» (номер держреєстрації 0113U002682, 2012–2013 р.).

Мета роботи та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методів і засобів вимірювання модулів пружності

конструкційних полімерних матеріалів та гетерогенних геоматеріалів, що забезпечать підвищення точності та швидкодії, розширення функціональних можливостей шляхом розробки та застосування теоретичних основ і принципів побудови приладових системи на основі аналогово-цифрових інтерфейсів передачі даних та програмного забезпечення для їх обробки.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання досліджень:

- проаналізувати сучасний стан розвитку методів і засобів вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона та провести класифікацію наявних методів вимірювання;
- розробити автоматизовану приладову систему для вимірювання амплітуди резонансних коливань та визначення динамічного модуля пружності в'язкопружних полімерних матеріалів;
- розробити приладові системи на основі імерсійного методу вимірювань швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль у конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалах для вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль у геоматеріалах у напруженому стані;
- провести математичне моделювання процесів відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі поділу різних середовищ у всьому діапазоні можливих значень коефіцієнта Пуассона;
- удосконалити методологію визначення критичного кута за імерсійного методу вимірювання швидкості поширення поперечної хвилі в матеріалі за рахунок точності вимірювання та фізичних принципів поведінки акустичних хвиль на межі поділу середовищ із різним акустичним імпедансом у всьому діапазоні можливих значень коефіцієнта Пуассона;
- розвинути теоретичні засади методики визначення динамічного коефіцієнта Пуассона за допомогою поздовжніх, поперечних хвиль та поверхневих хвиль Релея;
- розробити приладову систему для збудження та прийому поверхневих хвиль Релея для конструкційних матеріалів із від'ємними значенням коефіцієнта Пуассона;
- проаналізувати похибки вимірювань механічних величин для відомих та розроблених методів, зокрема модулів пружності та коефіцієнта Пуассона конструкційних та гетерогенних матеріалів.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання механічних величин для визначення коефіцієнта Пуассона та комплексних динамічних модулів пружності: модуля Юнга, модуля зсуву, модуля об'ємної деформації й модулів пружності третього порядку.

Предметом дослідження є методи й приладові системи для вимірювання модулів пружності другого та третього порядку й коефіцієнта Пуассона різного типу матеріалів та обробки даних, отриманих у результаті процесу вимірювань.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети в роботі використовуються такі методи досліджень:

- методи системного аналізу для дослідження поведінки складних об'єктів вимірювань, розроблення конструкції елементів приладових систем та прийняття рішень у приладових системах у процесі вимірювання;

- методи математичної фізики для моделювання процесів коливання в'язкопружного стрижня як об'єкта вимірювань під час збурювальної дії;

- методи математичного моделювання для отримання функціональних залежностей параметрів моделі відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль різних типів на межі поділу середовищ із комплексним використання програми MATLAB для інженерно-фізичних розрахунків та програми символічної математики Maple;

- статистичні методи обробки даних результатів багатократних вимірювань;

- методи теорії похибок, методи обробки зображень та методи розробки програмних додатків та для алгоритмізації програмних кодів для мікроконтролера приладових систем.

Наукова новизна отриманих результатів. Найбільш суттєві результати отримані автором особисто й визначаються такими положеннями:

- уперше розроблено методологію вимірювання амплітуди резонансних коливань консольно закріпленого полімерного стрижня на звукових частотах, що базується на обробці цифрового зображення, яка дала можливість підвищити точність визначення головної резонансної частоти коливань зразка і, відповідно, підвищити точність визначення його динамічного модуля пружності.

- уперше отримані регресійні аналітичні залежності амплітуди резонансних максимумів зразків конструкційного полівінілхлориду від частоти за різних температур та регресійна залежність частоти головного максимуму від температури, що дає можливість прогнозувати значення динамічних модулів пружності за різних температур.

- подальшого розвитку отримали теоретичні моделі процесів відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі рідини та твердого тіла з від'ємними значеннями коефіцієнта Пуассона і на межі твердих тіл із додатними та від'ємними значеннями коефіцієнта Пуассона, що дало можливість розробити алгоритми визначення критичних кутів під час вимірювання швидкості поширення поперечної хвилі в матеріалах із від'ємним коефіцієнтом Пуассона.

- уперше розроблено концепцію приладової системи на основі імерсійного методу вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль і коефіцієнтів їх поглинання в конструкційних полімерних матеріалах та гетерогенних геоматеріалах, яка відрізняється тим, що вимірювання амплітуди та часу проходження імпульсу ультразвукового сигналу покладено на апаратну та програмну складові приладової системи, і таким чином зменшено похибку визначення динамічних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона.

- уперше запропоновано визначати дійсну й уявну частини динамічного коефіцієнта Пуассона через швидкості поширення поздовжніх та поперечних

хвиль та коефіцієнтів їх затухання, що дало можливість їх вимірювання імерсійним методом із похибкою, що не перевищує 6 %;

- уперше отримано розв’язок рівняння Релея для матеріалів із від’ємним значенням коефіцієнта Пуассона, що дало змогу вдосконалити метод збудження та прийому хвиль Релея гребінчастою структурою та побудувати приладову систему для вимірювання швидкості поверхневої акустичної хвилі Релея та значень дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона за його мінімальної величини;

- уперше запропоновано концепцію приладової системи для вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль у зразках гетерогенних геоматеріалів за одновісного напруження, прикладеного в різних напрямках поширення ультразвукових хвиль, що базується на теоретичних моделях процесів відбивання, заломлення та трансформації УЗ-хвилі залежно від фізичних параметрів контактуючих середовищ, що дало змогу визначити модулі пружності третього порядку.

Практичне значення отриманих результатів:

- використання розробленого алгоритму обробки цифрових зображень дає можливість зменшити похибку визначення амплітуди коливань стрижня до 0,9 % при основній резонансній частоті коливань;

- на основі запропонованої методології вимірювання амплітуди коливань розроблено приладову систему для визначення динамічного модуля пружності конструкційних полімерних матеріалів з точністю, що не перевищує 1,9 %;

- розроблена приладова система для вимірювання модуля пружності при резонансних коливаннях консольно закріпленого полімерного стрижня дає можливість доповнити частотний діапазон динамічних методів вимірювань в межах від 10 Гц до 150 Гц;

- на основі теоретичних моделей процесів відбивання заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі рідини та твердого тіла з від’ємним значенням коефіцієнта Пуассона розроблена приладова система для імерсійних вимірювань дала можливість вимірювати значення динамічного коефіцієнта Пуассона та модулів пружності полімерних ауксетиків;

- застосування розробленої концепції приладової системи для імерсійних вимірювань дало можливість повністю виключити суб’єктивний фактор при визначенні критичного кута, при вимірюваннях швидкості поширення поперечної хвилі, за рахунок реалізації автоматизації процесу вимірювань, які покладені на апаратну і програмну складові;

- застосування розробленої приладової системи для імерсійних вимірювань дало можливість виміряти модулі пружності гетерогенних геоматеріалів та оцінити, на основі моделі поверхневих дефектів, поверхневу енергію руйнування;

- на основі удосконаленого методу збудження та прийому хвиль Релея гребінчастою структурою розроблена та реалізована приладова система для вимірювання швидкості поширення поверхневої хвилі в полімерному ауксетику з коефіцієнтом Пуассона рівним – 1;

- розроблено приладову систему для вимірювання швидкостей поздовжніх та поперечних хвиль у гетерогенних геоматеріалах при

одновісному напружені, прикладеному у різних напрямках поширення ультразвукових хвиль. Результати визначення модулів пружності третього порядку дають можливість враховувати нелінійні ефекти при динамічних деформаціях гетерогенних геоматеріалів в напрямку поширення хвилі.

Упровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на науково-виробничій фірмі «Продекологія» (м. Рівне) та у навчальний процес Національного університету водного господарства та природокористування.

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено двома патентами України на корисну модель: № 136643 (2019 р.), № 144077 (2020 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, у роботі використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача.

Особистий внесок здобувача в наукових працях, що опубліковані в співавторстві зі списку публікацій за темою дисертації: [1] – підготовлено Розділи 2–4; [2] – підготовлено Розділи 1, 3, 4; [3] – запропонована кореляційна залежність між логарифмами відносних значень фізичних параметрів полімерних матеріалів; [4] – запропонована методика вимірювань та проведені розрахунки параметрів поверхневої хвилі Релея; [5] – проведені вимірювання швидкостей поширення поздовжніх і поперечних акустичних хвиль для гетерогенних геоматеріалів із різним ефективним значенням коефіцієнта Пуассона та модулів пружності; [6] – запропоновано приладову систему та методику вимірювань амплітуди резонансних коливань та виміряні модулі пружності конструкційних полімерних матеріалів; [7] – запропоновано методику дослідження термодинамічного стану неідеально пружних гірських порід та проведені комплексні вимірювання модулів пружності; [8] – розроблена методика та проведені вимірювання модулів пружності полімерних ауксетиків; [9] – запропонована методика вимірювання швидкостей поширення акустичних хвиль та коефіцієнта Пуассона в полімерних ауксетиках; [10] – проведені вимірювання швидкостей поширення поздовжніх та поперечних хвиль та коефіцієнта Пуассона в полімерних акустиках; [11] – отримано розв’язок рівняння Релея для матеріалів із від’ємним коефіцієнтом Пуассона; [12] – проведені вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона гетерогенних геоматеріалів; [13] – запропоновано метод оцінки поверхневої енергії; [14] – запропоновані принципи побудови приладової системи для експериментальних вимірювань швидкостей поширення поздовжньої та поперечної хвиль у твердих тілах; [15] – запропонована модель заломлення акустичних хвиль на межі ауксетик-середовища; [16] – запропонована модель відбивання та збудження акустичних хвиль на межі ауксетик-середовища; [17] – запропоновані принципи побудови приладової системи, обґрунтовані її конструктивні параметри та метрологічні характеристики; [18] – запропонована модель відбивання акустичних хвиль від межі ауксетик-середовища; [19] – проведено аналіз параметрів задачі падіння ультразвукової хвилі на поверхню пластини, зануреної в рідину; [20] – проаналізовано можливості

ультразвукового методу для вимірювання модулів пружності; [21] – запропонований алгоритм розрахунку модулів пружності третього порядку; [22] – запропонована методика вимірювань швидкостей поширення поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль та коефіцієнтів їх поглинання в ауксетиках; [23] – проведено аналіз стандартних резонансних методів вимірювань модуля пружності; [24] – запропоновано автоматизовану приладову систему для вимірювання амплітуди резонансних коливань; [25] – запропоновано принцип автоматизації вимірювань; [26] – проведені частотно-температурні вимірювання модуля пружності; [27] – запропоновано методику та проведені вимірювання динамічного модуля пружності методом резонансних коливань консольно закріпленого стрижня на звукових частотах у широкому діапазоні температур; [28] – проведено огляд та аналіз методів для визначення дійсної й уявної частин комплексних динамічних модулів Юнга, зсуву та модуля об'ємної деформації в'язкопружних полімерних матеріалів; [29] – проведено огляд та аналіз основних методів вимірювання комплексного коефіцієнта Пуассона в'язкопружних полімерних матеріалів; [30] – розроблено метод визначення динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика за допомогою трьох типів акустичних хвиль; [31] – досліджено енергетичні закономірності стану геометеріалів за модулями пружності; [32] – отримано розв'язок рівняння Релея для ауксетиків та проаналізована поведінка поверхневої хвилі на їх поверхні; [33] – досліджено параметри моделі відбивання плоских хвиль від вільної поверхні полімерного пружного тіла з від'ємним коефіцієнтом Пуассона; [34–35] – проведені вимірювання коефіцієнта Пуассона конструкційних полімерних матеріалів.

Апробація результатів дисертації. Викладені у роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на таких міжнародних наукових конференціях і семінарах: V Українська конференція молодих вчених з високомолекулярних сполук (Київ, 2003 р.), III Міжнародна науково-технічна конференція «Композиційні матеріали» (Київ, 2004 р.), XI Українська конференція з високомолекулярних сполук (Дніпропетровськ, 2007 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» присвячена 50-річчю заснування ТНТУ та 165-річчю з дня народження Івана Пулюя (Тернопіль, 2010 р.), VII Міжнародна наукова конференція «Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали» VII Міжнародної наукової конференції (Луцьк, 2014 р.); VIII Міжнародна наукова конференція «Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали» VII Міжнародної наукової конференції (Луцьк, 2016 р.); IX Міжнародна наукова конференція «Фундаментальна база наноелектроніки» (Харків – Одеса, 2017 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція «Структурна релаксація у твердих тілах» (Вінниця, 2018 р.); XI Міжнародна науково-технічна конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (МЕТРОЛОГІЯ – 2018) (Харків, 2018 р.); The Eighth World Congress «AVIATION IN THE XXI-st CENTURY» (Kyiv, Ukraine, 2018); VII Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи». (Черкаси, 2018 р.); VIII Міжнародна науково-практична конференція «Технічне регулювання, метрологія та інформаційні технології: європейський вибір»

(Одеса, 2018 р.); XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи» (Київ, 2019 р.); XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2019» (Київ, 2019 р.); VII Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування» (Луцьк, 2019 р.); IX Міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 2019 р.); III International scientific and practical conference «2019: Modeling, control and information technologies» (Rivne, Ukraine, 2019); XIII Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (Київ, 2020 р.); XV міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (Київ, 2022 р.); XVI Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» Київ, 2023 р.).

Ступінь використання у дисертації матеріалів і висновків кандидатської дисертації здобувача. Матеріали кандидатської дисертації «Вплив електричного поля на процеси структуроутворення при формуванні металонаповнених полімерних систем на основі полівінілхлориду» Машенка Володимира Андрійовича, захищеної 14.05.1998, у докторській дисертації не використовувались.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 56 наукових праць, зокрема 2 монографії, 9 статей у наукових виданнях, що внесені до міжнародних наукометричних баз Scopus та WOS (із них 3 статті у виданнях іноземних держав), 19 – наукових фахових виданнях України, 5 статей в інших виданнях України за темою дисертаційної роботи, 2 патенти України на корисну модель, 19 – тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 330 сторінок. Основний зміст викладено на 281 сторінці. Список використаних джерел становить 189 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження та наукову проблему. Викладено основні положення, що виносяться на захист, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертаційної роботи, її обсяг і структуру, визначено особистий внесок здобувача та представлено інформацію щодо впровадження результатів роботи.

У **першому розділі** дисертаційної роботи розглянуто теоретичні підходи до визначення модулів пружності другого й третього порядків та коефіцієнта Пуассона твердого тіла як механічних величин, вимірювання яких пов'язані зі зміною рівноважного стану та дисипаціями енергії в матеріалі.

Дисипації енергії, що мають місце на рівні структурної організації конструкційних полімерних матеріалів та гетерогенних геоматеріалів, можуть бути виміряні за зсувом фаз між напруженою і деформацією, що виникає в таких

матеріалах, при динамічному навантаженні. В такому випадку властивості матеріалу будуть визначатися комплексними динамічними модулями: модулем Юнга ($E^* = E' + iE''$), модулем зсуву ($\mu^* = \mu' + i\mu''$), модулем об'ємної деформації ($k^* = k' + ik''$) та комплексним коефіцієнтом Пуассона ($\nu^* = \nu' + i\nu''$).

У приладових системах для визначення комплексних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона в переважній більшості випадків використовуються методи де вимірюються механічні первинні параметри на основі яких проводяться розрахунки відповідних величин.

Під час вимірювання первинних параметрів для визначення модулів пружності другого порядку прийнято застосовувати стандартні резонансні методи, стандартний метод динамічної жорсткості та ультразвукові методи.

Визначення модулів пружності третього порядку пов'язане із вимірюваннями швидкостей поширення поздовжніх (v_l) та поперечних (v_t) ультразвукових (УЗ) хвиль в ізотропному твердому тілі при різних напруженнях: всебічному тиску (p) або за одновісного напруження (σ) при різних напрямках поширення поздовжніх та поперечних хвиль.

Для визначення динамічного коефіцієнта Пуассона первинні параметри можуть бути виміряні такими методами: прямим, вторинним, біжучих хвиль, трьох типів хвиль: поздовжньої, поперечної та поверхневої хвилі Релея. Крім цього використовують метод скінченних елементів спільно із методом вимірювання динамічної жорсткості матеріалу.

У **другому розділі** дисертаційної роботи представлено результати теоретичних досліджень спрямованих на розширення можливостей резонансних методів вимірювання, зокрема удосконалення методу консольно закріпленого стрижня та розробки інформаційно-вимірювальної приладової системи (ІВПС) для реалізації автоматизованого процесу вимірювань.

Суть методу полягає у вимірюванні амплітуди коливань (A) вільного кінця зразка, у вигляді стрижня, при зміні частоти збуджувальної сили F , що прикладена до іншого закріпленого кінця. За вимірами величини $|A|$ поперечних

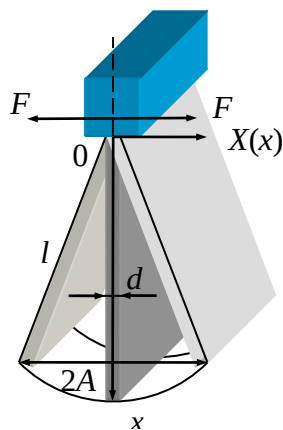


Рисунок 1 – Схема принципу збудження коливань вільного кінця закріпленого зразка.

коливань зразка при різних частотах будується резонансна крива, параметрами якої є частота коливань f та відношення амплітуд ($|A|/|A_{max}|$), де A_{max} – максимальне значення амплітуди, що відповідає головній резонансній частоті (f_r). Для f_r визначають ширину резонансної кривої (Δf_r) на рівні $|A_{max}|/\sqrt{2}$.

При основній резонансній частоті f_r коливання для визначення величини E' маємо таке співвідношення:

$$E' = \frac{48\pi^2 \rho l^4 f_r^2}{1,8751^4 d^2}, \quad (1)$$

де ρ – густина матеріалу, d – товщина зразка; l – довжина зразка.

Для реалізації методу розроблена приладова система, де зразок полімерного матеріалу перебуває в повітряній термокамері, де жорстко кріпиться одним кінцем до тяги генератора механічних коливань за допомогою затискача. Термокамера має оглядові вікна для оптичного спостереження амплітуди коливань затиснутого та вільного кінців зразка (рис. 2). У середині камери є світлодіод для підсвіти зразка. Механічні коливання зразка виконує поляризоване реле РП-7, живлення до якого надходить від генератора звукового діапазону частот (Siglent SDG1050).

Визначення амплітуди резонансних коливань зразка реалізовано за допомогою аналізу зображення, отриманого з вебкамери. ІВПС для визначення амплітуди коливань у реальному часі вільного кінця закріпленого полімерного стрижня складається з ПК, генератора коливань Siglent SDG 1050 та вебкамери з оптичним зумом. Структурна схема ІВПС представлена на рис. 3.

Програмний додаток «Резонансні вимірювання» ІВПС розроблено в системі MATLAB з використанням можливостей графічного середовища користувача GUI. Інтерфейс програмного додатка «Резонансні вимірювання» представлений на рис. 4.



Рисунок 2 – Коливання полімерного зразка у термокамері.

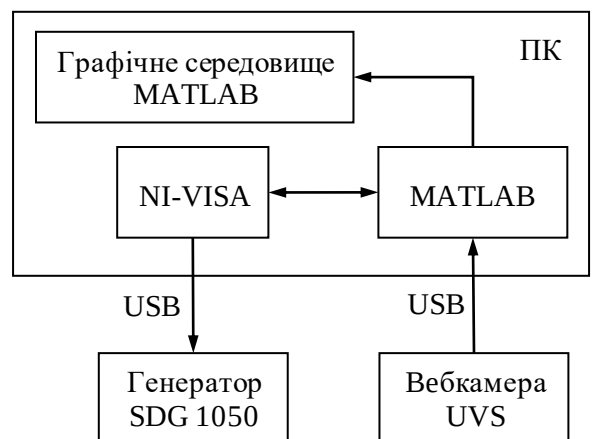


Рисунок 3 – Структурна схема ІВПС.

Пакет NI-VISA має драйвер пристрою NI (NI device driver) й утиліту NI MAX (Measurement & Automation Explorer), яка надає користувачу базовий інтерфейс для керування зовнішнім пристроєм. Додаток «Резонансні вимірювання» реалізує наступні кроки: сканує наявність під'єднаних вебкамер в ІВПС системі; дає можливість вибрати необхідну вебкамеру; створює об'єкт для керування вебкамерою; дозволяє змінювати параметри вебкамери, зокрема роздільну здатність; створює об'єкт для керування й керує дистанційною роботою генератора для збудження коливань у визначеному частотному діапазоні із заданим кроком зміни частоти; реалізує цифрову обробку захопленого зображення; дозволяє встановити базові лінії на захопленому зображенні для визначення амплітуди коливань; створює матриці даних для монохромного або/та бінарного зображень; реалізує алгоритми визначення

амплітуди коливань вільного кінця закріпленого зразка при кожному значенні частоти коливань; буде графік залежності відносної амплітуди $|A|/|A_{max}|$ від f .

Дистанційне керування генератором SDG 1050 реалізовано за допомогою команд SCPI через утиліту NI-VISA.

Після цифрової обробки будуються базові лінії: вертикальна і горизонтальна, що визначають стовбець і рядок матриці даних для реалізації алгоритму визначення амплітуди коливань (рис. 4).

Запропонований алгоритм визначення амплітуди коливань базується на визначенні правої й лівої меж області зі значенням пікселей рівними одиниці відносно вертикальної базової лінії. Габарити області в такому випадку рівні значенню $2A$. Крім визначення лівої та правої меж алгоритм передбачає корегування вертикальної базової лінії – номер стовпця матриці даних.

Згідно з розробленою методикою процес вимірювання амплітуди починається із підбору f_r коливань, що залежить від формфактора зразка (відношення довжини l до товщини d), захоплення зображення, визначення, за необхідності, методу покращення зображення та встановлення параметрів необхідних фільтрів цифрової обробки.

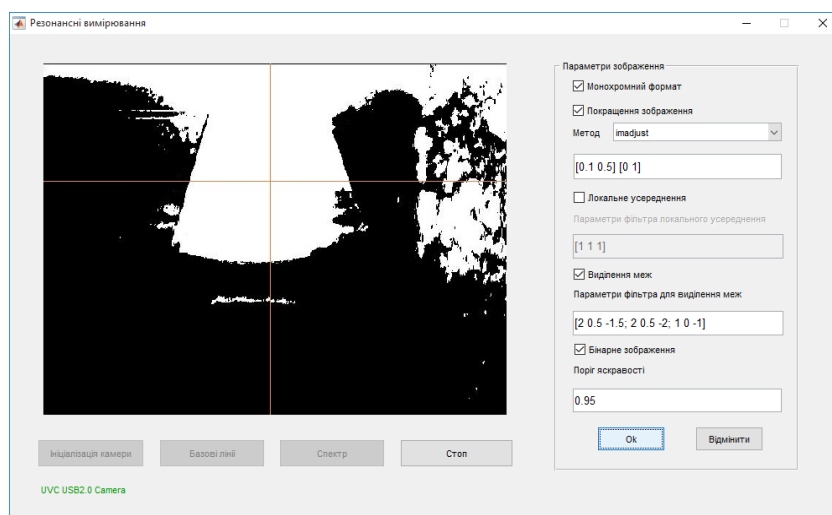


Рисунок 4 – Інтерфейс програмного додатка «Резонансні вимірювання».

На наступному кроці програмний додаток «Резонансні вимірювання» повністю автоматизує процес у визначеному частотному діапазоні при встановлених методах та параметрах фільтрів цифрової обробки зображення.

Алгоритм цифрової обробки захопленого RGB-зображення із вебкамери показано на рис. 5. Захоплене RGB-зображення з вебкамери переводиться в монохромний формат. У межах етапу цифрової обробки монохромного зображення можна проводити його покращення методом зміни яскравості за допомогою зміни передавальної характеристики яскравості пікселя або вирівнюванням гістограми розподілу яскравості пікселей.

На рис. 6 показано етапи цифрової обробки зображення коливання полімерного стрижня: 1 – RGB-зображення; 2 – монохромний формат; 3 – покращення зображення; 4 – виділення меж зразкам як об'єкта зображення; 5 – бінарне зображення.

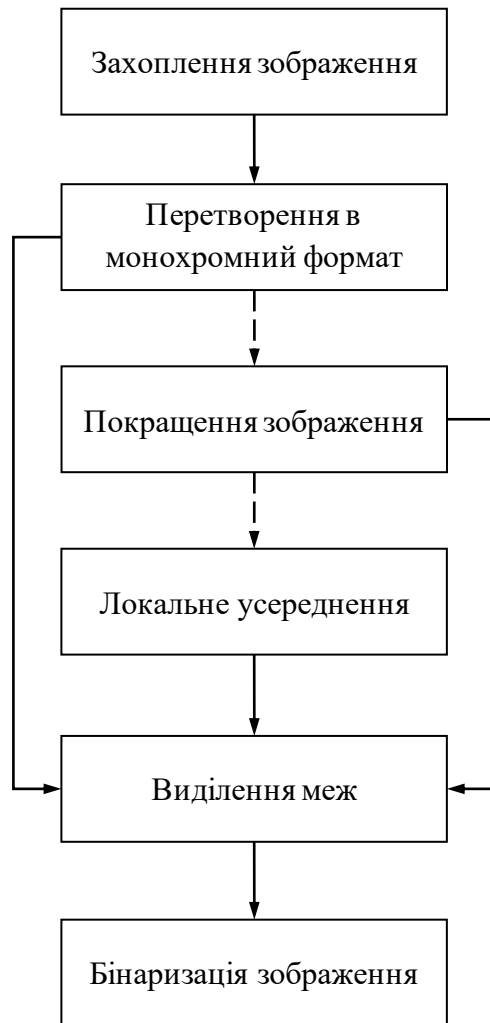


Рисунок – 5 Алгоритм цифрової обробки захопленого RGB-зображення.

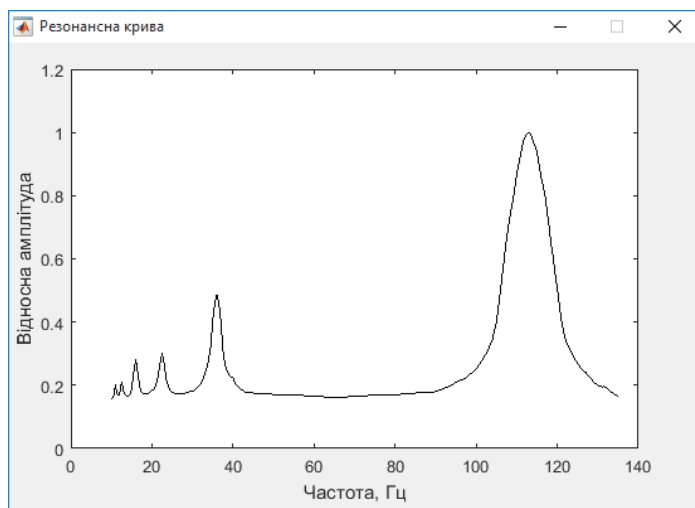
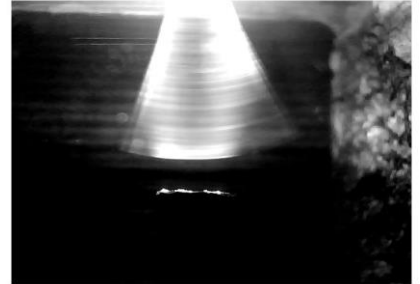


Рисунок 7 – Резонансна крива для відносної амплітуди коливань вільного кінця полімерного стрижня.

1



2



3



4



5

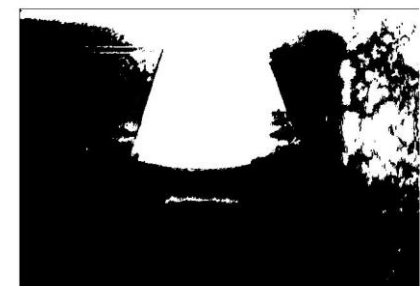


Рисунок 6 – Етапи цифрової обробки захопленого RGB-зображення.

На рис. 7 показана резонансна крива для зразка конструкційного полівінілхлориду (ПВХ) марки PVC-SAW за температури 298 К. Зразок ПВХ був виготовлений у вигляді стрижня розміром: $l = 30$ мм, $d = 0,74$ мм та шириною 5 мм.

Запропоновано співвідношення для оцінки відносної похибки (ε_A) визначення амплітуди резонансних коливань A :

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta N}{N}, \quad (2)$$

де ΔN – кількість пікселів при визначенні межі області коливання зразка у бінарному зображенні при резонансній частоті, N – кількість пікселів області коливання зразка на встановленій горизонтальній базовій лінії у бінарному зображенні при резонансній частоті.

Для зразка ПВХ на f_r (рис. 4) величина N дорівнює 221 піксель. При $\Delta N = 2$ значення ε_A рівне 0,9 %, а граничне значення відносної похибки визначення модуля пружності за співвідношенням (1) дорівнює 1,9 %. При інших резонансних частотах значення ε_A буде зростати відповідно із зменшенням відносної амплітуди коливань.

Резонансні криві для ПВХ, ПС, ПЕВГ та ПЕНГ в області головних резонансних частот для кожного полімера при температурі 293 К подані на рис. 8.

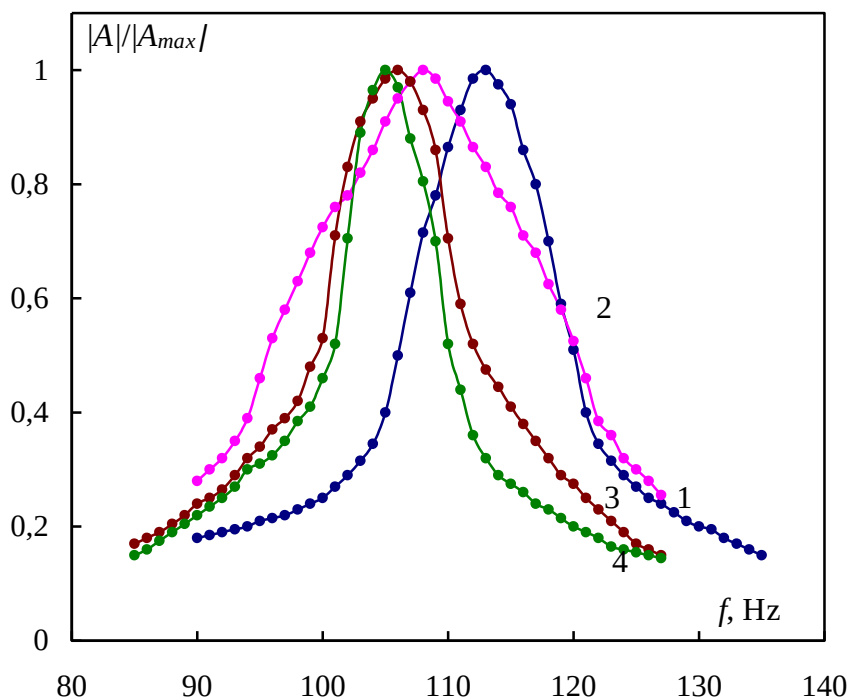


Рисунок 8 – Резонансні криві в області основних резонансних частот для зразків конструкційних полімерних матеріалів: 1 – ПВХ, 2 – ПС, 3 – ПЕНГ, 4 – ПЕВГ.

Резонансні криві для зразків конструкційного ПВХ при $T = 248; 273, 298, 323$ та 348 К представлені на рис. 9. Криві мають декілька

резонансних максимумів в області частот 10–40 Гц та головний максимум, що відповідає основній резонансній частоті f_r .

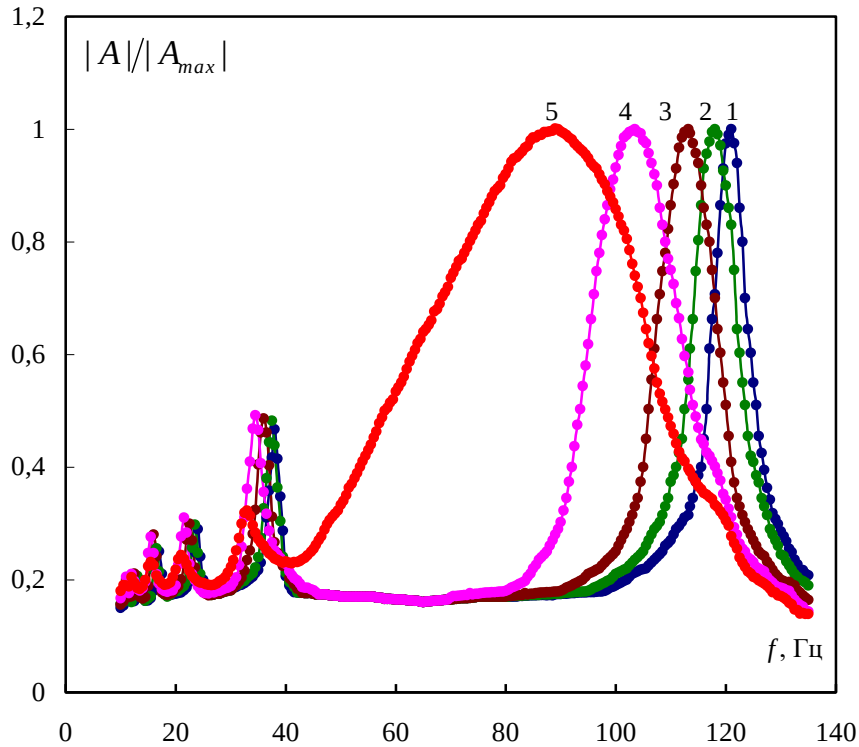


Рисунок 9 – Резонансні криві для зразків ПВХ в області частот 10–140 Гц при температурах: 1 – 248 К; 2 – 273 К; 3 – 298 К; 4 – 323 К; 5 – 348 К.

Для прогнозування модуля пружності конструкційного ПВХ при динамічних навантаженнях за різних температур отримано таке співвідношення:

$$E'(T) = \frac{48\pi^2 \rho l^4 (-1,7857T^2 + 2,9143T + 119,9)^2}{1,8751^4 d^2}. \quad (3)$$

У **третьому розділі** дисертаційної роботи розглянуті математичні моделі процесів відбивання, заломлення та трансформації акустичних хвиль на межі рідини та твердого тіла з від'ємними значеннями коефіцієнта Пуассона і на межі твердих тіл із додатними та від'ємними значеннями коефіцієнта Пуассона.

Для визначення параметрів моделей плоску монохроматичну пружну хвилю, хвильовий вектор якої лежить у площині xz , в однорідному пружному середовищі представляли двома скалярними функціями координат без врахування фазового множника $\exp(i(\xi x - \omega t))$, де ξ – горизонтальна компонента відповідного хвильового вектора k_l та k_t :

$$\varphi(x, z) = \varphi_1 e^{i\alpha_1 z} + \varphi_2 e^{-i\alpha_1 z}, \quad (4)$$

$$\psi(x, z) = \psi_1 e^{i\beta_1 z} + \psi_2 e^{-i\beta_1 z}, \quad (5)$$

де $\alpha_1 = \sqrt{k_{l1}^2 - \xi^2}$, $k_{l1} = \omega/v_{l1}$, $\text{Im}\alpha_1 \geq 0$; $\beta_1 = \sqrt{k_{t1}^2 - \xi^2}$, $k_{t1} = \omega/v_{t1}$, $\text{Im}\beta_1 \geq 0$, v_{l1} – швидкість поширення поздовжньої хвилі в середовищі; v_{t1} – швидкість поширення поперечної хвилі в середовищі.

Для математичної моделі падіння плоскої хвилі із рідини на поверхню ауксетика потенціали поздовжньої та поперечної хвиль у пружному будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}(x, z) &= \tilde{\varphi}_1 e^{i\alpha_2 z} + \tilde{\varphi}_2 e^{-i\alpha_2 z}, \\ \tilde{\psi}(x, z) &= \tilde{\psi}_1 e^{i\beta_2 z} + \tilde{\psi}_2 e^{-i\beta_2 z},\end{aligned}\quad (6)$$

де $\alpha_2 = \sqrt{k_{l2}^2 - \xi^2}$, $k_{l2} = \omega/v_{l2}$, $\text{Im}\alpha_2 \geq 0$; $\beta_2 = \sqrt{k_{t2}^2 - \xi^2}$, $k_{t2} = \omega/v_{t2}$, $\text{Im}\beta_2 \geq 0$, k_{l2} – хвильовий вектор поздовжньої хвилі, k_{t2} – хвильовий вектор поперечної хвилі, v_{l2} – швидкість поширення поздовжньої хвилі, v_{t2} – швидкість поширення поперечної хвилі.

Показано, що коефіцієнт відбивання (V) та коефіцієнти збудження поздовжньої (W_l) та поперечної (W_t) хвиль визначаються таким чином:

$$\begin{aligned}V &= \frac{\alpha_1 m \left((k_{t2}^2 - 2\xi^2)^2 + 4\xi^2 \alpha_2 \beta_2 \right) - \alpha_2 k_{t2}^4}{\alpha_1 m \left((k_{t2}^2 - 2\xi^2)^2 + 4\xi^2 \alpha_2 \beta_2 \right) + \alpha_2 k_{t2}^4}, \\ W_l &= \frac{2\alpha_1 k_{t2}^2 (k_{t2}^2 - 2\xi^2)}{\alpha_1 m \left((k_{t2}^2 - 2\xi^2)^2 + 4\xi^2 \alpha_2 \beta_2 \right) + \alpha_2 k_{t2}^4}, \\ W_t &= \frac{4\xi^2 \alpha_2 \beta_2 k_{t2}^2}{\alpha_1 m \left((k_{t2}^2 - 2\xi^2)^2 + 4\xi^2 \alpha_2 \beta_2 \right) + \alpha_2 k_{t2}^4},\end{aligned}\quad (7)$$

де $m = \rho_2/\rho_1$.

Розглянута задача падіння плоскої хвилі із пружного середовища з від'ємним коефіцієнтом Пуассона на межу поділу із рідиною. Плоску монохроматичну пружну хвилю представимо двома скалярними функціями (4), (5).

У рідині потенціал поздовжньої хвилі визначимо наступним чином:

$$\tilde{\varphi}(x, z) = \tilde{\varphi}_1 e^{i\alpha_2 z}, \quad (8)$$

де $\alpha_2 = \sqrt{k_2^2 - \xi^2}$, $k_2 = \omega/v_2$, $\text{Im}\alpha_2 \geq 0$, k_2 – хвильовий вектор акустичної хвилі в рідині, v_2 – швидкість поширення.

Установлено, що із принципу суперпозиції амплітуди $\varphi_1, \psi_1, \tilde{\varphi}_1$ хвиль, що поширюються від межі поділу середовищ, лінійно пов'язані з амплітудами φ_2, ψ_2 падаючих хвиль наступним чином:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \psi_1 \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{V}_{ll} & \tilde{V}_{tl} \\ \tilde{V}_{lt} & \tilde{V}_{tt} \\ \tilde{W}_{ll} & \tilde{W}_{tl} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_2 \\ \psi_2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Величини $\tilde{V}_{ll}, \tilde{V}_{lt}, \tilde{W}_{ll}, \tilde{V}_{tt}, \tilde{V}_{tl}, \tilde{W}_{tl}$ зі співвідношення (9) мають наступний фізичний зміст: $\tilde{V}_{ll}$ – коефіцієнт відбивання поздовжньої хвилі у верхньому середовищі при падінні поздовжньої хвилі $\tilde{V}_{ll} = \varphi_1/\varphi_2$ (при $\varphi_2 = 1, \psi_2 = 0$); $\tilde{V}_{lt}$ –

коефіцієнт трансформації падаючої поздовжньої хвилі у поперечну хвилю у верхньому середовищі $\tilde{V}_{lt} = \psi_1/\varphi_2$ (при $\varphi_2 = 1, \psi_2 = 0$); $\tilde{W}_{ll}$ – коефіцієнт збудження поздовжньої хвилі у нижньому середовищі при падаючій поздовжній хвилі із верхнього середовища $\tilde{W}_{ll} = \tilde{\varphi}_1/\varphi_2$ (при $\varphi_2 = 1, \psi_2 = 0$); $\tilde{V}_{tt}$ – коефіцієнт відбивання поперечної при падінні поперечної хвилі у верхньому середовищі $\tilde{V}_{tt} = \psi_1/\psi_2$ (при $\psi_2 = 1, \varphi_2 = 0$); $\tilde{V}_{tl}$ – коефіцієнт трансформації падаючої поперечної хвилі у поздовжню хвилю у верхньому середовищі $\tilde{V}_{tl} = \varphi_1/\psi_2$ (при $\psi_2 = 1, \varphi_2 = 0$); $\tilde{W}_{tl}$ – коефіцієнт збудження поздовжньої хвилі у нижньому середовищі при падаючій поперечній хвилі із верхнього середовища $\tilde{W}_{tl} = \tilde{\varphi}_1/\psi_2$ (при $\psi_2 = 1, \varphi_2 = 0$).

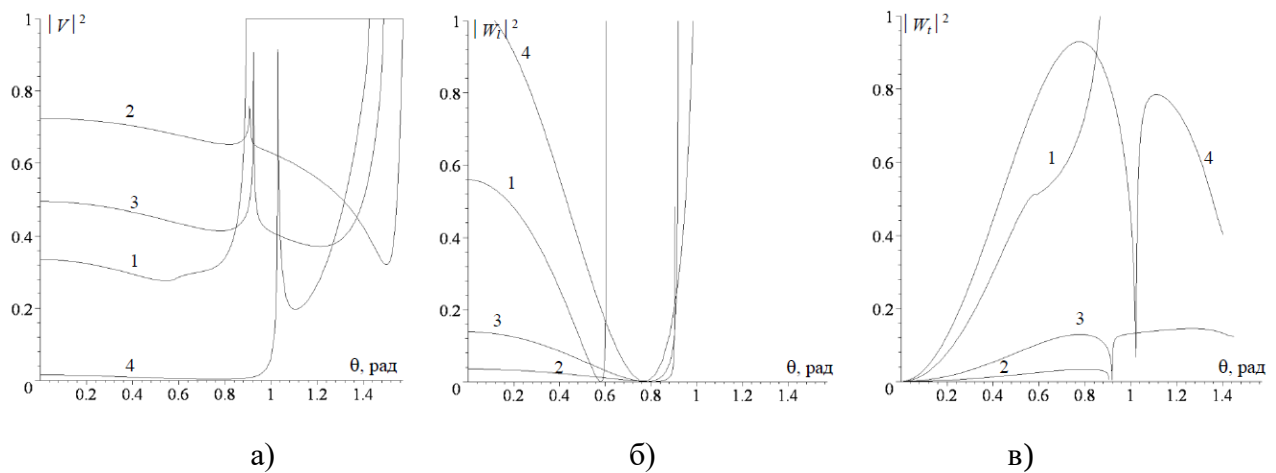


Рисунок – 10 Залежності коефіцієнту (а) відбивання $|V|^2$, (б) трансформації у поздовжню хвилю $|W_l|^2$ та (в) трансформації у поперечну хвилю $|W_t|^2$ при паданні акустичної хвилі із рідини на поверхню середовищ 1–4.

Теоретичні розрахунки $\tilde{V}_{ll}$, $\tilde{V}_{lt}$, $\tilde{W}_{ll}$, $\tilde{V}_{tt}$, $\tilde{V}_{tl}$, $\tilde{W}_{tl}$ проведені для гетерогенного та конструкційних полімерних матеріалів з $\nu < 0$: пісковик Weber, термопластичний поліуретан (ТПУ) і металонаповнені (W, Мо) композиції на його основі. Параметри ауксетик-середовищ представлені в табл. 1

Таблиця 1

Параметри ауксетик-середовищ

Середовище	Матеріал	ν	$\nu_{l2}, (\nu_{l1})$ м/с	$\nu_{t2}, (\nu_{t1})$ м/с	$\rho_2 (\rho_1)$, кг/м ³	$\rho_2 \nu_{l2} \cdot 10^{-6}$ ($\rho_1 \nu_{l1} \cdot 10^{-6}$), кг/(м ² ·с)	$\rho_2 \nu_{t2} \cdot 10^{-6}$ ($\rho_1 \nu_{t1} \cdot 10^{-6}$), кг/(м ² ·с)
1	Пісковик Weber	– 0,09	2450	1800	2151	5,27	3,87
2	ТПУ+W	– 0,24	1775	1370	9888	17,55	13,55
3	ТПУ+Мо	– 0,39	1755	1405	4603	8,08	6,47
4	ТПУ	– 1	1635	1415	1107	1,81	1,56

Порівняльний аналіз залежностей $\tilde{V}_{ll}$ і $\tilde{V}_{lt}$ від величини θ_l показує (рис. 11), що при кутах $\theta_{l\max}$ значення величини $\tilde{V}_{lt}$ рівне нулю – трансформація в поперечну хвилю не відбувається, а відбивання поздовжньої проходить в протифазі без зміни амплітуди.

На основі граничних умов та рівнянь показано, що кути $\theta_{l\max}$ для середовищ з від'ємним коефіцієнтом Пуассона розраховуються за співвідношенням:

$$\theta_{l\max} = \arcsin \left[\left(\frac{2\nu - 2}{4\nu - 2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (10)$$

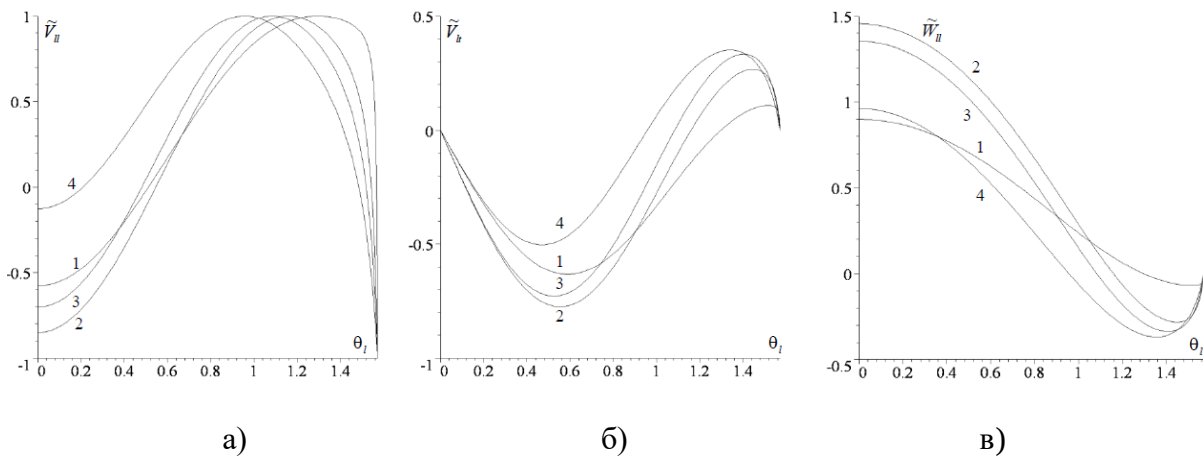


Рисунок – 11 Залежності коефіцієнта відбивання $\tilde{V}_{ll}$ (а), коефіцієнту трансформації $\tilde{V}_{lt}$ (б) та коефіцієнта збудження поздовжньої хвилі в рідині $\tilde{W}_{ll}$ при падінні поздовжньої хвилі із середовищ 1–4 на межу поділу із рідиною.

При нормальному падінні поздовжньої хвилі ($\theta_l = 0$) амплітуди коефіцієнта відбивання $\tilde{V}_{ll}$ визначається акустичними жорсткостями ауксетик-середовища для поздовжньої хвилі $\rho_1 v_{l1}$ і зростають в ряді 2, 3, 1, 4, відповідно із зменшення акустичної жорсткості середовища (табл. 1).

Аналіз залежностей величини $\tilde{W}_{ll}$ від кута падіння поздовжньої хвилі (рис. 9) показує, що характер поведінки визначається величиною $\rho_1 v_{l1}$ і коефіцієнтом Пуассона ауксетик-середовища. Криві монотонно спадають до чітко виражених локальних мінімумів при кутах близьких до $\pi/2$, де величина $\tilde{V}_{lt}$ має максимум для відповідних середовищ.

Залежності коефіцієнтів збудження поздовжньої хвилі у рідині $\tilde{W}_{ll}$ від кута падіння поперечної хвилі θ_t на межу поділу дещо подібні до функціональних залежностей $\tilde{V}_{tt}$ (рис. 10). Водночас відмітимо, що величина максимум визначається також зміною акустичної жорсткості для поперечної хвилі ауксетик-середовища, за винятком середовищ 1 та 4, і зростає в ряді 1, 4, 3, 2.

Установлено, що характерною особливістю функціональних залежностей $\tilde{V}_{tt}$ та $\tilde{W}_{tl}$ є наявність критичного кута $\theta_{кр.}$, при якому спостерігається повне внутрішнє відбивання – відбита хвиля є поверхневою, а їх значення $\tilde{V}_{tt}$ і $\tilde{W}_{tl}$ прямують до нескінченності. Величина кута $\theta_{кр.}$ визначається за співвідношенням (10).

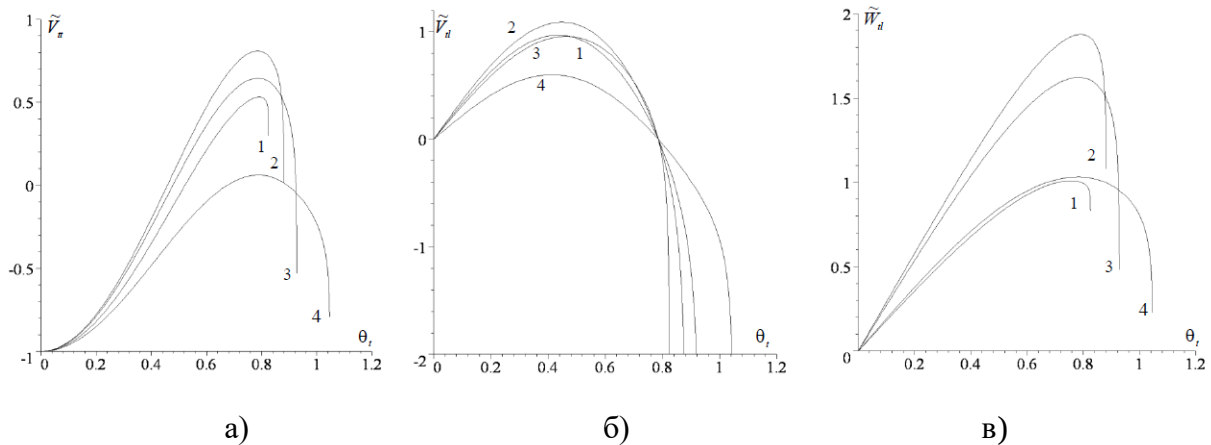


Рисунок 12 – Залежності коефіцієнтів відбивання $\tilde{V}_{tt}$ (а), трансформації $\tilde{V}_{tl}$ (б) та збудження поздовжньої хвилі в рідині $\tilde{W}_{tl}$ при падінні поперечної хвилі із середовищ 1–4 на межу поділу із рідиною.

Досліджено математичну модель відбивання, збудження та трансформація поздовжніх і поперечних акустичних хвиль на межі однорідних пружних середовищ одне з яких має від’ємний коефіцієнт Пуассона. Показано можливість керування кутами перетворення типів хвиль при відбиванні і кутами заломлення, а також коефіцієнтами відбивання, трансформації та збудження хвиль залежно від фізичних параметрів контактуючих середовищ. Характер кутових залежностей коефіцієнтів відбивання, трансформації та збудження при падінні акустичної хвилі на межу поділу залежить від величини коефіцієнта Пуассона та акустичних жорсткостей контактуючих середовищ, водночас існують суттєві відмінності при падінні хвилі на поверхню середовища з від’ємним коефіцієнтом Пуассона у порівнянні із середовищем де величина $\nu > 0$. Критичні кути, при яких відбиті та заломлені хвилі стають неоднорідним, залежать від співвідношень швидкостей поширення поздовжніх поперечних хвиль у контактних середовищах.

Для моделі проходження ультразвукових хвиль через занурену в рідину пластину із полімерного матеріалу із різними значеннями величини ν отримані теоретичні розрахунки коефіцієнтів відбивання V та прозорості (W) від кута (θ) падіння поздовжньої хвилі та товщини пластини d .

Аналіз отриманих результатів указує на неоднозначний характер проходження акустичної хвилі через полімерну пластину із різним значенням величини ν в залежності від кута падіння θ . На діаграмах чітко виражені максимуми й мінімуми величин $|V|^2$ і $|W|^2$ при різних кутах і товщинах пластини.

Зазначено, що повне відбивання ($|V|^2 = 1$) при критичному куті $\theta_{кр}$ буде спостерігатися тоді, коли на шляху проходження поперечної УЗ-хвилі $\lambda_t/\cos\theta_t$ вкладається непарне число півхвиль. Товщину пластини в такому випадку можна визначити із співвідношення:

$$d = \frac{(2n+1)\lambda_t}{2\cos\theta_t}, \quad (11)$$

де $\lambda_t = 2\pi v_t/\omega$; $n = 0, 1, 2, \dots$.

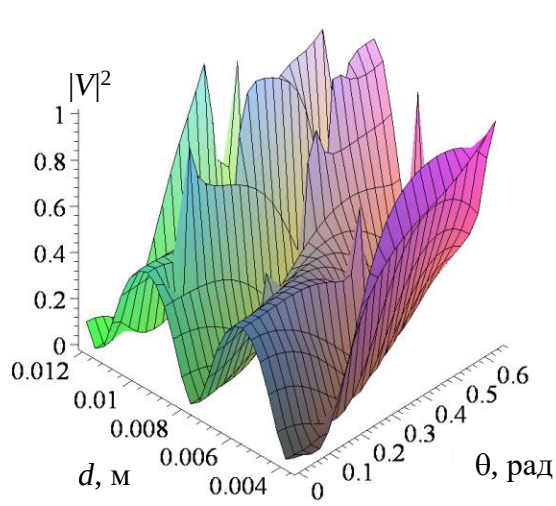


Рисунок 13 – Залежність величини $|V|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини d для ПВХ ($\nu = 0,35$).

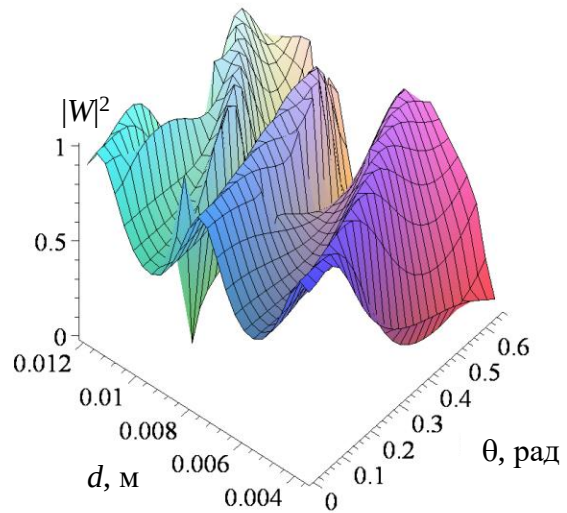


Рисунок 14 – Залежність величини $|W|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини d для ПВХ ($\nu = 0,35$).

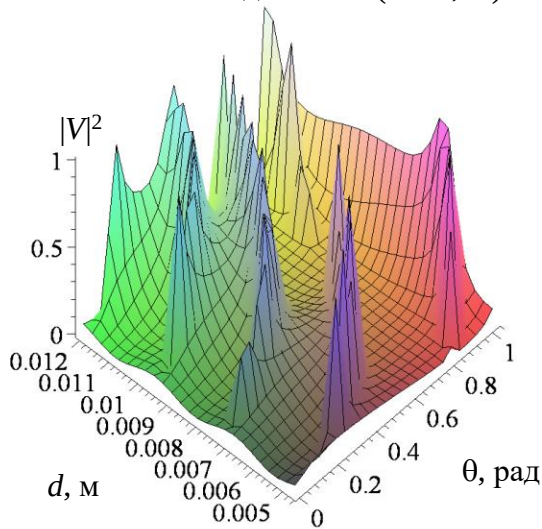


Рисунок 15 – Залежність величини $|V|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини d для ТПУ ($\nu = -1$).

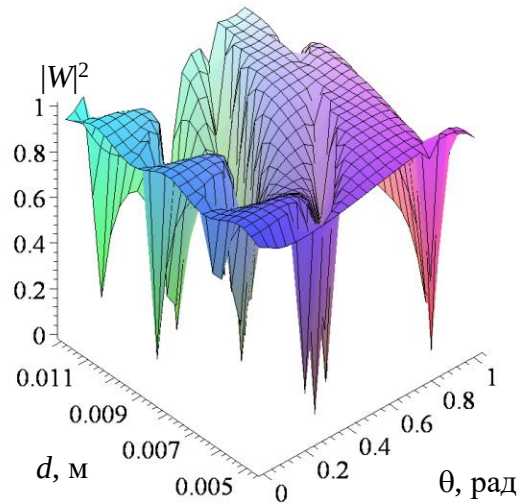


Рисунок 16 – Залежність величини $|W|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини d для ТПУ ($\nu = -1$).

Критичний кут падіння на межі рідина – тверде тіло визначається зі співвідношення:

$$\theta_{кр.} = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_l}\right). \quad (12)$$

де v_1 – швидкість хвилі в рідині; v_l – швидкість поздовжньої хвилі в пружному середовищі.

Установлено, що повна прозорість ($|W|^2 = 1$) пластини під час проходження акустичних УЗ-хвиль визначається із умови:

$$\omega d = 2 \frac{v_t}{\cos \theta_t} \operatorname{tg}^2 2\theta_t \operatorname{tg}\left(\frac{\omega d}{2v_t} \cos \theta_t\right), \quad (13)$$

де v_t – швидкість поперечної хвилі в пружному середовищі; θ_t – кут між напрямком поширення поперечної хвилі в пластині й перпендикуляром у точку падіння.

Теоретичні оцінки величини d пластини за співвідношенням (11) показують, що для (ПВХ), при $\omega = 600$ кГц і $\theta_{кр.} = 37,2^\circ$, товщини пластин рівні 2,1 мм та 6,31 мм, а для (ТПУ) при $\theta_{кр.} = 58,6^\circ$, відповідно, 4,63 мм та 13,88 мм.

Чисельний розв'язок рівняння (13) показує, що повна прозорість для зразка ПВХ при $\theta_{кр.}$ буде при d рівних 5,9 мм та 10,3 мм, а для зразка ТПУ при $\theta_{кр.}$, відповідно, 12,85 мм.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи проведено обґрунтування конструкційних параметрів та метрологічних характеристик приладової системи для імерсійного методу вимірювань швидкостей поширення УЗ-хвиль та представлено інформаційно-вимірювальну приладову систему для визначення динамічних модулі пружності та коефіцієнта Пуассона конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалів.

Для реалізації імерсійного методу розроблена експериментальна кювета (рис. 17), що має два ультразвукових датчики (УЗД), один із яких виступає в ролі випромінювача 1, а інший – приймача 2. Показано, що для вимірювань швидкостей поширення УЗ-коливань за допомогою імерсійного методу потрібне виконання жорстких умов місцеположення встановлення УЗД в кюветі в залежності від частоти їх випромінювання. У такому випадку основним конструктивним параметром кювети є відстань (L) від випромінювача до приймача, що визначається величиною акустичного шляху проходження УЗ-хвилі в кюветі і зразку досліджуваного матеріалу.

Під час розроблення приладової системи були враховані наступні метрологічні характеристики для забезпечення точності вимірювань:

- 1) діапазон робочих частот датчиків від 200 кГц;
- 2) направленість не більше 10 град. за рівня не менше – 10 дБ;
- 3) чутливість датчика не менше 1 мВ.

Для експериментальної кювети приладової системи були вибрані УЗД фірма Murata.

Лінійний розмір кювети L визначали зі співвідношення:

$$L \geq 2l_{min} + d, \quad (14)$$

де l_{min} – мінімальне значення інтервалу детектування для відповідного типу УЗД, d – товщина зразка.

Робота приладової системи базується на проходженні поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль через зразок матеріалу, що занурений в імерсійну рідину. Умова хорошого акустичного контакту між рідиною в зразком як правило виконується автоматично. Це дає змогу вважати зразок еквівалентним відрізком визначеної довжини d , навантаженим на обох його кінцях на опір, що дорівнює хвильовому опору рідини, що допустимо при використанні височастотних імпульсів, так як при цьому в рідині не виникають стоячі хвилі.

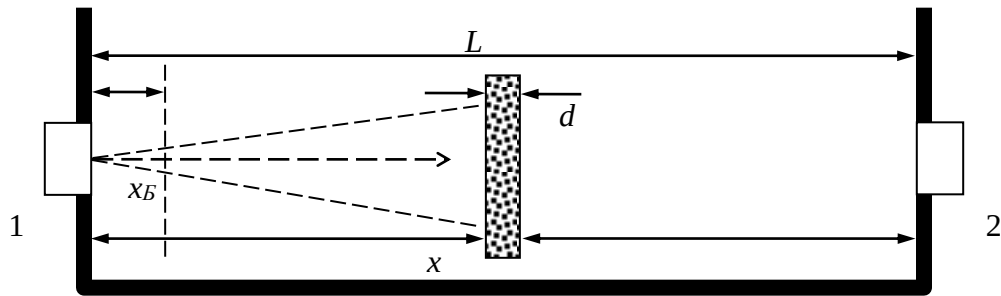


Рисунок 17 – Схема експериментальної кювети для імерсійного методу вимірювань.

Згідно з розробленою методикою визначення швидкості v_l базується на порівнянні результатів прямих вимірювань часів проходження зондувального імпульсу через імерсійну рідину при відсутності зразка (τ) та наявності зразка (τ_l) між випромінювачем і приймачем сигналів.

Для визначення швидкості v_t використовується метод обертової пластини. Під час повороту зразка відносно вертикальної осі, коли кут падіння хвилі (θ) менший критичного ($\theta_{кр.}$) (кут Брюстера), у зразку будуть поширюватися дві хвилі – поздовжня і поперечна (рис. 18а). При досягненні критичного кута $\theta_{кр.}$ поздовжня хвиля буде поверхневою (рис. 18б), а у зразку поширюється тільки поперечна хвиля, причому на межі „рідина–тверде” тіло виконується закон Снеліуса.

Критичний кут визначаємо за співвідношенням (12) за умови $v_l = v_p$.

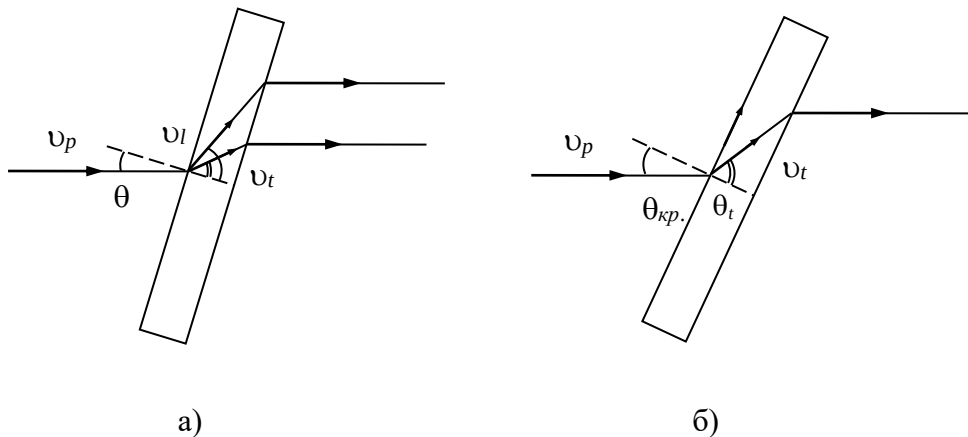


Рисунок 18 – Схема визначення кута Брюстера.

За відомих величинах значеннях v_l, v_t , з урахуванням внутрішніх втрат енергії на проходження УЗ-хвиль через зразок матеріалу модулі E, μ та k за співвідношеннями теорії пружності визначаються таким чином:

$$E = \rho v_l^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}; \quad (15)$$

$$\mu = \rho v_t^2; \quad (16)$$

$$k = E - \frac{4}{3}\mu. \quad (17)$$

У випадку, коли не можна знехтувати затуханням поздовжньої та поперечної УЗ-хвиль у зразку досліджуваного матеріалу, визначають комплексні модулі пружності. Дійсні та уявні частини комплексних модулів розраховують за такими співвідношеннями:

$$E' = \rho v_l^2 \frac{1 - \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad E'' = \rho v_l^2 \frac{\frac{2\alpha_l v_l}{\omega}}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2} \quad (18)$$

$$\mu' = \rho v_t^2 \frac{1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \quad \mu'' = \rho v_t^2 \frac{\frac{2\alpha_t v_t}{\omega}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2} \quad (19)$$

де α_l і α_t – коефіцієнти поглинання поздовжньої і поперечної хвиль; $\alpha_l = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A_l}$; $\alpha_t = \frac{\sqrt{v_t^2 - v_p^2} \sin^2(\theta_{кр.})}{v_t d} \ln \frac{A_0}{A_t}$; A_0 – амплітуда сигналу поздовжньої УЗ-хвилі без зразка; $A_{l,t}$ – амплітуда сигналу поздовжньої (поперечної) УЗ-хвилі після проходження через зразок.

Електронний блок ІВПС розроблений на базі однокристального мікроконтролера (ОМК) Atmega 48. Блок-схема блоку подана на рис. 19. На ОМК в електронному блоці покладаються наступні задачі: формування зондувального імпульсу; виявлення прийнятого сигналу та вимірювання його амплітуди; визначення часу затримки прийнятого сигналу відносно зондувального імпульсу; передача отриманих даних в ПК для подальшої обробки; прийом від ПК команди та формування відповідних керуючих сигналів на кроковий двигун для повороту досліджуваного зразка; індикація стану роботи установки та параметрів вимірювання.

Для визначення кута Брюстера ОМК і схема керування кроковим двигуном ПБМГ-200-265-2 реалізує режим кроків та напівкроків. Повному обороту осі двигуна відповідає 200 та 400 імпульсів, відповідно крок і напівкрок повороту складають $1,8^\circ$ та $0,9^\circ$.

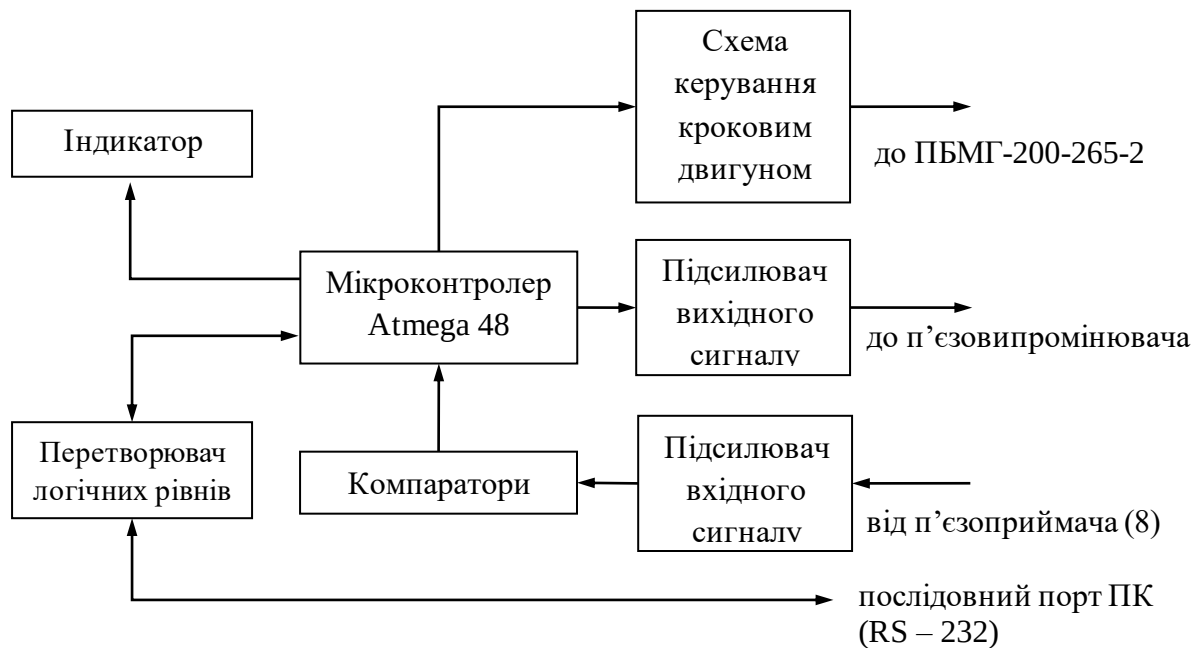


Рисунок 19 – Блок-схема електронного блока.

Розроблено структуру вимірювального каналу аналогово-цифрового інтерфейсу для визначення часу проходження УЗ-імпульсу та його амплітуди (рис. 20).

Вхідний сигнал із УЗД через конденсатор C_1 подається на двоканальний попередній підсилювач (ПП) реалізований на основі операційних підсилювачів (ОУ) увімкнених паралельно за наступною схемою (рис. 21).

Коефіцієнти підсилення каскадів при відповідних номіналах резисторів R_2-R_5 для нашої схеми рівні: $K_1 = 20$; $K_2 = 10$.

Виявлення корисного сигналу від УЗД відбувається в умовах шумових завад зовнішнім двоканальним швидкодіючим компаратором (К). Для цього сигнал обробляється у часовому вікні тривалістю ($t_{time\ window}$) із затримкою ($t_{time\ window\ delay}$) від початку зондування до заданої межі (рисунком X). Величина $t_{time\ window\ delay}$ вибирається виходячи із частоти збудження УЗ-коливань та конструктивних особливостей кювети приладової системи.

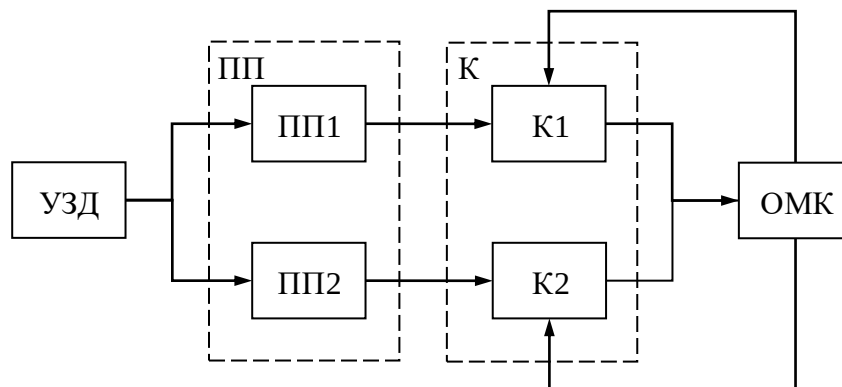


Рисунок 20 – Структурна схема вимірювального каналу: УЗД – ультразвуковий датчик; ПП – попередній підсилювач; К – компаратор; ОМК – однокристальний мікроконтролер.

На інвертувальні входи каналів K1 і K2 компаратора К подають сигнали з ПП1 та ПП2, а на неінвертувальні – опорна напруга з ОМК, що перевищує рівень шумів, через інтегрувальні ланки R_6C_9 і R_7C_8 . Опорна напруга формується з використанням 8-розрядного генератора широтно-імпульсної модуляції ОМК. Значення опорної напруги, що відповідає шумовому порогу отриманого сигналу з УЗД, визначено в процесі тестування роботи схеми АЦІ та дорівнює 10 відносним одиницям, що не перевищує 4 % від величини максимального розмаху корисного сигналу.

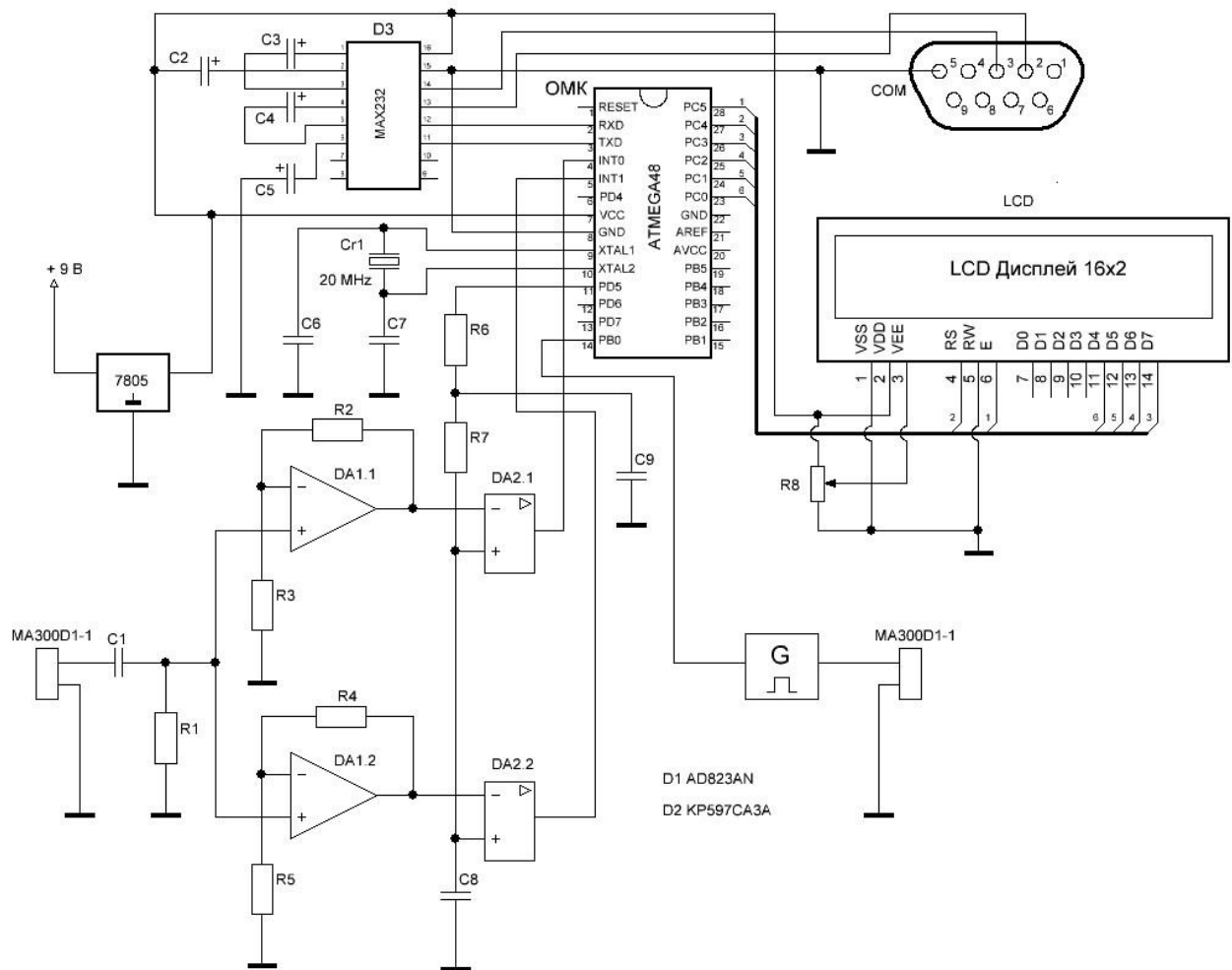


Рисунок 21 – Принципова схема аналого-цифрового інтерфейсу.

На першому етапі виявлення сигналу ОМК працює з каналом ПП1 і K1. Про відсутність сигналу на вході K1 свідчить переповнення лічильника таймера ОМК. В такому випадку на пристрій індикації (LCD дисплей) приладової системи виводиться відповідне повідомлення, а на ПК передається відповідний код. Якщо на інвертованому вході K1 компаратора виявлено сигнал, то проводиться вимірювання амплітуди відгуку першого максимуму (U_1) за алгоритмом порозрядного наближення. Водночас ознакою недобору коду є виникнення переривання від компаратора, а ознакою перебору – переповнення таймера при очікуванні сигналу. Якщо величина U_1 більша за 255 відносних одиниць, то ОМК починає працювати з каналом ПП2 і K2 за аналогічним

алгоритмом. Якщо ж і далі має місце перевищення межі діапазону, то формується відповідне повідомлення на LCD дисплей і у ПК.

По завершенні вимірювання амплітуди U_1 виводиться відповідне повідомлення на LCD дисплей ПК та формуються дані для передачі у ПК, а рівень напруги на неінвертувальному вході компаратора зменшуємо у два рази. При відносному значенні амплітуди ШІМ, що відповідає $U_1/2$, проводимо вимірювання часу до зростання ($t_{\uparrow}$) та спаду сигналу ($t_{\downarrow}$) від початку відкриття часового вікна (рис. 22).

Значення t_1 для першого максимуму відгуку визначається за таким співвідношенням:

$$t_1 = t_{time\ window\ delay} + \frac{t_{\uparrow} + t_{\downarrow}}{2}. \quad (20)$$

На LCD дисплей приладової систем виводиться значення $\frac{t_{\uparrow} + t_{\downarrow}}{2}$, а у ПК передається t_1 , за цих обставин також виконується переключення типу динамічного запиту переривання від компаратора.

На наступному етапі алгоритму вимірювань виконується пошук i -тої амплітуди головного максимуму (U_i) у відгуку УЗ-сигналу шляхом поступового підняття рівня напруги на одному із входів компаратора до відсутності запитів переривань. Одночасно фіксується час від початку відкриття часового вікна до приходу головного максимуму (t_{max}), що викликав переривання.

Значення t_i для i -го максимуму відгуку визначається за таким співвідношенням

$$t_i = t_{time\ window\ delay} + t_{max} \quad (21)$$

приймається за час проходження УЗ-імпульсу з максимальною амплітудою відгуку.

Величини U_i та t_{max} виводяться на LCD дисплей приладової систем, а в ПК передаються значення U_i та t_i для подальших розрахунків.

Амплітуда УЗ-імпульсу зондування задається програмно в ОМК з використанням відповідного апаратного забезпечення. Для однополярного збудження випромінювача МА300D1–1 передбачено два каскади формування імпульсу: один забезпечує отримання заданої тривалості наростання напруги та її значення, а другий формує її спад. Необхідне значення U_{pulse} для збудження випромінювача МА300D1–1 формується в блоці G схеми АЦІ приладової системи за командою з ОМК (рис. 20).

Обмін даними між електронним блоком ІВПС та ПК, візуалізацію результатів вимірювання та розрахунок пружних параметрів матеріалу проводили за допомогою розробленої програми.

Згідно запропонованої методики робота програми передбачає: відкриття послідовного порту ПК, через який відбувається обмін даними; введення даних (товщина та густина зразка); розрахунок швидкості ультразвуку в імерсійній рідині; обробку результатів вимірювань $\Delta t_{l,t}$, $A_{l,t}$ та представлення даних у вигляді таблиці й графіка залежності A_t від кута повороту зразка; визначення кута Брюстера за максимумом величини амплітуди сигналу; розрахунок

пружних параметрів матеріалу за співвідношення (15)–(19); вивід і друк результатів розрахунку.

Деталізовано визначення похибок при імерсійних вимірюваннях та визначенні модулів пружності конструкційних полімерних і гетерогенних матеріалів. Розроблена ІВПС забезпечує вимірювання ν_l з граничною відносною похибкою 1,1 % і ν_t – 0,5 % та, відповідно, модуля Юнга – 2,5 % і модуля зсуву 1,8 %.

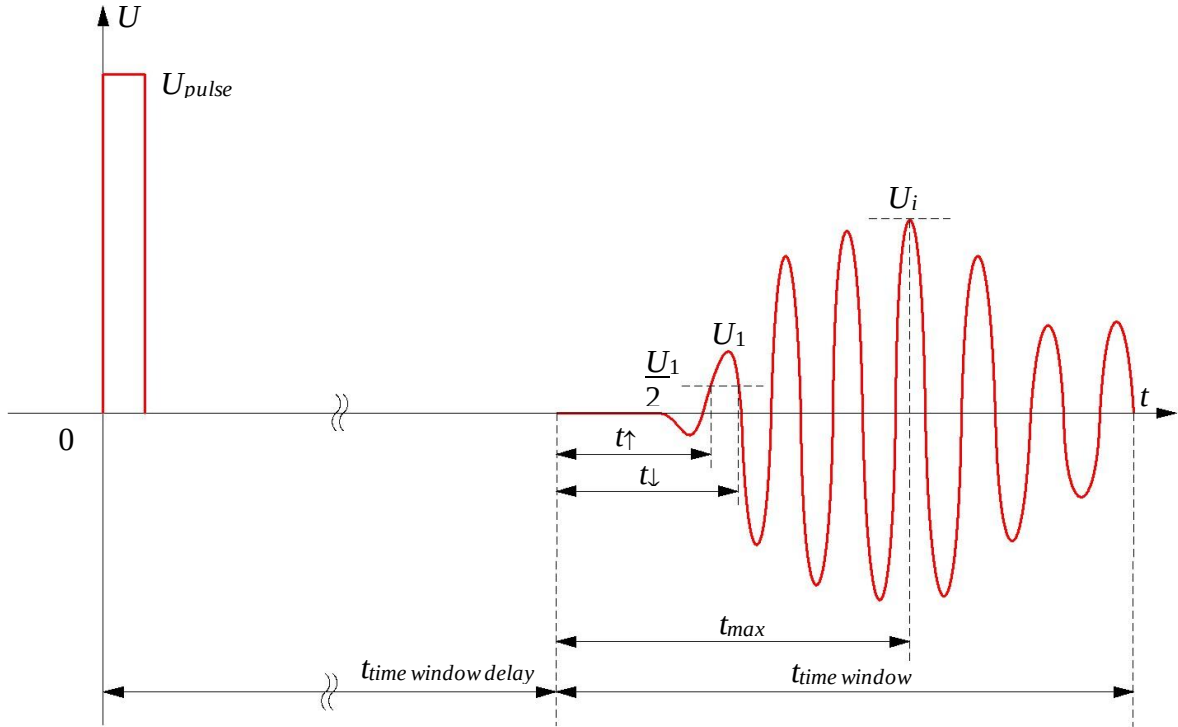


Рисунок 22 – Схема визначення часових інтервалів проходження УЗ-імпульсу у часовому вікні.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи запропоновано три методи визначення комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика при поширенні у ньому поздовжньої і поперечної акустичних хвиль та поверхневої акустичної хвилі (ПАХ) Релея.

За відомих значень ν_l та ν_t дійсну та явну частини комплексного ν^* полімерного ауксетика обчислюють за таким співвідношенням:

$$\nu' = \frac{\nu_l^2 (\omega^2 - \alpha_l^2 \nu_l^2) (\omega^2 + \alpha_t^2 \nu_t^2)^2}{2 \nu_t^2 (\omega^2 - \alpha_t^2 \nu_t^2) (\omega^2 + \alpha_l^2 \nu_l^2)^2} - 1, \quad (22)$$

$$\nu'' = \frac{\nu_l^3 \alpha_l (\omega^2 + \alpha_t^2 \nu_t^2)^2}{2 \nu_t^3 \alpha_t (\omega^2 + \alpha_l^2 \nu_l^2)^2} - 1. \quad (23)$$

Отримано розв'язок рівняння Релея у випадку поширення в ауксетику поперечної та поверхневої акустичних хвиль:

$$\frac{v_R}{v_t} = \frac{4}{3} \left(\sqrt{2(6\xi^2 - 1)^3} \cos \left(\frac{1}{3} \left(\arccos \left(\frac{45\xi^2 - 17}{2\sqrt{2(6\xi^2 - 1)^3}} \right) + 2\pi \right) \right) + 2 \right), \quad (24)$$

де v_R – швидкості ПАХ Релея; $\xi^2 = \frac{2v - 1}{2v - 2}$.

З урахуванням затухання акустичних хвиль:

$$k_l^* = k_l'(1 + i\alpha); \quad k_t^* = k_t'(1 + i\beta); \quad k_R^* = k_R'(1 + i\gamma), \quad (25)$$

де $\alpha = k_l''/k_l'$; $\beta = k_t''/k_t'$; $\gamma = k_R''/k_R'$ – малі дійсні поправки, що чисельно дорівнюють коефіцієнтам поглинання α_l , α_t та ПАХ Релея (α_R) на довжині відповідної хвилі (λ_l ; λ_t ; λ_R):

$$\alpha = \alpha_l \lambda_l; \quad \beta = \alpha_t \lambda_t; \quad \gamma = \alpha_R \lambda_R. \quad (26)$$

Для ξ' , ξ'' комплексного параметра ξ^* отримано такі співвідношення:

$$\xi'^2 = \frac{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 24\eta'^2 - 16}{16(\eta'^2 - 1)}; \quad (27)$$

$$\xi''^2 = \frac{3\eta'^6\beta - 8\eta'^4(2\beta + \gamma) + 24\eta'^2(\beta + 2\gamma) - 48\beta}{16\eta'^2(\beta + 2\gamma) - 48\beta}, \quad (28)$$

де $\eta' = k_t'/k_R'$.

Для визначення величини v' отримано таке співвідношення:

$$v' = \frac{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 16\eta'^2 - 8}{\eta'^6 - 8\eta'^4 + 8\eta'^2}, \quad (29)$$

Для визначення уявної частини комплексного v^* запропоновано рівняння:

$$\xi'^2 + \xi''^2 = \frac{2\sqrt{v'^2 + v''^2} - 1}{2\sqrt{v'^2 + v''^2} - 2}, \quad (30)$$

При поширенні поздовжньої та поверхневої акустичних хвиль у ауксетику для знаходження дійсної та уявної частини комплексного коефіцієнт Пуассона v^* отримано такі рівняння відносно ξ'^2 та ξ''^2 при відомому значенні ξ'^2 ($\zeta = k_l'/k_R'$):

$$16(\xi'^2)^4 - 16(\zeta'^2 + 1)(\xi'^2)^3 + 24\zeta'^2(\xi'^2)^2 - 8\zeta'^4(\xi'^2) + \zeta'^6 = 0; \quad (31)$$

$$48\gamma(\xi'^2)^4 - 16\zeta'^2(\alpha + 2\gamma)(\xi'^2)^3 - 48\gamma(\xi'^2)^3 + 24\zeta'^2(\alpha + 2\gamma)(\xi'^2)^2 - 8\zeta'^4(2\alpha + \gamma)(\xi'^2) + 3\alpha\zeta'^6 = 0 \quad (32)$$

Величини v' та v'' знаходимо за співвідношенням

$$\xi'^2 = \frac{2v' - 1}{2v' - 2} \quad (33)$$

та (30).

Вимірювання швидкостей поширення v_l , v_t та коефіцієнтів їх поглинання α_l , α_t проводили для ТПУ) при частоті ультразвуку $\omega = 1,884$ МГц. Результати вимірювань v_l , v_t та значення v' , v'' подано в табл. 2.

Збудження та прийом ПАХ Релея проводили за допомогою гребінчастої структури, що створює на поверхні твердого тіла періодичну сукупність нормальних збурень з просторовим періодом λ_R . Для швидкості ПАХ Релея $v_R = 976$ м/с, при $v \cong -1$, довжина хвилі дорівнює $\lambda_R \cong 3,3$ мм.

Схема експериментального стенду та експериментальний стенд із УЗ-перетворювачами МА-300А1 представлені на рис. 23, 24.

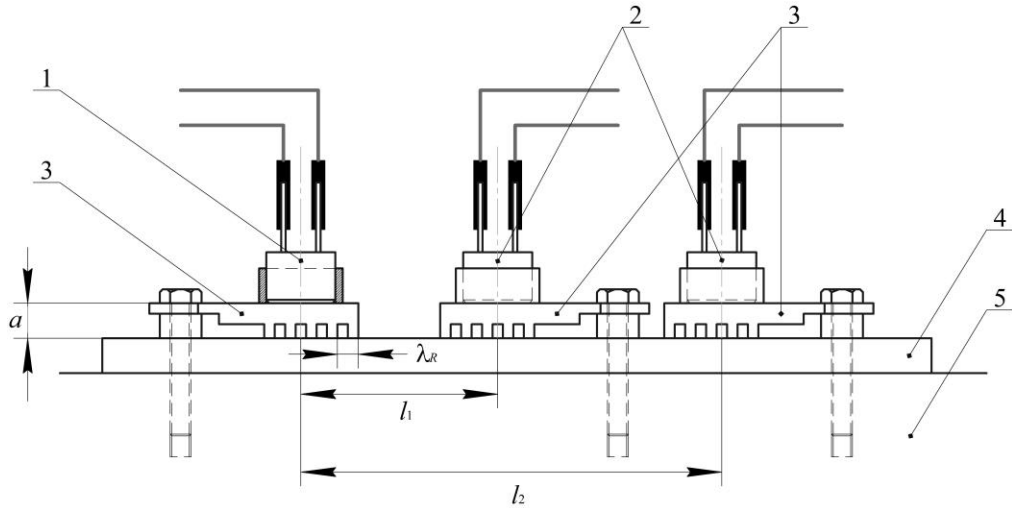


Рисунок 23 – Схема експериментального стенду для збудження та прийому ПАХ:
1 – УЗД (випромінювач) МА-300А1; 2 – УЗД (приймач) МА-300А1; 3 – гребінчаста структура; 4 – зразок матеріалу; 5 – поглинаюча підкладка.

Запропоновано експериментальне значення v_R визначати за виміряним часом (τ) проходження релеївської хвилі по поверхні зразка і розраховувати за таким співвідношенням:

$$v_R = \frac{v_l l}{v_l \tau - 2a}, \quad (34)$$

де l – між центрами УЗ-перетворювачів, v_l – швидкість поздовжньої хвилі в матеріалі гребінчастої структури; a – висота гребінчастої структури.

Для оцінки похибки та перевірки адекватності отриманих значень v_R вимірювали час ($\tau_{(standart)}$) проходження імпульсу релеївської хвилі по поверхні еталонного матеріалу для якого значення $v_{R(standart)}$ відомо. За однакової відстані між УЗ-перетворювачами для обох матеріалів отримано співвідношення для v_R :

$$v_R = \frac{v_{R(standart)} l}{v_{R(standart)} (\tau - \tau_{(standart)}) + l}. \quad (35)$$

Показано, що коефіцієнт поглинання α_R релеївських хвиль в матеріалі можна визначити за таким співвідношенням:

$$\alpha_R = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (36)$$

де A_1 – амплітуда сигналу на УЗД, що знаходиться на відстані l_1 ; A_2 – амплітуда сигналу на УЗД, що знаходиться на відстані l_2 .

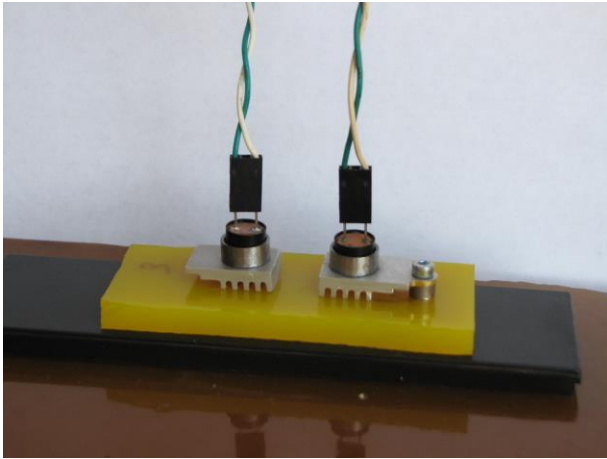


Рисунок 24 – Експериментальний стенд:
1 – УЗ-перетворювач (випромінювач)
МА–300А1; 2 – УЗ-перетворювач
(приймач) МА–300А1; 3 – гребінчаста
структура; 4 – зразок матеріалу;
5 – поглинаюча підкладка.

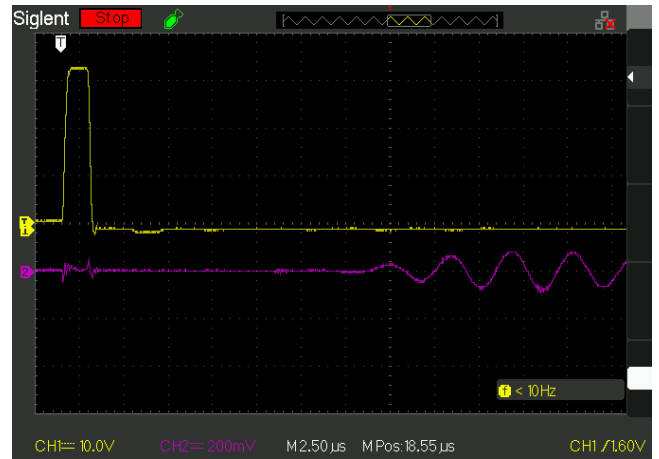


Рисунок 25 – Осцилограми імпульсу
збудження ПАХ на УЗД (передавачі) та
прийнятого сигналу ПАХ на УЗД
(приймачі) експериментального стенду.

Вимірювання τ та A_1 , A_2 УЗ-сигналу під час прийому ПАХ Релея проводили за допомогою розробленого електронного блоку ПС. Імпульс збудження ПАХ на УЗД (передавачі) та сигнал від УЗД (приймача) контролювали за допомогою цифрового осцилографа (рис. 25).

Експериментальні значення v_R і α_R подані в табл. 2. Абсолютна похибка визначення швидкості ПАХ Релея не перевищує 4 м/с, а для коефіцієнта поглинання – 2 Нп/м.

Таблиця 2

Експериментальні значення та параметри моделі поширення поздовжніх,
поперечних та поверхневих хвиль

Параметри	Значення
Швидкість поздовжньої хвилі v_l , м/с	1635
Швидкість поперечної хвилі v_t , м/с	1415
Коефіцієнт поглинання поздовжньої хвилі α_l , Нп/м	36
Коефіцієнт поглинання поперечної хвилі α_t , Нп/м	197
Дійсна частина коефіцієнта Пуассона ν' (за співвідношенням (22))	– 0,99
Уявна частина коефіцієнта Пуассона ν'' (за співвідношенням (23))	– 0,85
Коефіцієнт поглинання на довжині поздовжньої хвилі α	0,196
Коефіцієнт поглинання на довжині поперечної хвилі β	0,929
Швидкість ПАХ Релея v_R , м/с	980
Коефіцієнт поглинання ПАХ хвилі α_R , Нп/м	301
Коефіцієнт поглинання на довжині ПАХ хвилі γ	0,983
Дійсна частина коефіцієнта Пуассона ν' (за співвідношенням (30))	– 0,98
ν'' (розв'язок рівняння (31) із врахуванням (29))	– 1,82
Дійсна частина коефіцієнта Пуассона ν' (із співвідношення (34) з врахуванням (32))	– 0,97
Уявна частина коефіцієнта Пуассона ν'' (із співвідношенням (31) з врахуванням (33))	– 1,60

Аналіз отриманих результатів для дійсної частини комплексного v^* показує, що для трьох випадків вимірювань відхилення v' її середнього значення дорівнює 0,1, що складає 1 %. Для величини v'' комплексного коефіцієнта Пуассона середнє значення дорівнює – 1,42. Величини абсолютних відхилень для трьох експериментальних значень v'' , визначених на основі парних експериментів ($l, t; t, R; l, R$), відповідно дорівнюють: 0,57; 0,40; 0,18.

Для опису нелінійних пружних властивостей твердих тіл використовуються модулі пружності третього порядку (МПТП). У **шостому розділі** дисертаційної роботи запропоновано методику визначення МПТП гетерогенних геоматеріалів. Водночас установлено, що для визначення МПТП ізотропного твердого тіла необхідно провести принаймні три незалежних експерименти. Такими експериментами можуть бути вимірювання v_l та v_t у зразку матеріалу при різних напруженнях.

Для визначення МПТП проводили вимірювання часу проходження ультразвукового УЗ-імпульсу через зразок матеріалу за трьома схемами (рис. 26–28) при тиску p та визначали, відповідно, швидкості $v_{l\parallel}$, $v_{l\perp}$ та $v_{t\angle}$ УЗ-хвиль.

$$v_{l\parallel} = \frac{v_{l1}d}{v_{l1}\tau_{\parallel} - 2a}. \quad (37)$$

Запропоновано визначити величину $v_{l\parallel}$ після проведення вимірювання часу $\tau_{1\parallel}$ проходження УЗ-імпульсу через зразок еталонного матеріалу товщиною $d_{em.}$, із відомою швидкістю поширення поздовжніх хвиль $v_{l_{em.}}$, та часу $\tau_{2\parallel}$ проходження УЗ-імпульсу через зразок для якого проводяться вимірювання:

$$v_{l\parallel} = \frac{v_{l_{em.}}d}{v_{l_{em.}}(\tau_{2\parallel} - \tau_{1\parallel}) + d_{em.}}. \quad (38)$$

Швидкість поширення $v_{l\perp}$ при вимірюванні за схемою 2 визначаємо за співвідношенням:

$$v_{l\perp} = \frac{\tau_{\perp}}{l}, \quad (39)$$

де $\tau_{\perp}$ – час проходження УЗ-імпульсу в напрямку перпендикулярному до прикладеної напруги, l – довжина зразка.

Під час проведення вимірювань за схемою 3 отримано співвідношення для часу $\tau_{\angle}$ проходження УЗ-імпульсу:

$$\tau_{\angle} = \frac{2b}{v_{l2}} + \frac{v_{l2}d}{v_{t\angle}\sqrt{v_{l2}^2 - v_{t\angle}^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (40)$$

де b – відстань від центру УЗ-перетворювач до поверхні зразка; v_{l2} – швидкість поздовжньої УЗ-хвилі в клині, $v_{t\angle}$ – швидкість поперечної хвилі в зразку; α – кут нахилу клина.

Величину $v_{t\angle}$ визначаємо з розв'язку рівняння (40).

За відомих $v_{l\parallel}$, $v_{l\perp}$ та $v_{t\angle}$, (табл. 3) проведені розрахунки МПТП A , B і C (табл. 4).

Таблиця 3

Швидкості поширення поздовжніх та поперечних хвиль у зразках деяких ізотропних гетерогенних геоматеріалів

Зразок	ρ , кг/м ³	v_l , м/с	v_t , м/с	ν	$v_{l\parallel}$, м/с	$v_{l\perp}$, м/с	$v_{t\angle}$, м/с
Аргіліт	2370	3440	2030	0,21	4145	3825	2335
Алевроліт	2455	3475	1960	0,27	4045	3880	2280
Пісковик	2320	3390	1995	0,24	4190	3875	2315

Таблиця 4

Модулі пружності зразків деяких ізотропних гетерогенних геоматеріалів

Зразок	$E_0 \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	$\mu_0 \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	$k_0 \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	$A \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	$B \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	$C \cdot 10^{-10}$, Н/м ²
Аргіліт	2,4	1,0	1,1	$-654,5 \pm 14,0$	$294,9 \pm 7,1$	$-484,7 \pm 7,1$
Алевроліт	2,4	0,9	1,1	$-742,0 \pm 15,6$	$352,8 \pm 6,5$	$-583,0 \pm 6,4$
Пісковик	2,3	0,9	1,1	$-627,5 \pm 13,5$	$288,9 \pm 6,7$	$-491,2 \pm 6,7$

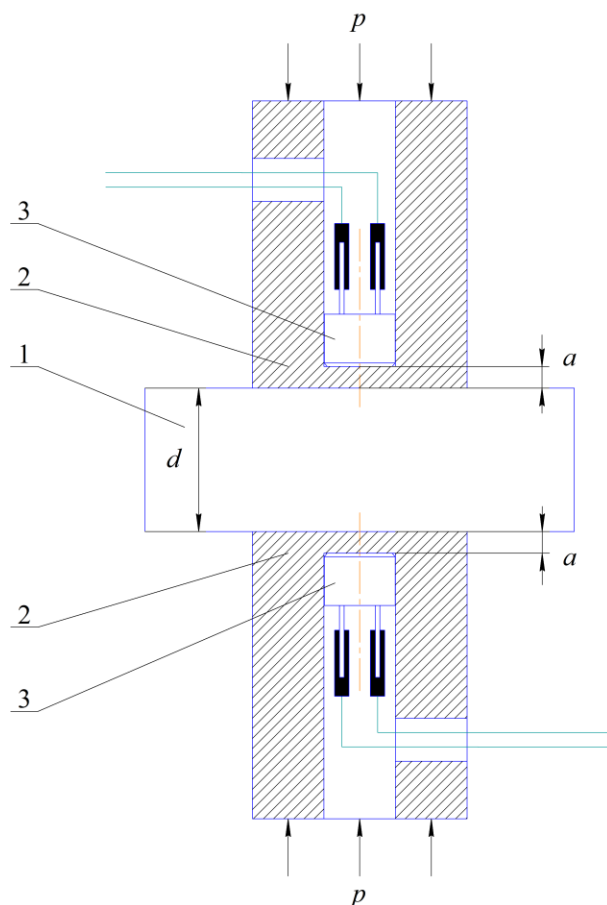


Рисунок 26 – Схема 1 вимірювання швидкості поздовжньої хвилі при напрузі, що прикладена вздовж напрямку поширення хвилі: 1 – зразок; 2 – металеві пуансони; 3 – УЗД.

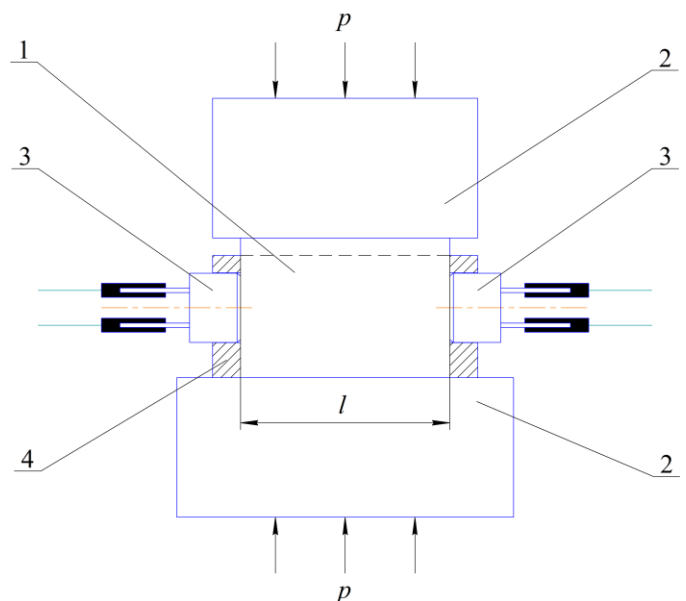
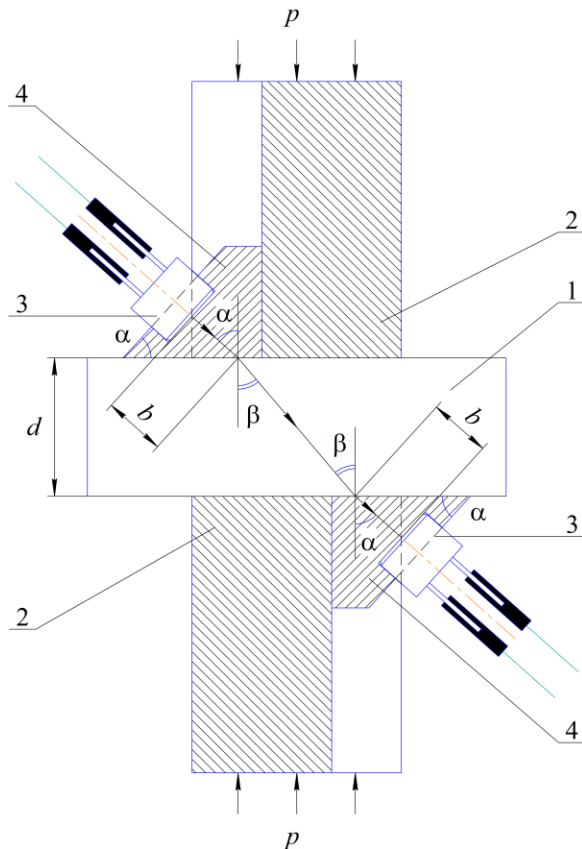


Рисунок 27 – Схема 2 вимірювання швидкості поздовжньої хвилі при напрузі, що прикладена перпендикулярно напрямку поширення хвилі: 1 – зразок; 2 – металеві пуансони; 3 – УЗД; 4 – тримач УЗД.



Аналіз отриманих результатів для МПТП показує, що величини A , B і C на два порядки вищі за модулі пружності другого порядку зразків ізотропних гетерогенних геоматеріалів.

Рисунок 28 – Схема 3 вимірювання швидкості поперечної хвилі при напрузі, що прикладена до напрямку поширення хвилі: 1 – зразок; 2 – металеві пуансони, 3 – ультразвукові перетворювачі; 4 – клин.

ВИСНОВКИ

На основі виконаних досліджень отримані такі наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз сучасного стану розвитку методів і засобів вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона різних типів матеріалів, на основі якого проаналізовано фактори, що визначають вибір методу для вимірювання необхідних величин із заданою точністю.

2. Розроблений алгоритм керування апаратними засобами в інформаційно-вимірювальній приладовій системі розширює можливості автоматизації процесу вимірювання амплітуди в резонансному методі консольно закріпленого стрижня.

3. Запропонований метод отримання зображень коливання зразка за зміни частоти його збудження та алгоритмів цифрової обробки й аналізу зображення дає можливість мінімізувати похибку та компенсувати небажані завади під час визначення лінійних розмірів області бінарного зображення, що відповідає амплітуді коливань вільного кінця зразка на визначеній горизонтальній базовій лінії.

4. Отримані значення відносної амплітуди від частоти збудження коливань зразків конструкційних полімерних матеріалів та оцінка відносної похибки вимірювань на основній резонансній частоті показали, що запропонована інформаційно-вимірювальна приладова система реалізує покладені на неї функції з граничною відотною похибкою 1,9 %.

5. Залежності коефіцієнтів відбивання, трансформації та збудження під час падіння поздовжньої та поперечної хвиль на межу поділу ауксетик-

середовища та рідини залежить від коефіцієнта Пуассона та акустичних жорсткостей контактних середовищ. Критичні кути, при яких відбувається обмін поляризацією та повне внутрішнє відбивання від межі рідини та ауксетик-середовища, визначаються величиною коефіцієнту Пуассона.

6. Характер кутових залежностей коефіцієнтів відбивання, трансформації та збудження під час падіння акустичної хвилі на межу поділу залежить від величини коефіцієнта Пуассона та акустичних жорсткостей контактних середовищ, водночас існують суттєві відмінності під час падіння хвилі на поверхню ауксетика порівняно з середовищем, де коефіцієнт Пуассона більший нуля. Критичні кути, при яких відбиті та заломлені хвилі стають неоднорідним, залежать від співвідношень швидкостей поширення поздовжніх поперечних хвиль в контактних середовищах.

7. Запропонована конструкція приладової системи для вимірювань швидкостей поширення ультразвукових хвиль у зразках забезпечує граничне значення відносної похибки 1,1 % для поздовжньої хвилі та 0,5 % для поперечної хвилі.

8. Проведені експериментальні дослідження та порівняльний аналіз показали, що імерсійний ультразвуковий метод вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної УЗ-хвиль у зразках ряду конструкційних полімерних матеріалів та гетерогенних геоматеріалів має перспективи технологічного застосування для визначення коефіцієнта Пуассона, модуля Юнга з граничним значенням відносної похибки 2,5 % та модуля зсуву – 1,8 %. Практичне впровадження імерсійного ультразвукового методу може бути використане в промисловості та державних органах метрологічного контролю для створення бази даних конструкційних матеріалів.

9. Використання співвідношень теорії пружності і рівняння Релея за відомих швидкостей поширення поздовжньої, поперечної та поверхневої акустичних хвиль і коефіцієнтів їх поглинання дає можливість проводити розрахунки дійсної та уявної частин комплексного динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика. Запропонована експериментальна методика визначення швидкості поширення поверхневої хвилі Релея та коефіцієнта її поглинання в полімерному ауксетику. Отримані значення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона для ауксетика з коефіцієнтом Пуассона, рівним – 1, указують на адекватність запропонованих модельних представлень для процесів поширення та поглинання акустичних хвиль трьох типів і хорошу відтворюваність результатів під час розрахунків на основі парних експериментів.

10. Запропонований метод визначення модулів пружності третього порядку на основі вимірювань швидкостей поширення поздовжніх та поперечних УЗ-хвиль у гетерогенних геоматеріалах під одновісним напруженням показав, що для отриманих значень похибка їх визначення задовольняє умови експерименту. Модулі пружності третього порядку більш чутливі до складу, структури й стереохімії гетерогенних геоматеріалів, ніж модулі пружності другого порядку. Метод із відповідними поправками може

бути використаний для визначення залишкових напруг у різного типу конструкційних та гетерогенних матеріалах.

11. Отримані експериментальні значення модулів пружності та коефіцієнта Пуассона ряду конструкційних полімерних та гетерогенних геоматеріалів дозволили розв'язати ряд фундаментальних проблем і практичних задач у фізиці полімерів, прикладному матеріалознавстві та геомеханіці щодо пружних і непружних деформацій, перколяційних та фрактальних підходів до аналізу механічних параметрів матеріалів, енергетичного стану матеріалу, стійкості об'єктів геотехнічних систем та процесів руйнування на основі дефектів структури.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Мащенко В. А. Методи вимірювань та приладові системи для визначення модулів пружності конструкційних та гетерогенних матеріалів. Монографія / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков. – Рівне: «Волинські обереги», 2020. – 180 с.

2. Мащенко В. А. Методи вимірювань та автоматизовані приладові системи для визначення модулів пружності. Монографія / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков. – Рівне: «Волинські обереги», 2023. – 196 с.

Статті, що внесені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та WOS:

3. Interrelationship of thermophysical and electrophysical properties of PVS systems / B. S. Kolupaev, N. A. Bordyuk, V. A. Sidletskij, V. A. Mashchenko // *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*. – 1998. – V. 71. – N. 5. – P. 819–822.

4. Contribution of surface Rayleigh waves to the heat capacity of poly(vinyl chloride) / V. V. Klepko, B. B. Kolupaev, E. V. Lebedev, V. A. Mashchenko // *Polymer Science*. – Ser. A. – 2009. – V. 51. – N. 9. – P. 986–990.

5. Мащенко В. А. Дослідження особливостей деформації неідеально-пружних гірських порід / В. А. Мащенко, І. О. Садовенко // *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 2014. – № 6. – С. 80–86.

6. Determination of Young's dynamic modulus of polymer material by resonance vibrating-reed method / V. Mashchenko, V. Krivtsov, V. Kvasnikov, V. Drevetskiy // *Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. – 2019. – № 4. – P. 34–37.

7. Mashchenko V. A. Thermodynamic aspect of destruction rock / V. A. Mashchenko, O. Y. Khomenko, V. P. Kvasnikov // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2020. – № 1. – С. 25–30.

8. Fractal percolation approach in determining structured and mechanical properties of metal filled polyurethane auxetics / T. M. Shevchuk, M. A. Bordyuk, V. V. Krivtsov, V. A. Mashchenko // *Металофізика і новітні технології*. – 2020. – Т. 42. – № 9. – P. 1293–1302.

9. Viscoelastic Properties of Filled Polyurethane Auxetics / T. M. Shevchuk, M. A. Bordyuk, V. V. Krivtsov, V. V. Kukla, V. A. Mashchenko // *Physics and chemistry of solid state*. – 2021. – V. 22. – N. 2. – P. 328–335.

10. Percolation characteristics of filled polyurethane auxetics / T. M. Shevchuk, M. A. Bordyuk, V. A. Mashchenko, V. P. Kvasnikov, V. V. Krivtsov // *Physics and chemistry of solid state*. – 2022. – V. 23. – N. 3. – P. 590–596.

11. Debye temperatures and nanostructuring of polyurethane auxetics / T. M. Shevchuk, M. A. Bordyuk, V. A. Mashchenko, V. V. Krivtsov, L. V. Mashchenko // *Physics and chemistry of solid state*. – 2024. – V. 25. – N. 2. – P. 316–323.

Статті у наукових фахових виданнях:

12. Мащенко В. А. Прогнозування стійкості вертикальної свердловини великого діаметру при розробці алмазонасних родовищ корисних копалин / В. А. Мащенко, В. О. Рачковський, В. П. Крайчук // *Вісник Криворізького національного університету: збірник наукових праць*. – Кривий Ріг: КНУ, 2012. – Вип. 33. – С. 24–28.

13. Садовенко І. О. Метод оцінки величини поверхневої енергії гірських / І. О. Садовенко, В. А. Мащенко // *Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України*. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 107. – С. 58–63.

14. Експериментальна установка для вимірювання пружних параметрів гірських порід / В. А. Мащенко, О. О. Панчук, І. О. Садовенко, М. А. Бордюк // *Вісник Інженерної академії України*. – 2012. – Вип. 3–4. – С. 60–64.

15. Мащенко В. А. Відбивання та заломлення акустичних хвиль на межі пружних середовищ з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Мащенко // *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Технічні науки*. – Вип. 3(71). – Частина 2. – Рівне: НУВГП, 2015. – С. 382–387.

16. Мащенко В. А. Відбивання та збудження акустичних хвиль на межі рідини і пружного середовища з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Мащенко // *Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки»*. – 2016. – Вип. 54. – С. 209–213.

17. Мащенко В. А. Конструктивно-технічні параметри приладової системи для імерсійного методу вимірювання швидкостей ультразвукових хвиль // В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // *Вісник Інженерної академії України*. – 2018. – Вип. 3. – С. 158–162.

18. Мащенко В. А. Відбивання акустичних хвиль від межі рідини та ауксетик-середовища / В. А. Мащенко // *Міжвузівський збірник наукових праць „Наукові нотатки”*. – 2018. – Вип. 64. – С. 113–118.

19. Мащенко В. А. Аналіз параметрів моделі проходження ультразвукових хвиль через пластину занурену у рідину / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // *Збірник наукових праць ОДАТРА*. – 2018. – № 2(13). – С. 27–32.

20. Мащенко В. А. Визначення модулів пружності конструкційних та гетерогенних матеріалів ультразвуковим методом / В. А. Мащенко // *Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки»*. – 2019. – Вип. 65. – С. 165–169.

21. Мащенко В. А. Визначення модулів пружності третього порядку гетерогенних геоматеріалів за допомогою імпульсних ультразвукових вимірювань / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – Вип. 2. – С. 12–18.

22. Визначення динамічних модулів пружності полімерних ауксетиків за допомогою імпульсних іммерсійних вимірювань швидкостей поширення ультразвукових хвиль / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков, М. А. Бордюк, Т. М. Шевчук // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2019. – № 1(14). – С. 13–18.

23. Мащенко В. А. Аналіз резонансних методів визначення динамічного модуля пружності конструкційних полімерних матеріалів / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков, В. В. Кривцов // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – Вип. 3. – С. 106–113.

24. Мащенко В. А. Інформаційно-вимірвальна система для визначення амплітуди коливань закріпленого полімерного стрижня на основі цифрової обробки сигналів / В. А. Мащенко, П. В. Кіндрат // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2019. – № 2(15). – С. 49–57.

25. Мащенко В. А. Аналогово-цифровий інтерфейс для вимірювання амплітуди та часу проходження ультразвукового сигналу / В. А. Мащенко // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – 2019. – № 2 (64). – С. 35–40.

26. Мащенко В. А. Частотно-температурні вимірювання динамічного модуля пружності конструкційного полівінілхлориду / В. А. Мащенко, В. В. Кривцов, В. П. Квасніков // Міжвузівський збірник наукових праць „Наукові нотатки”. – 2019. – Вип. 68. – С. 68–73.

27. Мащенко В. А. Аналіз методів вимірювання комплексних динамічних модулів пружності в'язкопружних полімерних матеріалів / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – Вип. 4. – С. 144–153.

28. Мащенко В. А. Резонансні методи вимірювання та приладові системи для визначення динамічних модулів пружності полімерних матеріалів / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2020. – Вип. 1. – С. 144–153.

29. Мащенко В. А. Фізичні принципи та методи вимірювання коефіцієнта Пуассона в'язкопружних полімерних матеріалів / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». – 2020. – Вип. 16. – С. 73–81.

30. Мащенко В. А. Метод визначення динамічного коефіцієнта Пуассона полімерного ауксетика за допомогою трьох типів акустичних хвиль / В. А. Мащенко // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – 2020. – № 1 (65). – С. 16–22.

Статті за темою дисертаційної роботи:

31. Мащенко В. А. Енергетичні закономірності геомеханічних процесів в масиві гірських порід при динамічних явищах техногенного характеру / В. А. Мащенко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Технічні науки. – Рівне: НУВГП, 2013. – Вип. 1 (61). – С. 12–19.

32. Мащенко В. А. Дослідження властивостей хвиль Релея на вільній поверхні ізотропного твердого тіла з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Мащенко, Б. Б. Колупаєв // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету. – Вип. 8. – Рівне: РДГУ, 2000. – С. 62–64.

33. Плоскі хвилі на вільній поверхні полімерного пружного тіла з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Мащенко, О. М. Волошин, Б. Б. Колупаєв, С. М. Іваніщук // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету. – Вип. 9. – Рівне: РДГУ, 2002. – С. 36–38.

34. Фрактально-перколяційне моделювання структурної організації наповненого полівінілхлориду / Т. М. Шевчук, М. А. Бордюк, В. В. Кривцов, В. А. Мащенко // Полімерний журнал. – 2019. – № 2. – С. 109–115.

35. Вплив критичного вмісту наповнювача на структурні та характеристики наповнених полімерів вінілового ряду / Т. М. Шевчук, М. А. Бордюк, В. В. Кривцов, В. А. Мащенко // Полімерний журнал. – 2019. – № 4. – С. 264–270.

Патенти України на корисну модель:

36. Патент № 136643 (Україна) МПК (2006) G01H 5/00. Спосіб визначення швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль у зразках твердих тіл [Текст] / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков, В. П. Древецький, В. В. Кривцов, Т. М. Шевчук. – Реєстрац. номер заявки u 2019 02701. Оpubліковано в бюлетені № 16 від 27.08.2019.

37. Патент № 144077 (Україна) МПК G01B 3/1061 5/04 G06T 5/00 7/13 7/136. Спосіб визначення резонансної частоти коливань вільного кінця закріпленого зразка у вигляді стрижня [Текст] / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков, В. В. Кривцов, В. П. Древецький, М. А. Бордюк, В. В. Кривцов. – Реєстрац. номер заявки u 2020 02719. Оpubліковано в бюлетені № 16 від 26.08.2020.

Публікації, що засвідчують апробацію результатів дисертації:

38. Мащенко В. А. Акустичні хвилі на вільній поверхні ізотропного твердого тіла з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Мащенко, Б. Б. Колупаєв // Тези доповідей V Української конференції молодих вчених з високомолекулярних сполук. – Київ, 2003. – С. 133.

39. Нікітчук В. І. Моделі композиційного матеріалу з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. І. Нікітчук, В. А. Мащенко, В. О. Сідлецький // Композиційні матеріали: Тези доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. – С. 113.

40. Мащенко В. А. Дослідження внеску хвиль Релея в теплоємність аморфних полімерів / В. А. Мащенко, Б. С. Колупаєв, Б. Б. Колупаєв // Тези доповідей XI Української конференції з високомолекулярних сполук. – Дніпропетровськ: ДХТУ, 2007. – С. 50.

41. Мащенко В. Відбивання акустичних хвиль від межі пружних півпросторів з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. Мащенко, М. Петрина, І. Панченко // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» присвяченій 50-річчю заснування ТНТУ та 165-річчю з дня народження Івана Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С. 73.

42. Мащенко В. А. Поверхневі акустичні хвилі в насичених рідиною пористо-пружних середовищах з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Мащенко // Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали: матеріали VII Міжнародної наукової конференції. – Луцьк: Вежа-Друк, 2014. – С. 194–196.

43. Мащенко В. А. Модуляція показника заломлення поверхневою акустичною хвилею в матеріалах з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Мащенко, В. О. Сідлецький, О. М. Волошин // Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали: матеріали VIII Міжнародної наукової конференції. – Луцьк: Вежа-Друк, 2016. – С. 36–38.

44. Кривцов В. В. Матеріали на основі полімерних матриць з масивом прецизійних включень / В. В. Кривцов, В. А. Мащенко // IX Міжнародна наукова конференція «Фундаментальна база наноелектроніки». Збірник наукових праць. – Харків: ХНУРЕ, 2017. – С. 71–74.

45. Мащенко В. А. Дослідження звукопоглинаючих властивостей металонаповнених композитів на сонові полімерного ауксетик-середовища / В. А. Мащенко, В. В. Кривцов // Структурна релаксація у твердих тілах: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2018. – С. 255–258.

46. Мащенко В. А. Методика вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної УЗ-хвиль іммерсійним методом у твердих тілах / В. А. Мащенко, В. С. Купко // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА» (МЕТРОЛОГІЯ – 2018). – Харків: ННЦ «Інститут метрології», 2018. – С. 40.

47. Mashchenko V. A. Information-measuring system for determination of elastic parameters of composite polymeric and heterogeneous materials / V. A. Mashchenko, V. P. Kvasnikov // The Eighth World Congress «AVIATION IN THE XXI-st CENTURY» [Електронний ресурс]. – National Aviation University, Kyiv, Ukraine, 2018. – Режим доступу: <http://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2018/paper/viewFile/5180/4067>.

48. Мащенко В. А. Проектування інформаційно-вимірювальної системи для визначення пружних параметрів гетерогенних матеріалів / Тези VII Міжнародної науково-технічної конференції «ДАТЧИКИ, ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ». – Черкаси: видавець ФОП Гордієнко Є. І., 2018. – С. 16–18.

49. Використання ультразвукових хвиль для визначення динамічних модулів пружності полімерних ауксетиків / В.А. Мащенко, М. А. Бордюк, Т. М. Шевчук, В. В. Кривцов / Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне регулювання, метрологія та інформаційні технології: європейський вибір». – Одеса: Бондаренко М. О., 2018. – С. 69–72.

50. Мащенко В. А. Поширення поздовжніх ультразвукових хвиль у шарі дисипативного ауксетик-середовища / В. А. Мащенко // Збірник тез XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи». – Київ: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 159.

51. Mashchenko V. A. Positioning device in the immersion measurement of the propagation velocities of longitudinal and transverse waves in a solid state sample / V. A. Mashchenko, V. P. Kvasnikov // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «AVIA-2019» [Електронний ресурс]. – Національний авіаційний університет, Київ, Україна, 2019. – Режим доступу: <http://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2019/paper/view/5989/4473>.

52. Мащенко В. А. Інформаційна система для визначення амплітуди резонансних коливань консольно-закріпленого полімерного стрижня / В. А. Мащенко, В. В. Кривцов // Технічне регулювання, метрологія, інформаційні та транспортні технології: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. – Одеса, Бондаренко М. О., 2019. – С. 97–99.

53. Mashchenko V. Simulation of resonance oscillations of a cantilever-fixed polymer rod / V. Mashchenko, V. Krivtsov V. Kvasnikov // Proceedings of III International scientific and practical conference “2019: Modeling, control and information technologies” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://itconfdoc.nuwm.edu.ua/index.php/ITConf/article/view/60/29>.

54. Мащенко В. А. Метод та приладова система для визначення модулів пружності третього порядку твердих тіл / В. А. Мащенко // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2020). XIII Міжнародна науково-практична конференція. – Київ: НАУ, 2020. – С. 116–118.

55. Мащенко В. А. Вимірювальний канал приладової системи для вимірювання часу проходження УЗ-імпульсу та його амплітуди / В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2022). XV міжнародна науково-практична конференція. – Київ: НАУ, 2022. – С. 105–107.

56. Мащенко В.А. Вимірювання швидкості поширення поверхневої хвилі Релея в полімерному ауксетику / В. А. Мащенко, В.П. Квасніков // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2023). XVI Міжнародна науково-практична конференція. – Київ: НАУ, 2023. – С. 147–149.

АНОТАЦІЯ

Мащенко В. А. Приладові системи для вимірювання модулів пружності та коефіцієнта Пуассона конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалів. – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – *Прилади та методи вимірювання механічних величин.* – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

У дисертаційній роботі розв’язано комплексну проблему підвищення точності вимірювання параметрів конструкційних полімерних матеріалів для забезпечення функціональності та надійності вузлів і елементів конструкцій промислових апаратів та розроблення приладових систем для вимірювання модулів пружності гетерогенних матеріалів для моніторингу стану технічних об’єктів.

Розроблено методологію вимірювання амплітуди резонансних коливань консольно закріпленого полімерного стрижня на звукових частотах, що базується на обробці цифрового зображення, та розроблено інформаційно-вимірювальну приладову систему з автоматизованим процесом вимірювання модуля пружності.

Розроблено концепцію приладової системи на основі імерсійного методу вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль і коефіцієнтів їх поглинання в конструкційних полімерних та гетерогенних матеріалах для визначення динамічних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона.

Запропонована методика вимірювання швидкості поширення поверхневої хвилі Релея та коефіцієнта її поглинання й розроблена та реалізована приладова система для визначення динамічного коефіцієнта Пуассона полімерних ауксетиків.

Запропоновано концепцію приладової системи для вимірювання швидкостей поширення поздовжньої та поперечної ультразвукових хвиль у зразках гетерогенних геоматеріалів за одновісного напруження, прикладеного в різних напрямках поширення ультразвукових хвиль, що дало змогу визначити модулі пружності третього порядку.

Ключові слова: модуль Юнга, модуль зсуву, модуль об’ємної деформації, коефіцієнт Пуассона, модулі пружності третього порядку, інформаційно-вимірювальна приладова система, поздовжня хвиля, поперечна хвиля, поверхнева хвиля Релея, імерсійний метод, швидкість поширення хвилі, метод резонансних коливань, резонансна частота, амплітуда коливань.

ABSTRACT

Mashchenko V. A. Instrument system for measuring modules elasticity and Poisson's ratio construction polymers and heterogeneous materials. – *Qualifying scientific work on manuscript rights.*

Dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.11.01 – *Devices and methods of measurement of*

mechanical sizes. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation work solves the complex problem of increasing the accuracy of measuring the parameters of structural polymer materials to ensure the functionality and reliability of components and elements of industrial equipment structures and the development of instrumentation systems for measuring the elastic moduli of heterogeneous materials for monitoring the condition of technical objects.

A methodology for measuring the amplitude of resonant vibrations of a cantilevered polymer rod at sound frequencies has been developed, based on digital image processing, and an information and measuring instrument system with an automated process for measuring the elastic modulus has been developed.

A concept for an instrumentation system based on the immersion method for measuring the propagation velocities of longitudinal and transverse ultrasonic waves and their absorption coefficients in structural polymer and heterogeneous materials for determining dynamic elastic moduli and Poisson's ratio has been developed.

A method for measuring the propagation velocity of a surface Rayleigh wave and its absorption coefficient is proposed, and an instrument system for determining the dynamic Poisson's ratio of polymer auxetics is developed and implemented.

The concept of an instrument system for measuring the propagation velocities of longitudinal and transverse ultrasonic waves in samples of heterogeneous geomaterials under uniaxial stress applied in different directions of ultrasonic wave propagation is proposed, which made it possible to determine the third-order elastic moduli.

Keywords: Young's modulus, shear modulus, volume deformation modulus, Poisson's ratio, information-measuring instrument system, longitudinal wave, transverse wave, Rayleigh surface wave, immersion method, resonant oscillation method, resonant frequency, oscillation amplitude.