



БЕЗКОНТАКТНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЕФЕКТОСКОПА

С. М. МАЄВСЬКИЙ, д-р техн. наук, К. М. СЕРИЙ, канд. техн. наук (НТУУ «Київський політехнічний інститут»)

Запропоновано автоматизувати процес протоколювання результатів неруйнівного контролю (усунення суб'єктивності контролю) шляхом автоматичної просторової координатної реєстрації у комп'ютерній пам'яті результатів, отриманих при виконанні сканування поверхні об'єкта контролю акустичним, вихрострумовим чи магнітним вимірювальним перетворювачем відповідного дефектоскопа, яке виконується вручну дефектоскопістом. Розглянуто метод визначення просторових координат, власне вимірювального перетворювача з попереднім визначенням координат двох точкових збудників УЗ коливань (40 кГц) на його осі, шляхом вимірювання довжин шляхів розповсюдження цих коливань до трьох приймачів, розташованих на кінцях бази вимірювань.

It is proposed to automate the process of documenting NDT results (elimination of testing subjectivity) by automatic 3d coordinate recording in the computer memory of the results obtained during scanning of the tested object surface by acoustic, eddy current, or magnetic measuring converter of the respective flaw detector, which is done manually by flaw detection inspector. A method is considered to determine the 3d coordinates of the measuring converter proper with preliminary determination of the coordinates of two point sources of ultrasonic oscillations (40 Hz) on its axis, by measuring the lengths of propagation paths of these oscillations up to three receivers located at the end of measurement base.

Сьогодні у вік тотальної автоматизації найскладніших технологічних процесів все ще використовується неавтоматизований процес неруйнівного контролю (НК) елементів конструкцій за допомогою праці дефектоскопіста, який вручну сканує вимірювальним перетворювачем дефектоскопа поверхню об'єкта контролю (ОК), оцінює результат контролю та складає акт про виконаний контроль. На жаль така ситуація буде існувати ще довго, тому що замінити ручний контроль автоматичними системами контролю в багатьох галузях ще неможливо через складні поверхні ОК.

Не дивлячись на песимістичний висновок сьогодні потрібно і можливо вирішити проблему усунення суб'єктивності виконаного дефектоскопістом контролю шляхом організації автоматичного координатного запису процесу контролю. Для цього необхідно вирішити дві задачі: кодування з заданою швидкістю інформативного параметра вихідного сигналу дефектоскопу, як правило — амплітуди сигналу, та визначення з такою ж швидкістю цифрових значень координат сканування поверхні ОК вимірювальним перетворювачем дефектоскопа.

Перша з проблем вирішується досить просто за допомогою невеликого додаткового блоку з АЦП та мікроконтролером. Основна проблема інформатизації дефектоскопа полягає у відтворенні системи, яка б визначала своєю системою відліків координати положення вимірювального перетворювача у процесі сканування ним поверхні ОК.

Розробники дефектоскопічної апаратури відомих у світі фірм вирішують згадану вище проблему, розробляючи різноманітні механічні засоби,

які, маючи рухомі та поворотні частини шляхом вимірювання кутів повороту та довжини лінійних переміщень, дають можливість визначати полярні та прямокутні координати прикріплених до них вимірювальних перетворювачів у процесі ручного сканування. Нерухома платформа таких засобів кріпиться до поверхні ОК, як правило, пневматичним або магнітним способом [1, 2].

Точність визначення координат такими системами недостатня і залежить від розмірів зони контролю. Проте це навіть не головне. Головним є те, що подібні системи реально існують тільки для випадку контролю плоских об'єктів. До того ж ускладнюється робота дефектоскопіста, який вимушений рухати не тільки вимірювальним перетворювачем, постійно контролюючи його нормальне до поверхні ОК положення та контролювати відповідність інших технологічних вимог: наявність контактної рідини на поверхні ОК для акустичного контролю, відсутність додаткового зазору між вимірювальним перетворювачем та поверхнею ОК для вихрострумового контролю тощо.

Виходячи зі сказаного вище, зрозумілі вимоги до систем визначення координат, які б не мали згаданих недоліків. Така система повинна незалежно від дефектоскопіста дистанційно та автоматично реалізовувати процес визначення просторових координат положення вимірювального перетворювача під час виконання дефектоскопістом сканування цим перетворювачем навіть складної трьохмірної поверхні ОК.

Для вирішення даної задачі можемо скористатися відомими методами навігаційної техніки, трансформували ці методи до відносно невеликих (до 1 м) розмірів бази вимірювання з такими ж відстанями до вимірювального перетворювача.



З розглянутих в роботі [3] методів реально можемо використати два: метод, оснований на вимірюваннях відстаней до точок з встановленими координатами, у даному випадку — точок на кінцях бази вимірювання, та триангуляційний метод, який вимагає визначення кутових напрямків на власне вимірювальний перетворювач відносно лінії бази вимірювань.

Від традиційного методу радіонавігації, не дивлячись на привабливу перспективу вимірювання відстаней шляхом визначення часових затримок високочастотних електромагнітних коливань вимірюванням фазових зсувів, зразу відмовимось, тому що не зможемо отримати необхідної точності за рахунок реверберації та невизначеної швидкості розповсюдження коливань в умовах нестационарного впливу провідної поверхні ОК.

Для вимірювання порівняно невеликих відстаней є можливість використати УЗ низькочастотні коливання, наприклад 40 кГц, для генерування яких можемо використати стандартні перетворювачі типу АП-1 [4].

Нами розроблена схема вимірювань необхідних відстаней, розрахована на визначення трьохмірних координат власне вимірювального перетворювача дефектоскопа незалежно від його типу та методу неруйнівного контролю, що в ньому реалізований [5]. Згідно цієї схеми вимірювальний перетворювач дефектоскопа має бути конструктивно дороблений. Така доробка полягає у подовженні корпусу перетворювача вздовж його осі з метою розміщення двох точкових збудників УЗ коливань на фіксованій відстані ΔL між ними та на відстані крайнього з них до власне вимірювального перетворювача, рівній L_0 . Ці відстані можуть бути такими: $\Delta L = 50$ мм, $L_0 = 150$ мм. Точкові збудники розташовуються перпендикулярно до твірної подовженого корпусу та орієнтовані у напрямку приймачів УЗ коливань.

Принцип визначення координат окремих точок на осі вимірювального перетворювача (збудників УЗ коливань) представлений на рис. 1. Спочатку розглянемо послідовність дій, направлених на визначення координат точки A . Збуджене у цій точці УЗ коливання частотою 40 кГц прямолінійно розповсюджується широкою діаграмою направленості та приймається приймачами 1–3. При цьому часові затримки коливань відповідно дорівнюють: τ_{A1} , τ_{A2} та τ_{A3} , а пройдені коливаннями відстані дорівнюють: $l_{A1} = V\tau_{A1}$; $l_{A2} = V\tau_{A2}$; $l_{A3} = V\tau_{A3}$, де V — швидкість розповсюдження коливань у повітрі.

Для визначення координати точки A опустимо з цієї точки перпендикуляри P_{1A} , P_{2A} на прямі на кінцях бази вимірювань B , на яких на висоті H розміщені приймачі 1 і 2, а на висоті $2H$ розміщений приймач 3. Зрозуміло, що відстань до точок пересічення перпендикулярів з лініями

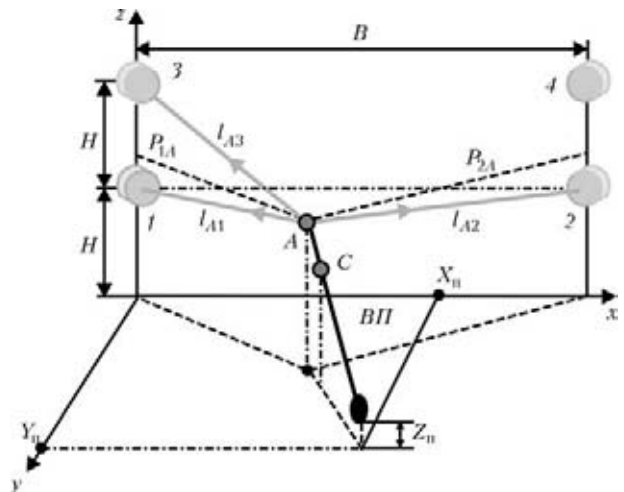


Рис. 1. Схема визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопа за координатами двох УЗ точкових збудників коливань: 1–3 — приймачі УЗ коливань; 4, А, С — точкові збудники УЗ коливань; ВП — вимірювальний перетворювач; B — база вимірювань; P_{1A} , P_{2A} — перпендикуляри від збудника УЗ коливань A до границі бази вимірювання; l_{A1} – l_{A3} , 3 — відстані від збудника УЗ коливань A до відповідних приймачів 1–3; X_n , Y_n , Z_n — координати вимірювального перетворювача

розміщення приймачів коливань від бази вимірювань є координата Z_A .

Довжини згаданих перпендикулярів з урахуванням відстаней l_{A1} , l_{A2} , l_{A3} становлять:

$$P_{1A}^2 = l_{A3}^2 - (2H - Z_A)^2, \quad (1)$$

$$P_{1A}^2 = l_{A1}^2 - (Z_A - H)^2, \quad (2)$$

$$P_{2A}^2 = l_{A2}^2 - (Z_A - H)^2. \quad (3)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (1) і (2), знаходимо значення координати Z_A :

$$Z_A = \frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + 3H^2}{2H}. \quad (4)$$

Підставимо (4) в (1) та (3), отримаємо значення перпендикулярів P_{1A} та P_{2A} :

$$P_{1A} = \sqrt{l_{A1}^2 - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2}{2H}\right)^2}, \quad (5)$$

$$P_{1A} = \sqrt{l_{A2}^2 - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2}{2H}\right)^2}. \quad (6)$$

Розглядаючи проекції P_{1A} , P_{2A} на площині Oxy , знайдемо значення ординати та абсциси збудника коливань, розміщеного у точці A . Для цього складемо таку систему рівнянь:

$$Y_A = P_{1A}^2 - X_A^2, \quad (7)$$

$$Y_A^2 = P_{2A}^2 - (B - X_A)^2.$$

Виходячи з рівнянь (7) з урахуванням виразів (5), (6), знаходимо абсцису і ординату точки A :



$$X_A = \frac{l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2}{2B}, \quad (8)$$

$$Y_A = \sqrt{\left[l_{A1}^2 - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2}{2H} \right)^2 \right] - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2}{2B} \right)^2}. \quad (9)$$

Аналогічно, вимірюючи довжини $l_{C1}-l_{C3}$, визначасмо координати точкового збудника УЗ коливальних С:

$$X_C = \frac{l_{C1}^2 - l_{C2}^2 + B^2}{2B}, \quad (10)$$

$$Y_C = \sqrt{\left[l_{C1}^2 - \left(\frac{l_{C1}^2 - l_{C3}^2 + H^2}{2H} \right)^2 \right] - \left(\frac{l_{C1}^2 - l_{C2}^2 + B^2}{2B} \right)^2}, \quad (11)$$

$$Z_C = \frac{l_{C1}^2 - l_{C3}^2 + 3H}{2H}. \quad (12)$$

Визначення координат збудників УЗ коливальних А і С виконуємо послідовно в часі і довжина циклу послідовно-періодичних збуджень коливальних цими збудниками може дорівнювати 0,05 с (0,025 с на виконання збудження коливальних і вимірювань їх часових затримок). При цьому допускаємо динамічну похибку, рівну 1 мм при швидкості сканування 20 мм/с.

Визначивши трьохмірні координати двох точок А і С на осі вимірювального перетворювача та враховуючи відстані між цими точками вздовж осі корпусу вимірювального перетворювача та

відстань до власне перетворювача, можемо визначити його координати як третьої точки на прямій:

$$X_{II} = \frac{L_0 X_C - (L_0 - \Delta L) X_A}{\Delta L} = \frac{L_0 [(l_{C1}^2 - l_{C2}^2) - (l_{A1}^2 - l_{A2}^2)] + \Delta L (l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2)}{2B \Delta L}, \quad (13)$$

$$Y_{II} = \frac{L_0 Y_C - (L_0 - \Delta L) Y_A}{\Delta L} = \frac{L_0 \sqrt{2BH l_{C1}^2 - B(l_{C1}^2 - l_{C3}^2 + H^2)^2 - H(l_{C1}^2 - l_{C2}^2 + B^2)} - \dots - (L_0 - \Delta L) \sqrt{2BH l_{A1}^2 - B(l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2)^2 - H(l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2)}}{\Delta L \sqrt{2BH}}, \quad (14)$$

$$Z_{II} = \frac{L_0 Z_C - (L_0 - \Delta L) Z_A}{\Delta L} = \frac{L_0 [(l_{C1}^2 - l_{C3}^2) - (l_{A1}^2 - l_{A3}^2)] + \Delta L (l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + 3H)}{2H}. \quad (15)$$

Зупинимося на особливостях практичної реалізації системи визначення координат вимірювального перетворювача та аналізі точності цієї системи. Функціональна схема системи визначення координат показана на рис. 2.

Згідно цієї схеми автоматизація всіх процесів виконана за допомогою мікроконтролера, який програмується на виконання необхідних операцій, з вимірювання довжин $l_{A1}-l_{A3}$ та $l_{C1}-l_{C3}$ і подальшої обробки отриманої інформації з метою визначення координат вимірювального перетворювача X_{II}, Y_{II}, Z_{II} .

Вимірювання вказаних вище відстаней виконується шляхом кодування часового інтервалу (імпульсу напруги), початком якого є момент збудження УЗ коливальних відповідним збудником, а кінцем — момент появи імпульса на виході компаратора напруг при підключенні на його вхід попередньо підсиленого та детектованого сигналу, прийнятого відповідним приймачем. Цей імпульс компаратора фіксує момент приходу УЗ коливальних на приймач.

Часовий інтервал (імпульс напруги) формується за допомогою RS-тригера. Код кожної довжини шляху розповсюдження коливальних формується лічильником імпульсів на виході схеми співпадання, яка на час існування інтервалу пропускає на вхід лічильника імпульси генератора мікроконтролера (10 мГц). Код лічильника утримується на регістрі пам'яті до моменту його зчитування у відповідний

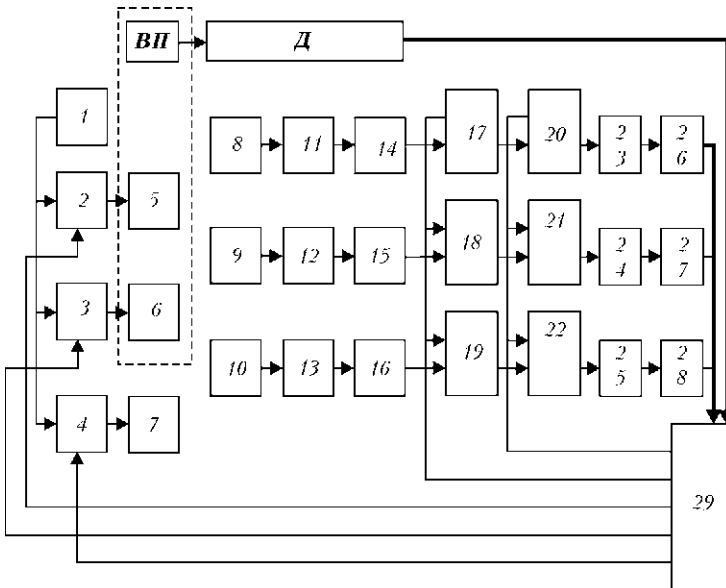


Рис. 2. Функціональна схема системи визначення просторових координат: 1 — джерело живлення; 2-4 — електронні ключі; 5-7 — збудники УЗ (40 кГц) коливальних; 8-10 — приймачі коливальних; 11-13 — аналогові тракти, кожен у складі: підсилювача, амплітудного детектора; 14-16 — амплітудні компаратори; 17-19 — RS-тригери; 20-22 — схеми І; 23-25 — лічильники імпульсів; 26-28 — регістри пам'яті; 29 — мікроконтролер; Д — дефектоскоп



порт мікроконтролера згідно програми роботи мікроконтролеру.

Точність визначення координат при використанні вимірювань відстаней шляхом вимірювання затримок УЗ коливань залежить в першу чергу від швидкості розповсюдження коливань та від впливу руху повітряних мас на визначення часу їх затримок.

Відомо, що фазова швидкість розповсюдження звукових коливань, а вибрана нами частота 40 кГц лежить недалеко від границь звукових частот, залежить від температури повітря і визначається за таким рівнянням [6]:

$$V(t) = (331,6 + 0,6t), \text{ м/с}, \quad (16)$$

де t — температура, °С.

При температурі 25°С швидкість розповсюдження коливань 346,6 м/с, а при зміні температури на ±20 °С величина зміни швидкості становить ±12 м/с (±3,46 %). Усунення такого джерела похибки можемо досягти введенням до складу системи вимірювача фактичної швидкості ультразвуку за допомогою додаткового збудника коливань 4 (рис. 1), 7 (рис. 2) з прийомом його коливань одним з приймачів, наприклад, 3 (рис. 1). Відстань, яку проходять коливання додаткового збудника, відповідає довжині бази вимірювань B . Вимірюючи час запізнення цих коливань τ_B , знаходимо фактичну фазову швидкість розповсюдження коливань:

$$V_{\phi} = \frac{B}{\tau_B}. \quad (17)$$

Це значення швидкості використовуємо для визначення довжин шляхів проходження УЗ коливаннями від кожного зі збудників коливань до кожного з приймачів цих коливань.

Інша методична похибка, що виникає за рахунок впливу руху повітряних мас у зоні вимірювання, на жаль не може бути компенсована. Цей рух повітряної маси приводить до зміни швидкості розповсюдження УЗ коливань та зміни траєкторії їх розповсюдження. В обох випадках рух повітряної маси приводить до похибок величин часових затримок коливань і, таким чином, до похибки визначення відстаней між збуджувачами коливань та приймачами цих коливань. При швидкості руху повітря до 1 м/с максимально можлива похибка не перевищує 3 мм при максимальній відстані до вимірювального перетворювача відносно кінців бази вимірювань (1 м). Для зменшення впливу руху повітря на результат визначення координат перетворювача у польових умовах слід захищати місце виконання контролю від вітру за допомогою звичайних наметів.

Висновки

Розглянутий в статті метод визначення просторових координат вимірювального перетворювача дефектоскопа незалежно від методу неруйнівного контролю, що реалізований у даному дефектоскопі, дозволяє формувати формуляр з відображення картини виконаного НК контролю об'єкта у просторових координатах положення вимірювального перетворювача дефектоскопа та відображення місць виявлених дефектів.

Отримане незалежно від дефектоскопіста відображення виконаного контролю у координатах сканування поверхні об'єкта вимірювальним перетворювачем є об'єктивним документом про виконаний контроль. Наявність такого документу дозволяє оцінювати якість виконаного НК та забезпечує об'єктивне виконання моніторингу даного об'єкта.

Данная работа направлена на устранения субъективности результата контроля с помощью дефектоскопов путем независимого от дефектоскописта автоматического дистанционного определения пространственных координат преобразователя дефектоскопа в процессе ручного сканирования им поверхности объекта контроля и осуществления записи этих координат вместе с оцифрованным с помощью АЦП значением выходного сигнала дефектоскопа в цифровую память.

Метод определения пространственных координат измерительного преобразователя дефектоскопа предусматривает предварительное периодическое с периодом не более 0,05 с измерение расстояний между каждой из двух точек на оси преобразователя (излучателей УЗ (40 кГц) колебаний) и тремя приемниками этих колебаний, установленных на общей базе на фиксированных расстояниях. Пространственные координаты самого измерительного преобразователя определяются как координаты третьей точки на оси преобразователя.

1. Сухоруков В. В., Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потанов А. И. Неразрушающий контроль. Кн. 5. Интроскопия и организация контроля. — М.: Высш. шк., 1993. — С. 9–19.
2. Гурин С. А., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Сканеры-дефектоскопы // В мире неразруш. контроля. — 2004. — № 2(24). — С. 31–63.
3. Кинкулькин И. Е. и др. Фазовый метод определения координат. — М.: Сов.радио, 1979. — С. 5–19.
4. Горбатов А. А., Рудашиевский Г. Е. Акустические методы измерения расстояний в воздушной среде. — М.: Энергоиздат, 1981. — С. 115–201.
5. Масвський С. М., Серий К. М. Системи дистанційного визначення просторового положення вимірювального перетворювача дефектоскопу у процесі контролю // Методи та прилади контролю якості. — 2002. — № 9. — С. 14–18.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982. — С. 254.

Надійшла до редакції
10.02.2012