

УДК 621.179

## ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСУ В УЛЬТРАЗВУКОВІЙ БЕЗКОНТАКТНІЙ ТЕНЗОМЕТРІЇ

С. М. Лігоміна

Національний технічний університет України «КПІ», пр.Перемоги, 37, м.Київ, 03056,  
тел.(8-044)4549547, e-mail:psnk@ntu-kpi.kiev.ua

*Проанализировано использование ультразвукового метода для контроля остаточных поверхностных напряжений в металлах. При этом значительное внимание уделено измерению времени распространения ультразвуковых поверхностных волн Релея. Показано экспериментально, что импульсно-фазовый метод измерения времени распространения ультразвуковых поверхностных волн Релея имеет наименьшую погрешность.*

*The use of ultrasonic method is analysed for the control of remaining superficial tensions in metals. Thus considerable attention is spared measuring of time of distribution of ultrasonic superficial waves of Reley. It is shown experimentally, that the impulsive-phase method of measuring of time of distribution of ultrasonic superficial waves of Reley has the least error.*

Залишкові поверхневі напруження (ЗПН), які виникають при виготовленні металічних деталей, конструкцій та їх експлуатації приводять до значного зниження строку використання останніх. Тому проблема оцінки ЗПН в об'єктах контролю (ОК) є актуальною.

Важливість визначення ЗПН саме пов'язана з тим, що розвиток більшості втомних тріщин починається з поверхні. Тому наявність ЗПН є критичною при появі тріщин та в процесі їх подальшого росту. Існує також вплив ЗПН на ріст підповерхневих тріщин.

Серед відомих методів контролю ЗПН одним з найбільш перспективних є ультразвуковий метод, в якому для оцінки залишкових напружень використовують зміну під дією напружень часу розповсюдження ультразвукових поверхневих хвиль Релея між випромінювачем та приймачем, які розташовані на постійній і відомій відстані між собою [1].

Оскільки під дією напружень вказаний час змінюється в незначних межах, тому потрібно значно зменшити похибку вимірювання цього часу [1]. Традиційно для вимірювань ЗПН використовують контактні п'єзоелектричні перетворювачі, які потребують наявності контактного шару між перетворювачем та ОК. При випадковій зміні товщини контактного шару за рахунок зміни рельєфу поверхні виникає випадкова зміна часу розповсюдження, що приводить до похибок у визначенні ЗПН.

Використання для ультразвукової тензометрії безконтактних електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП) вирішує дану проблему [2]. Однак недоліком ЕМАП є значно менший ніж у п'єзоперетворювачів коефіцієнт перетворення, який становить  $10^{-3}$ - $10^{-5}$ , що приводить до значного зменшення відношення сигнал-шум [3]. У цьому випадку розповсюджені прецизійні імпульсні методи вимірювань часу, які основані на порівнянні з пороговим рівнем і які не забезпечують потрібну точність вимірювань.

Збільшити відношення сигнал-шум можна за рахунок звуження частотного діапазону сигналу та роботи на резонансній частоті перетворювача, що приводить до збільшення тривалості імпульсу. Підвищити точність вимірювання часу розповсюдження ультразвукових поверхневих хвиль Релея при використанні вузькосмугових сигналів можливо за рахунок застосування імпульсно-фазових методів вимірювання часу. На відміну від імпульсних, імпульсно-фазові методи визначають саме фазовий час розповсюдження ультразвуку, який застосовується в розрахункових залежностях та застосування замість якого групового часу може привести до додаткових похибок [2]. Імпульсно-фазові методи пов'язані з визначенням фазового зсуву радіоімпульсних сигналів та неоднозначністю фазових вимірювань. Традиційно при проведенні фазових вимірювань

використовують аналогові сигнали, що обмежує точність вимірювання та приводить до додаткових похибок у визначенні часу.

Для вирішення даної проблеми пропонуються створити інформаційно-вимірювальні системи, які реалізують цифрові методи вимірювання повного фазового зсуву радіоімпульсного сигналу з використанням багатоскальних методів усунення неоднозначності фазових вимірювань, що дозволяє автоматизувати вимірювання та підвищити їх точність [4].

Для вирішення даного завдання необхідно вирішити наступні питання:

1) дослідити вплив на похибку вимірювання фазового зсуву дискретизації для різних відношень сигнал-шум;

2) виконати комп'ютерне моделювання системи з використанням різних цифрових методів вимірювання часу з урахуванням впливу частотної характеристики системи для різного відношення сигнал-шум;

3) з метою перевірки запропонованих рішень виконати експеримент для оцінки похибки вимірювання.

При використанні імпульсних сигналів вимірювання фазового зсуву потрібно виконувати за декілька періодів, що створює значні труднощі у забезпеченні високої точності вимірів та їх завадостійкості. При вимірюванні фазовий зсув може оцінюватися або по одиночному відліку (цифрові фазометри), або по деякій вибірці суміші сигналу та шуму (оптимальні методи вимірювання фазового зсуву, наприклад, дискретний ортогональний метод). Використання дискретного ортогонального методу має наступні переваги: малий час вимірювання, можливість вимірювання фази одиночних радіоімпульсів, можливість виконувати вимірювання при малих відношеннях сигнал-завада, нечутливість до змін у формі обвідної.

Для дискретного ортогонального методу вираз для обчислення фазового зсуву має наступний вигляд [2]:

$$\varphi = \arctg(U_c / U_s); \quad (1)$$

$$U_c = \sum_{n=0}^{K \cdot p - 1} U_n \cdot \cos(2\pi f n T); \quad (2)$$

$$U_s = \sum_{n=0}^{K \cdot p - 1} U_n \cdot \sin(2\pi f n T), \quad (3)$$

де  $K$  – кількість періодів,  $p$  – кількість вибірок на період,  $T$  – період дискретизації,  $U_n$  – значення  $n$ -ої – вибірки.

При урахуванні знаків синусної та косинусної складових можна розширити діапазон однозначного вимірювання фазового зсуву до  $(-\pi; \pi)$  [2].

Цифрова реалізація методу призводить до необхідності використання операцій квантування та дискретизації, що в свою чергу викликає похибки у визначенні фазового зсуву. Аналітичний розрахунок похибок з урахуванням сумарного впливу декількох факторів є досить складним завданням. Для вирішення даної проблеми було застосовано комп'ютерне моделювання, структурну схему якого представлено на рис 1.

Для урахування впливу даних факторів на похибку вимірювання було створено математичну модель ортогонального фазометра. Моделювання виконувалось наступним чином.

На вхід фазометру подають сигнал з певним фазовим зсувом та заданим відношенням сигнал-шум (шум, розподілений по нормальному закону). В залежності від кількості точок на період або відношення частоти дискретизації до тривалості сигналу, вимірювання фазового зсуву проводять з певною похибкою. За результатами вимірювань обчислюють середнє квадратичне відхилення (СКВ) похибки вимірювання та будують щільність ймовірності похибки вимірювання в залежності від фазового зсуву.

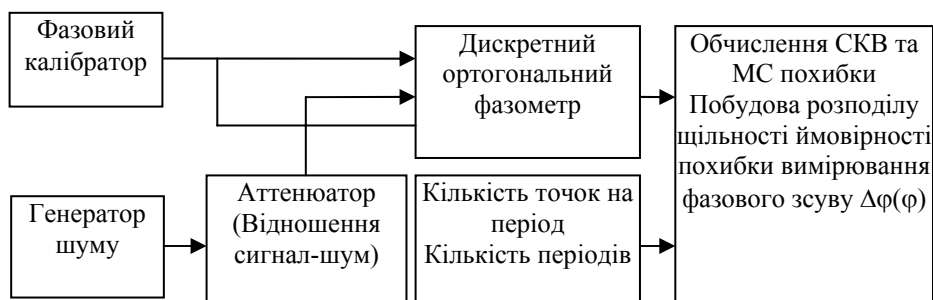
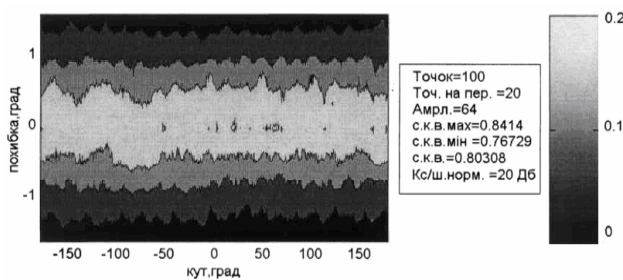


Рисунок 1 – Структурна схема комп'ютерного моделювання

В якості генератора шуму було використано випадкову функцію Matlab randn, яка генерує випадкові числа розподілені по нормальному закону з математичним сподіванням (МС), яке дорівнює нулю та середнім квадратичним відхиленням, рівним одиниці. Щоб отримати достовірні дані, моделювання виконувалось для 10000 реалізацій сигналу. Щільність ймовірності будувалась на основі гістограми з 19 стовпців.

На рис. 2 показані результати моделювання у вигляді ліній рівня щільності ймовірності, темні кольори відповідають меншим значенням ймовірності.



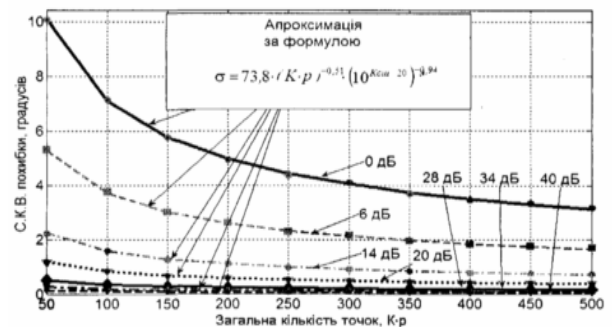
**Рисунок 2 – Результати моделювання вимірювання фазового зсуву з використанням 8-розрядного АЦП (в прямокутнику показано параметри моделювання)**

Результати моделювання показали, що функція щільності ймовірності є незміщеною у порівнянні з МС, яке дорівнює нулю. Далі подібні обчислення проводилися для різних відношень сигнал-шум та для різної кількості вибірок за період та кількості періодів:

$$\sigma = 73,8 \cdot (K \cdot p)^{-0,51} \cdot (10^{K_{сш}/20})^{-0,94}, \quad (4)$$

де  $K_{сш}$  – відношення сигнал-шум, дБ.

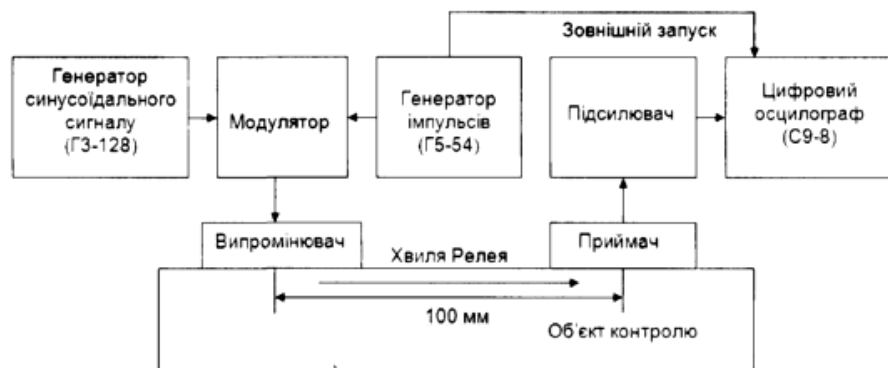
На рис. 3 показано апроксимацію результатів моделювання згідно (4).



**Рисунок 3- Апроксимація СКВ похибки вимірювання фазового зсуву згідно (4)**

Серед цифрових методів вимірювання часу розповсюдження з точки зору придатності їх застосування в ультразвуковій тензометрії було обрано сім методів[5]: метод накладання; метод енергетичних центрів ваги; кореляційний метод; кореляційний із сплайн-інтерполяцією; метод нахилу фазової кривої, метод нульового перетину та імпульсно-фазовий метод. Попередній огляд літературних джерел показав відсутність проведення досліджень вказаних методів з метою оцінки похибки вимірювання ними часу розповсюдження, які б були виконані при однакових умовах з урахуванням впливу на результат вимірювання відношення сигнал-шум.

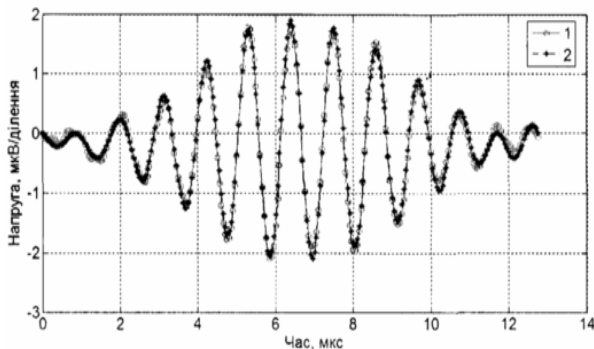
Для коректного моделювання потрібно було отримати коефіцієнт передачі системи перетворювач-приймач. Для цього було створено дослідний макет, схема якого представлена на рис.4.



**Рисунок 4 - Схема макету для проведення досліджень**

На вхід випромінювача подавався радіоімпульс з частотою 1 МГц та тривалістю 4 періоди. Сигнал з приймача підсилювався та поступав на вхід цифрового осцилографа, який оцифровував сигнал з частотою 20 МГц та записував його в пам'ять.

Для збільшення відношення сигнал-шум використовувалось осереднення сигналу (підсумовувалось 64 сигнали). Отриманий сигнал (рис. 5) було використано для створення математичної моделі системи випромінювач-приймач у вигляді цифрового фільтру з нескінченною імпульсною характеристикою.



**Рисунок 5 – Приклад прийнятого (1) та з модульованого (2) сигналів на екрані цифрового осцилографа**

Комплексна характеристика отриманого фільтру має наступний вигляд:

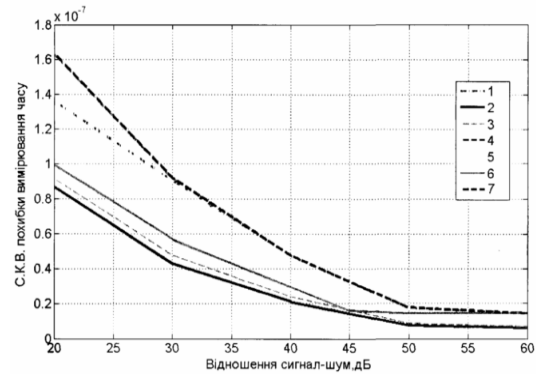
$$H(i\omega) = \frac{-0,05 + 0,2e^{-i\omega} - 0,34e^{-i\omega^2} + 0,3e^{-i\omega^3} - 0,13e^{-i\omega^4} + 0,02e^{-i\omega^5}}{1 - 4,83e^{-i\omega} + 9,48e^{-i\omega^2} - 9,45e^{-i\omega^3} + 4,8e^{-i\omega^4} - 1 \cdot e^{-i\omega^5}} \quad (5)$$

Створену модель цифрового сигналу було використано для моделювання похибки вимірювання часу цифровими методами в залежності від відношення сигнал-шум. Для цього в середовищі Matlab було створено математичні моделі цифрових методів вимірювання часу. Шум, розподілений по нормальному закону, додавався до моделі сигналу пропорційно до обраного відношення сигнал-шум. Використовувалось 256 точок сигналу. Потім проводилося вимірювання часу. Для кожного значення відношення сигнал-шум процедуру повторювали 1000 разів. На основі отриманих даних знаходилося СКВ похибки вимірювання часу для кожного з семи методів. Результати моделювання представлено на рис. 6.

Отримані результати моделювання дозволяють дати оцінку похибки визначення часу в залежності від відношення сигнал-шум для кожного з семи методів. Проведений аналіз

показав, що найменшу похибку вимірювань має імпульсно-фазовий метод вимірювання.

Для перевірки даного положення було проведено експеримент з застосуванням макету (рис. 4). Матеріал зразку – сталь. Швидкість розповсюдження хвилі Релея –  $3020 \pm 1$  м/с.



*1-метод накладання; 2 - імпульсно-фазовий метод; 3 - метод нахилу фазової кривої; 4-кореляційний метод; 5-кореляційний із сплайн-інтерполяцією; 6-метод центрів ваги; 7-метод нульового перетину*

**Рисунок 6 - СКВ похибки вимірювання часу для цифрових методів вимірювання часу розповсюдження**

Приймач та випромінювач було розташовано на фіксованій відстані: 100 мм між центрами перетворювачів. Попередньо оцінений час розповсюдження 33,1 мкс. В експерименті було десять вибірок сигналу. Всі вибірки розпочинались в один і той же час за рахунок синхронізації генератора та осцилографа. Далі дані з осцилографа заносились в комп'ютер. Для збільшення відношення сигнал-шум проводилось усереднення (64 рази). Перший отриманий сигнал вважався еталонним, тобто вимірювалась затримка між першим та другим сигналом, між першим та третім і т.д. Дані експерименту приведено в табл. 1.

Згідно з отриманими даними найменшу похибку має імпульсно-фазовий метод вимірювання часу, на другому місці метод нахилу фазової кривої.

Таким чином результати експерименту підтвердили, що найменшу похибку вимірювань часу розповсюдження ультразвукових поверхневих хвиль Релея має імпульсно-фазовий метод, що вказує на перспективність подальших досліджень у застосуванні даного методу в ультразвуковій безконтактній тензометрії.

Таблиця 1 – Значення затримок

| № Сигналу | Метод вимірювання |                       |                           |                  |                                          |                 |                   |
|-----------|-------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|------------------------------------------|-----------------|-------------------|
|           | Накладання, нс    | Імпульсно-фазовий, нс | Нахилу фазової кривої, нс | Кореляційний, нс | Кореляційний із сплайн-інтерполяцією, нс | Центри ваги, нс | Нуль перетину, нс |
| 1         | 0                 | 0                     | 0                         | 0                | 0                                        | 0               | 0                 |
| 2         | 39,7411           | 14,936                | 18,439                    | 15,465           | 16,0873                                  | 17,056          | 9,1500            |
| 3         | 26,1295           | 8,9019                | 14,988                    | 41,925           | 8,0009                                   | 7,5691          | 26,2310           |
| 4         | 44,0071           | 18,636                | 8,3486                    | 28,404           | 24,0025                                  | 13,542          | 12,4612           |
| 5         | 8,6478            | 9,3199                | 18,3                      | 18,521           | 18,1658                                  | 4,8358          | 23,0385           |
| 6         | 48,9873           | 8,373                 | 11,062                    | 35,137           | 10,2988                                  | 17,447          | 29,1253           |
| 7         | 13,5724           | 16,924                | 15,608                    | 27,329           | 18,6141                                  | 9,4593          | 29,7025           |
| 8         | 12,6165           | 10,503                | 9,4356                    | 22,244           | 6,6987                                   | 21,5            | 23,6659           |
| 9         | 43,7871           | 4,0529                | 6,7016                    | 34,728           | 10,9981                                  | 21,341          | 13,1598           |
| 10        | 36,8653           | 13,443                | 4,1724                    | 31,066           | 23,3345                                  | 14,839          | 14,9493           |
| МС        | 27,4354           | 10,509                | 10,7055                   | 25,4819          | 13,6201                                  | 12,7589         | 18,1483           |
| СКВ       | 17,5309           | 5,7357                | 6,1506                    | 12,0223          | 7,7226                                   | 7,1401          | 9,7267            |

### Література

1. Ерофеев В.И., Зазнобин В.А., Самохвалов Р.В. К определению механических напряжений в твердых телах акустическим методом // Акустический журнал. – Т.53, № 5. – С. 625 – 631.

2. Бобренко В.М., Куценко А.Н., Вангели М.С. Акустическая тензометрия (теория и практика). – Кишинев: Штиинца, 1991. – 204 с.

3. Сучков Г.М. Новые методы ультразвукового контроля ЭМА способом на

основе адаптации радиолокационных технологий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005, №3. – С.38 – 42.

4. Баженов В.Г., Лігоміна С.М. Цифровий вимірювач фазової швидкості ультразвуку // Методи і прилади контролю якості. – 2000, №6. – С.13 – 15.

5. Аналіз прецизійних методів вимірювання швидкості ультразвуку // Вісник НТУ У "КПІ". Серія Приладобудування. – 2004, вип.27. – С.65 – 71.