



ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ ЯК СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ТА УТОМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

С. М. МАСЬВСЬКИЙ

Матеріал статті направлений на вирішення проблеми оцінки механічних напружень і степені втоми матеріалів шляхом високоточного з похибкою не гірше 0,01 % вимірювання фазової швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу. Описано метод визначення часового запізнення ультразвукового сигналу та довжини шляху його розповсюдження шляхом вимірювання кумулятивних фазових зсувів ультразвукових сигналів, що розповсюджуються за двома близько розташованими траєкторіями.

This article is direct to evaluation of mechanical stress and fatigue of materials by ultrasonic phase velocity precise (0,01 %) measurement. Determination of ultrasonic time delay and length propagation by measurement of cumulative phase sheeft of two ultrasonic near propagated signals is described.

Вимірювання фазової швидкості (далі просто швидкості) УЗ коливань у різноманітних середовищах від газів, рідин до твердих тіл знаходить широке застосування у техніці та наукових дослідженнях. Особливо велика перспектива використання методу вимірювання швидкості УЗ коливань лежить у плані дослідження стану твердих матеріалів і перш за все сталей, вироби з яких використовуються у силових конструкціях. Вимірюючи УЗ швидкість, можемо вирішити одну з найбільш актуальних проблем сучасного НК: визначати ступінь механічних напружень матеріалу конструкцій та оцінювати запас їхньої міцності. Але при цьому вимоги до точності вимірювання швидкості різко зростають. Як показує світовий досвід [1–4], точність вимірювання швидкості розповсюдження УЗ коливань повинна бути не меншою за 10^{-2} %.

Швидкість розповсюдження коливань є результат ділення довжини шляху, пройденого коливанням, на часову затримку коливань на цьому шляху. В численних, присвячених даній проблемі, роботах увага приділяється лише питанню точності вимірювання часової затримки. Вважається, що довжина шляху розповсюдження коливань має бути попередньо виміряна, наприклад, засобами лінійних вимірювань. Проте подібні вимірювання можна виконати лише в лабораторії для зразків матеріалу і практично неможливо це зробити на реальних конструкціях, що знаходяться у стані експлуатації.

В даній роботі питання прецизійного вимірювання швидкості розповсюдження УЗ коливань розглядається комплексно від вимірювання часових затримок коливань до визначення довжини шляху розповсюдження ультразвуку перш за все для випадків, коли неможливо використати мето-

ди та засоби лінійних вимірювань. При цьому в основі пропонованого автором методу вимірювання шляху, пройденого УЗ коливаннями, теж використовується прецизійно визначена затримка цих коливань.

Прецизійне вимірювання затримки УЗ коливань на основі когерентних перетворень сигналів. Розглянемо, яким чином забезпечити вимірювання часової затримки УЗ коливань з зазначеною вище точністю. Зрозуміло, що традиційний метод вимірювання часової затримки збудженого п'єзоперетворювачем швидкозатухаючого радіоімпульсного УЗ коливання шляхом кодування імпульсу, обмеженого моментом збудження радіоімпульсу та моментом його приходу до п'єзоелектричного чи іншого перетворювача як приймача коливань, високої точності не забезпечить. Поріг нечутливості компаратора напруги (це основний засіб визначення моменту появи напруги на виході електричного тракту приймача коливань) та вплив адитивних завод обмежують точність подібного методу вимірювання затримки похибкою, що сягає 0,1%.

Найбільшу потенційну точність вимірювання часової затримки забезпечує фазовий метод завдяки пропорційності фазового зсуву θ гармонійних коливань з коловою частотою ω часовому зсуву τ :

$$\tau = \frac{1}{\omega} \theta. \quad (1)$$

З метою підвищення точності вибирають частоту коливань якомога більшою. Але в такому разі навіть для невеликих порівняно значень шляху розповсюдження УЗ фазовий зсув θ стає кумулятивним фазовим зсувом ($\theta = N2\pi + \varphi_{\text{рад}}$) і, враховуючи радіоімпульсний характер коливань, не-

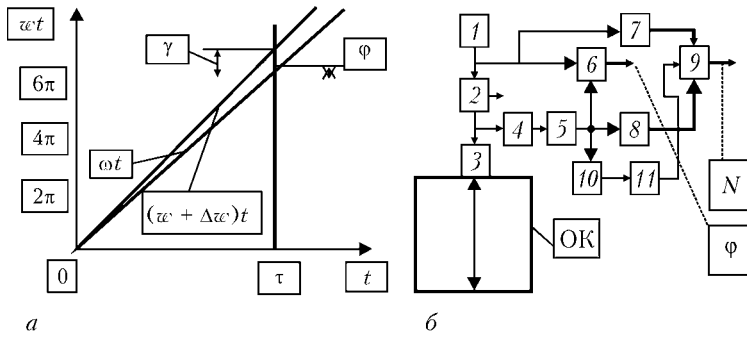


Рис. 1. Опосередкований метод вимірювання затримок УЗ сигналів шляхом визначення кумулятивного фазового зсуву: 1 — генератор (частотний синтезатор); 2 — ключ; 3 — п'єзоперетворювач; 4 — двохсторонній обмежувач рівня сигналу; 5 — підсилювач; 6 — цифровий фазометр; 7, 8 — тригерні лічильники; 9 — формувач різницевого коду; 10 — амплітудний детектор; 11 — компаратор

обхідно не тільки вимірювати фазовий зсув φ , де $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, але й визначити ціле значення фазових циклів 2π — число N .

Ультразвуковий радіоімпульсний сигнал має бути достатньої часової довжини для можливості виконання фазових вимірювань такого сигналу відносно нульової фази опорного колювання. Тому кількість періодів несучого колювання радіоімпульсу з урахуванням перехідних процесів на початку радіоімпульсу бажано мати не менше за 15...20 і для того, щоб збуджуване радіоімпульсне УЗ колювання мало б теж нульову початкову фазу, його формуємо з сигналу опорного генератору, пропускаючи цей сигнал через відкритий на час існування радіоімпульсу електронний ключ, який відкривається у момент проходження сигналом нульового значення напруги генератору.

Для зручності подальших пояснень розглянемо, як приклад, визначення фазової затримки УЗ сигналу при його проходженні товщини сталюого зразка у луноімпульсному режимі (рис. 1, а).

При товщині сталюого зразка h для нормально введеного УЗ сигналу частоти ω луносигнал, відбитий від дна зразка, затримується в часі на величину τ . Якщо $\tau \gg T$, де T — період сигналу, то фазовий зсув вихідного сигналу чотирьохполосника можемо представити як кумулятивний зсув $\theta = N2\pi + \varphi + \pi$ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Додатковий набіг фази π виникає при відбитті від нижнього краю зразка, який граничить з повітрям.

З метою використання часової затримки в матеріалі для визначення швидкості ультразвуку додатковий скачок фази за рахунок відбиття від краю зразка маємо відкинути. Тому далі використовуємо значення θ як $\theta_0 = N2\pi + \varphi$.

Часове запізнення УЗ сигналу можемо визначити, знаючи частоту цього сигналу і фазовий зсув θ :

$$\tau = \frac{\theta_0}{\omega} = \frac{N2\pi + \varphi}{\omega} \quad (2)$$

Враховуючи те, що фазовий зсув φ колювання радіоімпульсного сигналу можемо вимірювати за допомогою фазометрів, розглянемо шляхи визначення цілого числа фазових циклів 2π у значенні кумулятивного фазового зсуву. Можливі два способи виконання такого визначення [5].

Розглянемо можливість визначення числа цілих фазових циклів у значенні кумулятивного фазового зсуву шляхом вимірювань фазових зсувів вихідних сигналів на двох близьких за частотою сигналах. Частота одного з цих сигналів ω та іншого $\omega + \Omega$, де $\Omega \ll \omega$, вибираються, виходячи з умови збереження для обох частот незмінним значення цілого числа фазових циклів кумулятивних фазових зсувів.

Значення частот ω та $\omega + \Omega$ у разі використання частотного синтезатору можуть підбиратися за значеннями фазових зсувів сигналів експериментально. Частоту ω вибираємо такою, щоб фазовий зсув луносигналу був приблизно $180...225^\circ$, а частоту $\omega + \Omega$ вибираємо з умови досягнення фазового зсуву $270...295^\circ$. Тоді після віднімання значення фазового скачку при відбитті колювань від нижнього краю зразка матимемо фазові набіги за рахунок затримок у матеріалі зразка $0 \leq \varphi \leq 45^\circ$ для частоти ω і $90 \leq \gamma \leq 115^\circ$ для частоти $\omega + \Omega$.

Враховуючи те, що отримані таким чином фазові зсуви сигналів на вибраних частотах знаходяться у межах значення фазового циклу 2π (360°), запишемо вирази для величини часової затримки сигналу на виході чотирьохполосника для обох настільки близьких за значеннями частот сигналів, щоб знехтувати дисперсією швидкості розповсюдження цих сигналів:

$$\tau = \frac{1}{\omega}(N2\pi + \varphi_{\text{рад}}) = \frac{1}{360^\circ f}(N360^\circ + \varphi^\circ), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{\omega + \Omega}(N2\pi + \gamma_{\text{рад}}) = \frac{1}{360^\circ f}(N360^\circ + \gamma^\circ). \quad (4)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь, знаходимо значення N як позитивне ціле число наступного виразу:



$$N = \left| \frac{\gamma_{\text{рад}} \omega - \varphi_{\text{рад}}(\omega + \Omega)}{2\pi\Omega} \right|^+ = \left| \frac{\gamma^{\circ} f - \varphi^{\circ}(f + F)}{360^{\circ} F} \right|^+ \quad (5)$$

Підставляючи значення (5) у вираз (3) або (4), визначаємо величину часової затримки сигналу:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{\omega} \left| \frac{\gamma_{\text{рад}} \omega - \varphi_{\text{рад}}(\omega + \Omega)}{2\pi\Omega} \right|^+ 2\pi + \varphi_{\text{рад}} = \\ &= \frac{1}{360^{\circ} f} \left\{ \left| \frac{\gamma^{\circ} f - \varphi^{\circ}(f + F)}{360^{\circ} F} \right|^+ 360^{\circ} + \varphi^{\circ} \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

Враховуючи високу стабільність частот сигналів на виході частотного синтезатору ($\delta_f \leq 10^{-4}$), визначимо допустиму похибку вимірювання фазових зсувів φ та γ на вибраних частотах. Основні вимоги до точності вимірювання фазових зсувів ставить необхідність безпомилкового визначення значення N .

Зрозуміло, що вимоги до точності тим більші, чим більше значення N . Так, для $N \leq 20$ допустиме значення похибки вимірювання фазових зсувів становить $\pm 0,5^{\circ}$, для $N \leq 40$ похибка не повинна перевищувати $\pm 0,2^{\circ}$. З подальшим зростанням числа N вимоги до точності вимірювання фазових зсувів стають нездійсненними.

Розглянемо другий метод визначення кумулятивного фазового зсуву, який схематично представлено на рис. 1, б. Сигнал генератора і підсилений луносигнал посилаються кожний на свій тригерний лічильник 7, 8 числа періодів коливання. Число тригерів кожного лічильника вибираємо з умови $(2^{k+1} - 1) > N$, де N — число цілих значень фазових циклів 2π кумулятивного фазового зсуву луносигналу.

Часова затримка вихідного луносигналу приводить до затримки заповнення лічильника 8 порівняно з аналогічним заповненням лічильником 7. Різниця поточних кодів лічильників дорівнює кількості повних N періодів сигналів, які відповідають цілому числу фазових циклів кумулятивного фазового зсуву луносигналу відповідно до фази сигналу генератора. Замість двох лічильників можна було б використати реверсивний лічильник, вирішивши за допомогою логічних схем уникнення помилки у підрахунку періодів сигналів обох вхідних каналів у разі співпадання у часі їхніх фронтів.

Використання описаного вище методу визначення цілого числа фазових циклів у значенні кумулятивного фазового зсуву набагато спрощує вимоги до точності вимірювання фазового зсуву. Наприклад, якщо кумулятивний фазовий зсув становить $\theta = 100 \cdot 360^{\circ} + 50^{\circ}$, то навіть при похибці вимірювання фазового зсуву $\pm 2,5^{\circ}$ відносна фазова похибка визначення кумулятивного фазового

зсуву і таким чином часової затримки УЗ сигналу не перевищить $\delta_{\tau} = 7 \cdot 10^{-3} \%$.

Вплив нестабільності частоти УЗ сигналу на визначення τ при виборі генератору, в якому стабілізація частоти коливання досягається за допомогою кварцового п'єзоперетворювача, має порядок $\delta_{\tau} \leq 10^{-2} \%$. Таким чином, сумарна похибка визначення часової затримки УЗ сигналу не перевищує 0,01 %.

Вимірювання фазового зсуву радіоімпульсних коливань. Вимірювання фазового зсуву коливань радіоімпульсу, довжина якого складає лише 3 мкс, є непростю задачею, проте нами розроблено і апробовано ряд методів таких вимірювань [5].

До найбільш широковживаного методу віднесемо метод фазового детектування, який реалізується за допомогою фазових детекторів, наприклад, на основі використання подвійних балансних модуляторів (мікросхема МС-601R фірми «Hirose Electronics»). Постійне значення напруги на виході фазового детектору при подачі на його входи вимірювального сигналу і напруги генератору як сигналу з опорною (нульовою) фазою, становить:

$$U_1 = kU_m \cos\varphi. \quad (7)$$

Тут U_m , φ — відповідно амплітуда і фазовий зсув вимірювального сигналу; k — коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від амплітуди сигналу опорної фази, параметрів нелінійності вольт-амперних характеристик діодів подвійного балансного модулятора.

Для того, щоб уникнути впливу амплітуди сигналу на результат визначення фазового зсуву, децю ускладнимо схему вимірювання за рахунок використання другого фазового детектора з підключенням на нього квадратурного за фазою сигналу опорної фази. Вихідна постійна напруга такого детектора становить:

$$U_2 = kU_m \sin\varphi. \quad (8)$$

Маючи обидва значення напруг (7) і (8), знаходимо значення фазового зсуву наступним чином:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_2}{U_1}\right). \quad (9)$$

Враховуючи неоднозначність тригонометричних функцій на інтервалі фазових зсувів $0 \leq \varphi \leq 360^{\circ}$ та залежність знаків напруг на виходах першого та другого фазових детекторів, визначимо правило однозначного визначення значення фазового зсуву:

якщо $U_1 > 0$ (7), а U_2 (8) може бути як $U_2 > 0$, так і $U_2 < 0$, фазовий зсув φ знаходиться у межах $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ і його значення однозначно визначається за допомогою виразу (9);



якщо $U_1 < 0$, а $U_2 > 0$, значення фазового зсуву визначається наступним чином:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_2}{U_1}\right) - \pi, \quad (10)$$

$$\pi/2 \leq \varphi \leq \pi;$$

якщо $U_1 > 0$, $U_2 > 0$, значення фазового зсуву знаходимо за виразом:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_2}{U_1}\right) + \pi, \quad (11)$$

$$\pi \leq \varphi \leq 3/2\pi.$$

Для радіоімпульсного вимірювального сигналу вихідні напруги фазових детекторів представляються відеоімпульсами з встановленими на певному інтервалі значеннями напруг відповідно U_1 та U_2 . Час встановлення напруг залежить від постійної часу фільтрів нижніх частот на виходах фазових детекторів (реально до 5...10 періодів вхідних сигналів).

Описаний вище метод завдяки операції перемноження сигналів у фазових детекторах назвемо кореляційним, адже вихідна напруга фазового детектора пропорційна значенню кореляційної функції вимірювального і опорного сигналів.

Точність описаного методу фазового вимірювання залежить в першу чергу від точності формування квадратурного за фазою сигналу зі збереженням незмінної амплітуди цього сигналу порівняно з сигналом опорної фази. Загальна похибка вимірювання фазового зсуву розглянутим методом у випадку корекції адитивної похибки шляхом підключення до входів вимірювача сигналів з нульовим фазовим зсувом (підключення на обидва входи одного й того ж сигналу) може сягати десятих градусів.

Розглянемо інший метод вимірювання фазових зсувів, який нами названий методом імпульсно-фазового детектування. Цей метод передбачає використання двох синхронних вибірок обох сигналів, зсунутих за часом на чверть періоду сигналів. Якщо представити сигнал з опорною фазою і вимірювальний сигнал гармонійними функціями

$$u_0(t) = U_{m0} \sin \omega t,$$

$$u_C(t) = U_{mC} \sin (\omega t + \varphi), \quad (12)$$

то значення вибірок сигналів в довільний момент t та $(t + T/4)$ відповідно становлять:

$$u_0(t_B) = U_{m0} \sin \omega t_B,$$

$$u_0\left(t_B + \frac{T}{4}\right) = U_{m0} \cos (\omega t_B); \quad (13)$$

$$u_C(t_B) = U_{mC} \sin (\omega t_B + \varphi);$$

$$u_C\left(t_B + \frac{T}{4}\right) = U_{mC} \cos (\omega t_B + \varphi). \quad (14)$$

Такі значення вибірок сигналів дають можливість в системі часу вибірок визначити фазу кожного з сигналів:

$$\psi_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{u_0(t_B)}{u_0(t_B + T/4)}\right), \quad \psi_C = \operatorname{arctg}\left(\frac{u_C(t_B)}{u_C(t_B + T/4)}\right). \quad (15)$$

Однозначне визначення значень фаз сигналів ψ_0 , ψ_C виконується за алгоритмами (9)–(11).

Різниця фаз φ становить:

$$\varphi = \psi_C - \psi_0. \quad (16)$$

Визначення шляху розповсюдження УЗ сигналу. Розглянемо можливість визначення лінійної довжини шляху проходження луносигналу при нормальному впровадженні ультразвуку у контрольоване середовище за рахунок фазового методу вимірювання часової затримки цього луносигналу. Розглянемо процес визначення товщини матеріалу плоскопаралельної пластини металу згідно рис. 2.

Випромінювач і приймач УЗ коливань мають поперечні розміри менші за 6λ (λ — довжина хвилі коливань у середовищі контролю), що розширює діаграму направленості як збудника (перетворювач 1), так і приймача (перетворювач 2). Це і забезпечує прийом радіоімпульсних повздовжніх коливань, відбитих від дна об'єкта контролю (ОК) не тільки перетворювачем 1, але й перетворювачем 2.

Запишемо вирази для швидкості розповсюдження коливань відповідно до обох напрямків їх прийому. При цьому враховуємо різні величини часових затримок: τ_1 — затримка прийому коливань перетворювачем 1, τ_2 — затримка коливань, відбитих від дна і прийнятих перетворювачем 2.

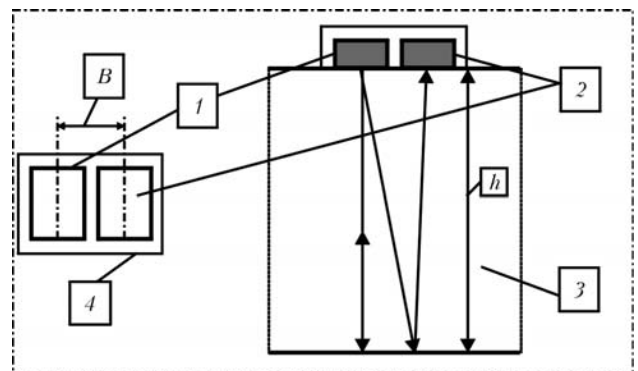


Рис. 2. Вимірювання товщини плоскопаралельного виробу зі сталі: 1 — прямокутний збудник-приймач коливань; 2 — прямокутний приймач коливань; 3 — матеріал ОК; 4 — сполучений акустичний перетворювач з розділеним випромінюванням та прийомом коливань



Отримана система рівнянь має вигляд:

$$C_1 = \frac{2h}{\tau_1}, \quad C_2 = \frac{2\sqrt{h^2 + (B/2)^2}}{\tau_2}. \quad (17)$$

Прирівняємо праві частини отриманих рівнянь (17) і визначимо значення h :

$$h = \frac{B}{2\sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}}. \quad (18)$$

Визначена товщина ОК дозволяє нам визначити швидкість розповсюдження УЗ коливань згідно (17):

$$C_1 = \frac{B}{\tau_1 \sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}}. \quad (19)$$

При визначенні значень часових затримок враховано додаткові набіги фазових зсувів при відбитті сигналів від дна ОК. Забезпечена висока (не менша 0,01 %) точність взаємного лінійного розміщення п'єзокерамічних пластин у конструкції роздільного акустичного перетворювача. За цих умов гарантована точність визначення ультразвукової швидкості $\delta_c = 10^{-2} \%$.

Висновки

Розглянутий метод визначення швидкості УЗ коливань може бути інтерпретований для визначення швидкості любых видів коливань у любых напрямках їх розповсюдження. Використовуючи фазовий метод визначення затримок коливань та довжини шляхів їх розповсюдження можемо досягти високої точності (не гірше 0,01 %) визначення УЗ швидкостей.

Використовуючи подібні вимірювачі ультразвукової швидкості, можемо контролювати векторні величини механічних напружень в конструкційних матеріалах та, що головне, контролювати степінь утоми матеріалів та визначати їхній залишковий ресурс міцності за величиною зміни швидкості розповсюдження УЗ коливань.

Известны методы оценки механических напряжений, а также степени деградации внутренней структуры конструкционных материалов (усталости материалов) путём контроля изменений фазовой скорости высокочастотных УЗ колебаний. Известно, что необходимая точность таких

измерений должна быть не менее 0,01 %. Это значит, что с такой точностью необходимо измерять как длину пути распространения УЗ колебаний в контролируемом материале, так и время задержки этих колебаний.

Рассмотрена возможность определения скорости распространения продольных УЗ колебаний с заданной точностью, измеряя временную задержку и длину пути распространения колебаний на основе измерения кумулятивных фазовых сдвигов этих колебаний. Подробно описаны методы фазовых измерений радиоимпульсных УЗ колебаний, требования к длительности этих колебаний, а также методы определения числа целых фазовых циклов в значениях кумулятивных фазовых сдвигов.

Один из методов предусматривает измерение значения кумулятивного фазового сдвига УЗ радиоимпульсных колебаний на двух настолько близких частотах, чтобы можно было пренебречь дисперсией скорости колебаний. Другой метод предусматривает определение числа полных фазовых циклов в значении кумулятивного фазового сдвига путем определения разницы текущих кодов двух счётчиков импульсов, на входы которых подаются непрерывный сигнал задающего генератора и выходной сигнал УЗ преобразователя соответственно. На время существования принятого преобразователем отраженного от тыльной стороны контролируемого элемента конструкции радиоимпульса колебаний разностный код счётчиков импульсов сохраняется неизменным.

Выполненный анализ погрешностей измерений подтвердил достижимость упомянутой точности определения скорости ультразвука в элементах стальных конструкций.

1. Allen D. R., Cooper W. H. B. A Fourier Transform Technique that measuring Phase Delay Between Ultrasonic Impulses with Sufficient Accuracy to Determine Residual Stresses in Metals // NDT International. — 1983. — 16, № 4.
2. Stamm H. An Overview of the Ultrasonic Detection of Creep Damage // The European J. of Non-Destructive Testing. — 1992. — 1, № 4.
3. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. — М.: Высш. шк., 1991. — С. 636–642.
4. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. Неразрушающий контроль. — Кн. 2. — М.: Высш. шк., 1991. — С. 247–264.
5. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці / М. Т. Бова, В. О. Гойжевський, С. М. Маєвський, В. В. Молебний. — Київ: Вища шк., 1972. — 262 с.