

¹Я. Соколовський, ¹І. Кенс, ¹О. Сторожук, ²В. Борисов

Національний лісотехнічний університет України,

¹кафедра обчислювальної техніки і моделювання технологічних процесів,
²кафедра автоматизації виробничих процесів, електротехніки й теплотехніки

КОМП'ЮТЕРНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В МАТЕРІАЛАХ

© Соколовський Я., Кенс І., Сторожук О., Борисов В., 2012

Проаналізовано недоліки ультразвукового імпульсного методу. Запропоновано енергетичний критерій та спосіб вимірювання затримки поширення акустичних коливань. Теоретично обґрунтовано високу завадостійкість запропонованого способу. Розроблено структурну схему реалізації та доведено статистичним моделюванням високу завадостійкість способу.

Ключові слова: ультразвуковий імпульсний метод, кореляційна функція, швидкість звуку.

The authors analyzed the shortcomings of the ultrasonic pulse method. Proposed energy criterion and method of measuring propagation delay interference immunity. Theoretically proved high noise immunity of the proposed method. Developed block diagram of implementation and proven high noise immunity with statistical modeling method.

Key words: ultrasonic pulsing method, correlation function, velocity of a sound.

Актуальність проблеми

Сучасні програмні та апаратні можливості персонального комп'ютера (ПК) дають змогу удосконалювати і застосовувати нові методи неруйнівного контролю якості матеріалів за допомогою введення відомих приладів до складу вимірювальної системи. Одним з найпоширеніших є ультразвуковий імпульсний метод (УІМ). Цей метод заснований на способі визначення швидкості (ультра)звуку в матеріалах поділом відстані між пристроєм випромінювання звукової хвилі і пристроєм приймання цієї хвилі (бази прозвучування) на час проходження звуковим імпульсом вказаної відстані. Відлік часу проходження починається з моменту збудження пристрою випромінювання звукової хвилі.

Досягнення імпульсом пристрою приймання у різних приладах визначається за різними критеріями. Багатоваріантність критеріїв значно ускладнює зіставлення результатів вимірювань, отриманих за допомогою різних приладів. Застосування єдиного критерію приходу імпульсу, придатного для усіх матеріалів та умов, є важливою практичною задачею.

Запропоновано енергетичний критерій для визначення часу поширення акустичного імпульсу через канал із шумами, з нерівномірною амплітудно-частотною і з нелінійною фазочастотною характеристиками. Наведено результати комп'ютерного моделювання такого каналу в умовах високого рівня шумів, продемонстровано високу завадостійкість способу вимірювання. Показано, що реалізація пропонованого підходу можлива внаслідок використання засобів сучасної обчислювальної техніки.

Аналіз відомих результатів

У приладах УІМ пристроєм випромінювання та приймання звукової хвилі, як правило, є п'єзокерамічна пластина з вираженими резонансними властивостями. В реальних приладах для збудження коливань випромінювача використовується періодичний короткий імпульс. Тривалість імпульсів збудження є значно коротшою за імпульсну перехідну характеристику п'єзокерамічної

пластини. За цієї умови форма імпульсів збудження не впливатиме на реакцію п'єзокерамічної пластини [1] і її можна вважати прямокутною. Такому імпульсу збудження відповідає широкий частотний спектр дискретних гармонік сигналу з огинаючою:

$$X(j\omega) = \frac{2 \sin \omega t_i}{\omega}, \quad (1)$$

де $X(j\omega)$ – спектральна щільність одиничного імпульсу; ω – кутова частота; t_i – половина тривалості імпульсу збудження.

Зважаючи на велику різницю (п'ять порядків) між періодом повторення і довжиною імпульсу, можна розглядати цей спектр як безперервний. П'єзокерамічна пластина, що використовується для перетворення електричного імпульсу збудження на механічні коливання, завдяки своїм вираженим резонансним властивостям виділяє з гармонік імпульсу збудження $X(j\omega)$ складові, що відповідають її частотній характеристиці. Спектр акустичного сигналу $A(j\omega)$, що випромінюється в матеріал зразка, можна виразити через спектр імпульсу збудження $X(j\omega)$ та частотну характеристику п'єзокерамічної пластини $H(j\omega)$ [2]:

$$A(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega) = \frac{2H(j\omega_0) \sin(\omega t_i)}{\omega \cdot (1 + j2Q(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}))}, \quad (2)$$

де Q – добротність резонансної ланки; ω_0 – резонансна кутова частота; $j^2 = -1$.

Вигляд амплітудної та фазової характеристик, що відповідають $H(j\omega)$, подано на рис. 1 ($Q=4$; $\omega_0=50$ кГц). Навіть за невеликої добротності резонансна ланка значно звужує ширину спектра сигналу і, відповідно, зменшує крутизну фронту сигналу та точність виділення моменту приходу імпульсу.

Ще один етап зменшення ширини спектра сигналу відбувається на приймальній стороні взірця, де ще одна п'єзокерамічна пластина перетворює механічні коливання, що дійшли до межі бази прозвучування, на електричний сигнал $U(t)$. Навіть ідеально узгоджена з випромінювачем за частотними характеристиками приймальна пластина ще більше звужує спектр і згладжує фронт прийнятого сигналу внаслідок нерівномірної амплітудної та нелінійної фазової характеристик. Зміни сигналу через властивості матеріалу виявляються значно меншими за перетворення у приладі випромінювання і приладі приймання сигналу.

Суттєвість частотних спотворень каналу випромінювання і приймання сигналу наочно помітна за зміною форми сигналу з імпульсної на квазігармонійну, стрімкого фронту на плавний резонансний. Похилий фронт прийнятого сигналу робить результати вимірювання чутливими до рівня шумів.

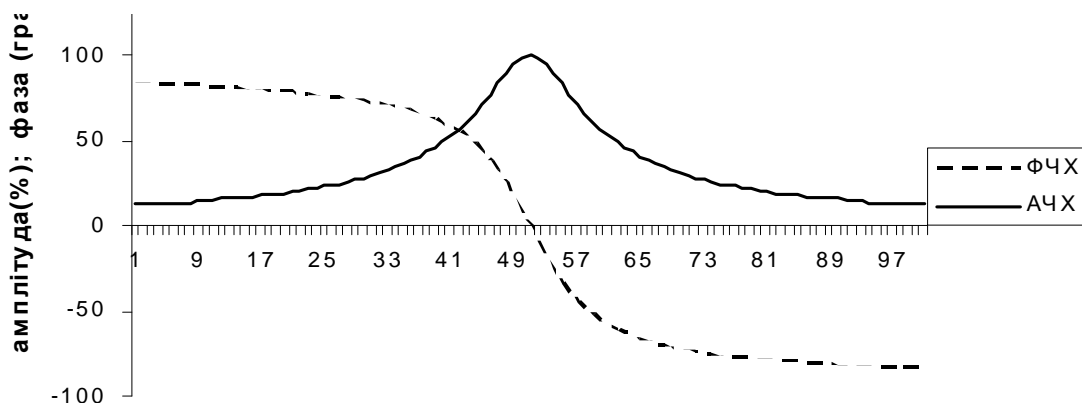


Рис. 1. Вигляд амплітудної та фазової характеристик резонансної ланки ($Q=4$; $\omega_0=50$ кГц)

Для збільшення крутизни переднього фронту сигналу на приймальній стороні використовують високочастотні п'єзокерамічні перетворювачі. Відмова від вимірювань на низьких частотах зменшує інформативність дослідження. Наприклад, в деревині на частотах вище 250 кГц швидкість поширення коливань практично не залежить від частоти, а на нижчих частотах ця залежність відображає властивості матеріалу та його структури [12].

Реально в УІМ замість часу проходження акустичної хвилі вимірюється затримка між різними елементами сигналів – стрімким фронтом імпульсу збудження випромінювача і моментом досягнення переднім фронтом коливання резонансної п'єзокерамічної пластини на приймальній стороні зразка певного рівня. Але якщо профіль хвилі змінює свою форму, то поняття швидкості поширення такої хвилі у строгому розумінні не має сенсу [3]. І все ж такий метод використано в ультразвукових імпульсних приладах УКБ-1, ДУК-20, "Бетон-транзистор", УК-14, УК-72 та інших для визначення фізико-механічних властивостей середовища, крізь яке поширюються акустичні хвилі. Спроби вимірювання затримки між сигналами різної форми – поданого на випромінювач і прийнятого зі зразка – зумовлюють наявність різних критеріїв визначення моменту приходу імпульсу.

Зокрема, серед таких зустрічаємо:

- момент перевершення сигналом рівня шумів;
- момент перевершення масштабованим прийнятим сигналом наперед встановленого рівня;
- точку перегину осцилограми прийнятого сигналу;
- момент перевершення першою похідною сигналу рівня (першої похідної).

За цим переліком очевидна залежність фіксації моменту приходу імпульсу від обраного критерію та рівня шуму на виході приймача. Жоден з цих критеріїв не враховує різниці частотних характеристик матеріалів, різне загасання коливань у зразках, спектра коливань на приймальній стороні, які зумовили появу сигналу на приймачі. Це призводить до фактично різних умов вимірювання часу проходження звуком кожного зразка.

Крім того, систематичну похибку приладу коригують за допомогою комплексу зразків з органічного скла [4]. Такий спосіб корекції не враховує відмінності рівня прийнятого сигналу і частотної залежності параметрів досліджуваного матеріалу і матеріалу зразка.

В УІМ фактично використовуються зондувальні радіоімпульси, що випромінюються у середовищі один за одним з певним інтервалом. Частота заповнення зондувального імпульсу є ультразвуковою. Швидкість звуку знаходять за формулою [5]:

$$C=LT, \quad (3)$$

де C – швидкість звуку; L – база прозвучування; T – час проходження звуку крізь базу прозвучування.

Відповідно, границя допустимої відносної похибки визначення швидкості звуку ∂C_i становить [5]:

$$\partial C_i = |\partial L| + |\partial T|, \quad (4)$$

де ∂L – границя допустимої відносної похибки вимірювання бази прозвучування; ∂T – границя допустимої відносної похибки вимірювання часу проходження звуку.

Як видно з (2), похибка вимірювання часу проходження є визначальною складовою похибки знаходження швидкості звуку імпульсним методом і набагато перевищує похибку вимірювання бази прозвучування.

В ідеальному випадку для вимірювання швидкості звуку цим методом потрібно заміряти час, за який акустична хвиля з крутим фронтом пройде в матеріалі відстань бази прозвучування. Насправді вимірюванню підлягає затримка між практично прямокутним фронтом сигналу збудження випромінювача і прийнятим плавним та похилим фронтом перехідного процесу резонансного перетворювача.

Ще одним джерелом методичної похибки УІМ є дисперсія швидкості звуку, внаслідок якої не всі частотні компоненти сигналу одночасно досягають приймача.

Її виникнення зумовлене неоднорідністю фізичних властивостей середовища, присутністю включень і впливом границь тіла, в якому поширюється хвиля [3]. Дисперсія швидкості звуку

спостерігається також в капілярних трубках [3]. Це явище призводить до спотворення форми будь-якого немонохроматичного сигналу в багатьох середовищах, наприклад, у деревині.

УІМ не враховує залежності швидкості звуку від частоти і визначає швидкість звуку, яка відповідає найменшому часу проходження невизначеною частиною спектральних складових звуку крізь зразок. Час проходження у такому тлумаченні визначається тими компонентами сигналу збудження, котрі поширюються швидше, і не обов'язково з частотою заповнення радіоімпульсу, і не завжди найбільш енергетично значущими. Отримані результати не є швидкістю поширення коливань на резонансній частоті випромінювача та приймача (тобто фазовою швидкістю), бо час проходження визначається за частотонезалежним амплітудним критерієм на фронті сигналу.

Якщо моментом приходу акустичного сигналу вважати перевищення певного фіксованого рівня, то похибка виміру часу визначатиметься переважно кінцевою крутизною фронтів радіоімпульсу і рівнем шуму в сигналі приймача. Ця похибка оцінюється величиною порядку 1/4 періоду заповнення радіоімпульсу [6].

Підхід до вирішення проблеми

Наведені дані свідчать, що результати вимірювання швидкості поширення звуку за пороговим рівнем залежать від багатьох параметрів, не пов'язаних з якістю матеріалу. Це і резонансна частота п'єзокераміки, і величина порогового рівня, і величина шуму на виході приймача. Результати вимірювання швидкості поширення в одному і тому самому зразку, отримані різними приладами і навіть одним приладом з різними комплектами п'єзокерамічних перетворювачів, є різними. Тому порівнювати швидкості поширення у різних зразках краще за результатами, отриманими на одному приладі, хоча і в такому випадку можлива автоматична зміна порогового рівня, а відтак, і умов вимірювання.

Поширення звуку є процесом перенесення енергії акустичних коливань від випромінювача крізь матеріал зразка до приймача, причому не уся енергія коливання одночасно досягає перерізу приймача. Потужність прийнятого імпульсу є функцією часу, яка має максимум. Саме за положенням цього максимуму пропонується визначати час затримки сигналу у зразку.

Методологічно такий підхід дає змогу визначати час приходу імпульсу за максимальною потужністю сигналу, що пройшов зразок, на відміну від УІМ, в якому застосовується критерій перевищення вибраного рівня сумою корисного сигналу і шуму. Якщо у пропонованому способі час поширення визначається у момент максимального значення співвідношення сигнал/шум, то в УІМ виявлення моменту досягнення заданого порогового рівня пов'язане зі зниженням значення цього співвідношення до одиниці (за критерієм перевернення сигналом рівня шумів) і виявляється залежним від значення шуму так само, як і від значення корисного сигналу. Мабуть, логічніше фіксувати момент приходу імпульсу, коли, наприклад, 50 % його потужності проходить переріз приймача, ніж коли перші гармоніки сигналу, що несуть невизначену потужність, стали помітними на фоні шуму.

Застосування запропонованого підходу звільняє метод від недоліків, пов'язаних з вибором порогового рівня, збільшує завадостійкість методу та забезпечує адаптацію вимірювань до умов поширення коливань у зразку матеріалу.

Теоретичне обґрунтування запропонованого способу

Характеристикою, що одночасно вказує на схожість двох сигналів та на їх розташування в часі, є кореляційна функція [8]. Пропонується затримку сигналу визначати за критерієм проходження крізь переріз приймача максимальної потужності коливань випромінювача.

Значення такої затримки відповідає положенню максимуму взаємної кореляційної функції коливань у точках збудження та приймання. Наявність дисперсії швидкості звуку в матеріалі знижує рівень максимуму взаємної кореляційної функції, але не змінює положення максимуму.

Аргументом взаємної кореляційної функції $r_{uv}(\tau)$ є час затримки одного сигналу відносно іншого, а її значення знаходиться як інтеграл від скалярного добутку двох функцій часу [8]:

$$r_{uv}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)v(t-\tau)dt, \quad (5)$$

де $u(t)$ та $v(t)$ – функції коливань в точках збудження та приймання; t – час; τ – затримка.

Позначимо коливання в точках збудження та приймання з відповідними шумовими складовими:

$$u(t) = s1(t)+q1(t), \quad v(t) = s2(t)+q2(t). \quad (6)$$

Тоді взаємну кореляційну функцію можна подати сумою чотирьох складників [8]:

$$r_{uv}(\tau) = r_{s1s2}(\tau) + r_{s1q2}(\tau) + r_{q1s2}(\tau) + r_{q1q2}(\tau), \quad (7)$$

де $u(t)$, $v(t)$ – функції сумарних сигналів у зразку в перерізі збудження та приймання; $s1(t)$, $s2(t)$ – корисні сигнали в перерізі збудження та приймання; $q1(t)$, $q2(t)$ – шуми в перерізі збудження та приймання; $r_{s1s2}(\tau)$ – взаємна кореляційна функція корисних сигналів; $r_{s1q2}(\tau)$ – взаємна кореляційна функція вхідного сигналу та вихідного шуму; $r_{q1s2}(\tau)$ – взаємна кореляційна функція вихідного сигналу та вхідного шуму; $r_{q1q2}(\tau)$ – взаємна кореляційна функція вхідного та вихідного шуму.

В ультразвуковому приладі УК-14, як і в інших подібних приладах, прийнято технічні заходи для розподілу вхідних та вихідних сигналів, тому останні три складові правої частини (7) наближаються до нуля. За нульових середніх значень шумів та їх статистичної незалежності від сигналів існує рівність:

$$r_{uv}(\tau) = r_{s1s2}(\tau). \quad (8)$$

Вирази (6)–(8) доводять нечутливість запропонованого критерію приходу імпульсу прозвучування до шумів у каналі генерування, поширення та приймання акустичного сигналу.

Точність визначення часу затримки за положенням максимуму взаємної кореляційної функції не залежить від точності виділення моменту початку прозвучування зразка або його кінця. Врахування значення сигналів, на відміну від УІМ, здійснюється інтегруванням на певному проміжку часу, що збільшує відношення енергії корисного сигналу до енергії шуму [1] і дає змогу точніше провести вимірювання.

Зміни спектрального складу сигналу під час проходження крізь зразок, як і дисперсія швидкості звуку, змінюють величину значення максимуму взаємної кореляційної функції і впливають на положення цього максимуму, але не порушують відповідності положення у часі цього максимуму і максимального потоку енергії випромінювача у перерізі приймача – тобто на результат вимірювання часу проходження найбільшої потужності коливань. Неузгодженість частотних характеристик випромінювача і приймача також не впливає на результати вимірювання затримки і відбивається тільки на величині максимального значення взаємної кореляційної функції [1]:

$$|r_{uv}(\tau)|_{max} = \sqrt{\frac{\Delta\omega}{\omega_2 - \omega_1}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_c^2}} \right)^{-1}, \quad (9)$$

де $|r_{uv}(\tau)|_{max}$ – максимальне значення взаємної кореляційної функції; $\Delta\omega$ – частотна смуга сигналу, що пройшов крізь зразок і приймач; ω_2 – верхня частота сигналу, що поданий на зразок; ω_1 – нижня частота сигналу, що поданий на зразок; σ_n – середнє квадратичне значення перешкоди; σ_c – середнє квадратичне значення сигналу на приймальній стороні.

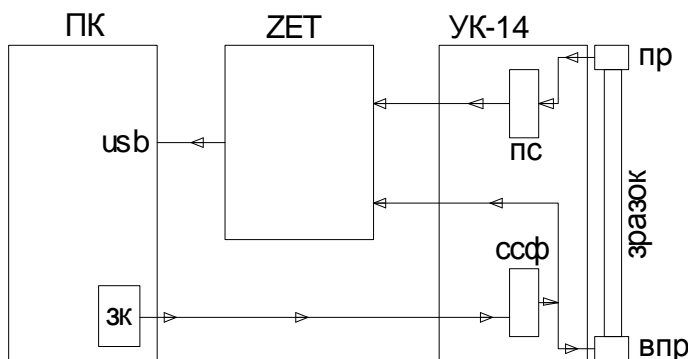


Рис. 2. Структура вимірювальної системи

На описаний кореляційний спосіб вимірювання швидкості звуку в матеріалах було отримано патент [9].

Дослідження

Програма розрахунку значень взаємної кореляційної функції нескладна, за рахунок рекурсивних операцій доволі компактна і може бути реалізована як у мікропроцесорі, так і в персональному комп'ютері. У сучасних ультразвукових приладах дефектоскопії вже широко використовуються мікропроцесори, які дають змогу здійснювати складнішу обробку сигналів. Переважно їх програми забезпечують адаптацію порогового рівня до рівня шумів та зручності виведення на індикацію результатів дослідження. Для визначення ефективності зміни програми обробки прийнятого сигналу було проведено моделювання роботи вимірювача швидкості звуку на базі простої вимірювальної системи.

Структуру такої системи можна отримати, об'єднавши вузли ультразвукового приладу УК-14 [4], цифрового осцилографа ZETScore [7] та персонального комп'ютера. Така сукупність вузлів об'єднана загальним алгоритмом функціонування з метою отримання даних про величини, що характеризують стан об'єкта дослідження. В ультразвуковому приладі УК-14 відсутня мікропроцесорна обробка, але доступні сигнали перетворювачів, необхідні для проведення пропонованої обробки.

Структуру вимірювальної системи зображено на рис. 2. Система функціонує так. Зі звукової карти зк персонального комп'ютера ПК на вхід системи синхронізації та формування імпульсу збудження *ссф* ультразвукового приладу УК-14 подається імпульс синхронізації. Сформований імпульс використовується для збудження коливачів у пристрої випромінювання *впр* та подається на перший вхід цифрового осцилографа ZET. Сигнал приймального перетворювача *пр*, підсилений у відповідному модулі *пс*, потрапляє на другий вхід цифрового осцилографа ZET.

Програмні засоби осцилографа дозволяють виконати синхронізацію, дискретизацію і квантування аналогових сигналів УК-14, а також передати їх через *usb* порт у комп'ютер ПК. Нульові середні значення шумів забезпечуються використанням осцилографа ZET в режимі «закритого входу» (змінної складової). У наведеній структурі вузли УК-14 використовуються для збудження акустичних коливачів у зразку, їх приймання, перетворення на електричний сигнал та підсилення останнього. ПК у цій системі керує запуском вимірювання, забезпечує інтерфейс і завдання режимів роботи цифрового осцилографа, виконує обчислювальні операції розрахунку взаємної кореляційної функції вхідного та вихідного сигналу прозвучування, автоматизує пошук максимального значення взаємної кореляційної функції та визначає затримку сигналу. Монітор ПК використовується не тільки для індикації затримки сигналу, але і для контролю сигналів на вході та виході УК-14, а також форми взаємної кореляційної функції, що допомагає уникнути грубих помилок.

Робота вузлів ультразвукового приладу УК-14 вже випробувана протягом десятків років, і технічні характеристики їх добре відомі. Цифровий осцилограф ZET 302 є сучасним мікропроцесорним вимірювальним приладом з регламентованими характеристиками. Єдиною ланкою, не випробуваною на практиці, є алгоритм визначення затримки поширення акустичних коливачів у зразку за кореляційною функцією з врахуванням змін форми сигналів.

Цей алгоритм однаково може бути реалізованим у програмі мікропроцесора або ПК. Усереднення перешкод під час розрахунку кореляційної функції зменшує інтенсивність шумів залежно від обраних меж інтегрування. Але збільшувати час інтегрування понад значущі величини автокореляційної функції сигналу збудження недоцільно. Здійснення мікропроцесорного варіанта потребує визначення ефективних частот дискретизації, достатньої кількості розрядів процесора та операндів, необхідного обсягу пам'яті і достатньої довжини взаємної кореляційної функції та інших параметрів. Отримати відповіді на ці питання і було основною задачею моделювання роботи вимірювальної системи.

Для моделювання системи було прийнято такі значення параметрів:

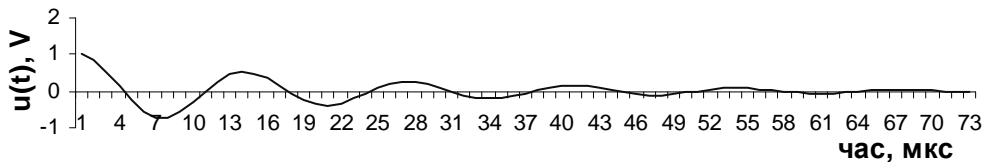
1. Добротність випромінювача і приймача сигналу $Q=4$ на частоті 100 кГц; таке мале значення добротності було обрано з метою розширення смуги пропускання для більшого впливу шумів каналу на вихідний сигнал приймача;

2. Затримка поширення сигналу у зразку $\tau = 14$ мкс; час було обрано достатньо великим, щоб помітити похибку його визначення; за такий час звукова хвиля проходить в повітрі 4,6 мм, у воді – 21мм, у сталі – 84 мм;

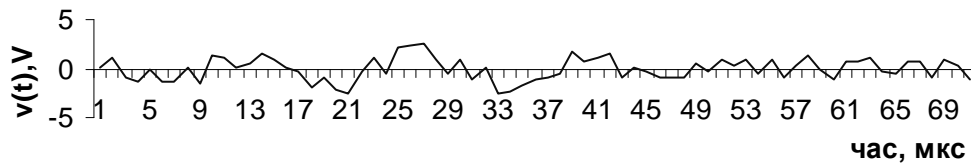
3. Форма сигналу випромінювача відповідає його імпульсній перехідній характеристиці і зображена на рис. 3, а; вхідний перетворювач має таку саму імпульсну перехідну характеристику;

4. Розраховується значення взаємної кореляційної функції на проміжку 70 мкс; обмеження об'єму обчислень впливає з бажаної швидкодії приладу з малопотужним мікропроцесором.

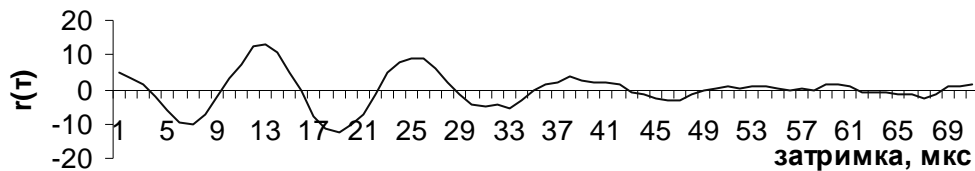
а) форма сигналу випромінювання



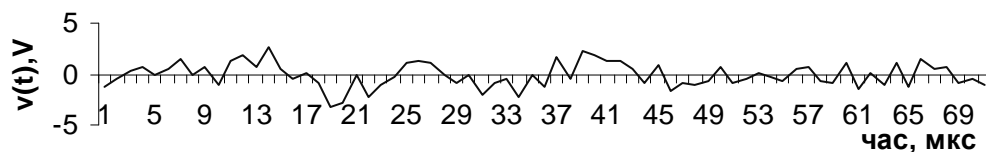
б) прийнятий сигнал+шум 1



в) взаємна кор. функція 1



г) сигнал+шум 2



д) взаємна кор. функція 2

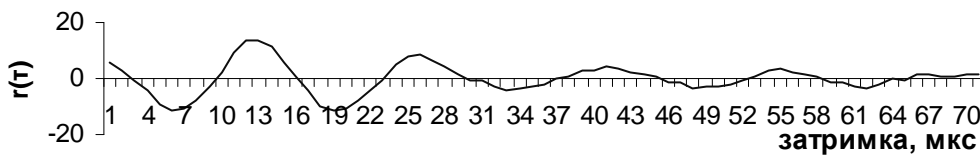


Рис. 3. Результати моделювання сигналів системи вимірювання затримки та швидкості звуку в матеріалах кореляційним способом

Основні результати

Результати досліджень показали, що визначення часу затримки сигналу у зразку відповідно до пропонованого способу відрізняється високою завадостійкістю. Наприклад, на рис. 3, б та г показано фрагменти осцилограм, на яких амплітуда постійно діючого „білого” шуму дорівнює амплітуді одиничного імпульсу збудження. На наведених осцилограмах корисний сигнал майже „потонує” у шумі. УІМ не може стійко працювати за такого відношення сигнал/шум. Але, як видно на рис. 3, в та д, розраховані значення взаємної кореляційної функції мають чіткий максимум на значенні затримки 14 мкс.

Похибка визначення затримки сигналів запропонованим способом не перевершувала $\pm 0,7\%$, що для деревини, прозвученої здовж волокон, в абсолютному вираженні становить ± 35 м/с. Такої похибки було досягнуто УІМ за значенням шуму на два порядки меншим [10, 11].

Отримані результати практично не змінювались від зменшення розрядності операндів до 8 двійкових розрядів. Для отримання практично значущих результатів – таких, які показано на рис. 3, достатньо виконати менше 5000 операцій множення і таку ж кількість додавань. Як показують попередні підрахунки, потрібний об’єм розрахунків може виконати такий недорогий мікроконтролер, як Microchip PIC16F76 або PIC16F77 за час порядку однієї секунди, мікроконтролери PIC16F876 або PIC16F877, які мають у своєму складі відповідно 5- і 8-канальний 10-розрядний АЦП, можуть бути покладені в основу економного переносного приладу визначення швидкості звуку кореляційним способом для контролю якості матеріалів.

Висновки

- Проаналізовано недоліки УІМ і показано, що методичні похибки цього методу полягають у використанні різних критеріїв визначення часу затримки поширення коливань у зразку.
- Запропоновано енергетичний критерій та спосіб вимірювання затримки поширення акустичних коливань.
- Теоретично обґрунтовано завадостійкість запропонованого способу.
- Розроблено структурну схему реалізації запропонованого способу вимірювання часу затримки, що використовує вузли відомих приладів та ПК.
- Розроблено програму статистичного моделювання визначення часу затримки поширення акустичних коливань з використанням взаємної кореляційної функції і доведена висока завадостійкість запропонованого способу.

1. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы: в 2-х частях: Пер. с англ. / У.М. Сиберт. – М.: Мир, 1988. 2. Новиков А.К. Статистические измерения в судовой акустике / А.К. Новиков. – Л.: Судостроение, 1985. 3. Голямина И.П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия/ И.П. Голямина. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с. 4. ЩЮ2.777.006 РЭ. Прибор ультразвуковой УК-14: Руководство по эксплуатации. 5. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожжовец, В.О. Яцук. – Львів: Бескид Біт, 2003. 6. Шмелёв О.Я. Относительное измерение скорости и затухания ультразвука в сильнопоглощающих жидкостях // “Измерительная техника”, 1995. – №1. – С.66–67. 7. Цифровой осцилограф ZET 302: Паспорт-инструкция по эксплуатации, «Электронные технологии и метрологические системы. 8. Баскаков С.И, Радиотехнические цепи и сигналы, 2-е издание / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1988. 9. Патент України № 37774 , Кореляційний спосіб вимірювання швидкості звуку в матеріалах / Я. І. Соколовський, О. Л. Сторожук, В. М. Борисов, Бюллетень №23, 10.12.2008. 10. Сергиенко Ю. К. Исследование ультразвукового метода обнаружения гнили в круглых лесоматериалах / Ю. К. Сергиенко. – М.: Дисс. ... канд. техн. наук, 1968. – 179 с. 11. Никишов В.Д. Исследование механических свойств древесины неразрушающими методами / В.Д. Никишов. – М.: Дисс. ... кан. техн. наук, 1966. – 192 с. 12. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е.К. Ашкенази. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 224 с.