

УДК 620.19: 681.586.2

О.В. Дергунов, Ю.В. Куц

Національний авіаційний університет, Київ

## МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ КООРДИНАТ В ДЕФЕКТОСКОПІЇ

*Виконано огляд існуючих методів визначення координат, що використовуються для сканування поверхонь об'єктів в неруйнівному контролі. Розглянуто задачу пошуку нових технічних рішень для координатної реєстрації в дефектоскопії. Окреслено перспективи застосування інерційних навігаційних систем для розв'язку задач координатної реєстрації положення датчиків на поверхні об'єктів контролю.*

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, координатна реєстрація, сканування об'єктів.

### Вступ

В сучасному технологічному суспільстві, коли термін експлуатації багатьох інженерних конструкцій, технічних апаратів та механізмів сягає десятків років, важливим є всебічне застосування поточного неруйнівного контролю (НК) та технічної діагностики стану таких об'єктів. Методи НК в наш час розвиваються прискореними темпами за рахунок нових розробок сучасних дефектоскопів, вдосконалення та розробки нових методів виділення вимірювальної інформації. Проте дефектоскоп в сучасному вигляді лишається лише інструментом в руках оператора, який, по суті, вручну сканує поверхню об'єкта контролю та найчастіше виносить рішення щодо результату контролю. Такому підходу притаманно кілька недоліків. По-перше, має місце певна суб'єктивність контролю, тому що кінцевий результат формується за отриманою візуальною інформацією та суттєво залежить від суджень, уважності та рівня підготовки оператора. По-друге, за таким підходом втрачається інформація про координати дефекту, не створюється карта виконаного контролю в просторових координатах поверхні об'єкта контролю.

Такі недоліки відсутні в системах промислового неруйнівного контролю, які не мають такої універсальності як ручні дефектоскопи. Їх найчастіше застосовують для контролю об'єктів із плоскою або циліндричною поверхнею, наприклад для контролю зварювання труб великого діаметру. З огляду на це, перспективним шляхом розвитку дефектоскопії є адаптація існуючих та розробка нових методів автоматичної координатної реєстрації для їх спільного використання разом із ручними дефектоскопами. Це дозволить в автоматичному режимі створювати карту контролю записуючи в пам'ять обчислювального пристрою (комп'ютера чи мікроконтролера) не лише сигнали дефектоскопа, але й відповідні координати на поверхні об'єкта. Реєстрація координат та результатів НК дозволить виконувати моніторинг стану конструкцій, деталей та механізмів, спостерігати за розвитком дефектів та робити точніші прогнози на безаварійну експлуатацію об'єктів контролю.

Інший шлях розвитку НК полягає в розробці засобів роботизації які б дозволили модернізувати існуючі ручні дефектоскопи та перетворити їх у гнучкі автоматизовані системи НК. Головними перевагами таких систем повинні стати мобільність, адаптивність до різних задач (в межах можливостей методу, проте значно ширше ніж в промислових системах НК) та висока швидкодія. Розробка подібних засобів дала б значний економічний ефект за рахунок збереження в експлуатації значної кількості різних дефектоскопів та їх модернізації замість розробки нових. Обов'язковою складовою таких систем є модуль визначення координат. Тому для успішної розробки засобів автоматизації для дефектоскопії також необхідно вирішити задачу визначення поточних координат датчиків НК. Актуальність цієї задачі також обумовлюється відсутністю достатньо надійних рішень серед робочих комерційних пропозицій.

**Метою статті** є огляд існуючих методів та засобів визначення координат при скануванні об'єктів в НК, аналіз їх переваг та недоліків та пошук нових розв'язків цієї задачі.

### Постановка задачі

В системі координат зв'язаною з об'єктом контролю необхідно визначити координати положення вимірювального перетворювача дефектоскопу. Орієнтовні розміри об'єкту контролю ~ 5 м. Передбачити можливості мобільного застосування в умовах виробництва, низьку чутливість до дії зовнішніх завад та негативних факторів. Необхідно на основі аналізу існуючих технічних рішень визначити найбільш перспективний для НК метод координатної реєстрації положення перетворювача.

### Розв'язок задачі

Проблема координатного запису результатів контролю не є новою [1]. Ряд зарубіжних фірм, виробників засобів НК, пропонують комплектувати дефектоскопи спеціально виготовленими координатографами для можливості цифрового запису результатів контролю. Проте подібні координатографи не можуть вирі-

шити проблему запису координат просторового положення вимірювального перетворювача під час сканування поверхні об'єктів контролю складної форми.

Задача визначення координат вимірювального перетворювача (ВП) дефектоскопа, зводиться до визначення відносних просторових координат за допомогою різних механічних, оптичних, радіохвильових та інших методів. Основними напрямками вирішення поставленої задачі є використання лінійних та кутових вимірювань в поєднанні з механічними системами до яких приєднується ВП, та безконтактних методів вимірювання відстаней до ВП (ультразвуковий, оптичний, радіохвильовий) та кутових напрямків до нього.

Виділяють дві основні групи методів визначення координат: контактні та безконтактні. Контактні методи – ґрунтуються на приєднанні ВП до бази контролю (початку локальної системи координат) системою рулеток, штанг або порталів на зразок координатно-вимірювальних машин. Безконтактні методи передбачають, що ВП не має жорсткого зв'язку з базою контролю, а визначення координат виконуються методами радіолокації, оптичними, інерційної навігації, ультразвуковими. Розглянемо ці методи більш детально.

Найпростішими з конструктивної точки зору є механічні системи із лінійними вимірювачами відстані для сканування плоских або майже плоских поверхонь. Прикладом таких систем є координатограф фірми «Panametrics» для використання в контролі товщини сталевих листів та ступеня пошкодження корпусу суден за допомогою ультразвукового товщиноміру [2]. Принцип роботи координатографа показано на рис. 1.

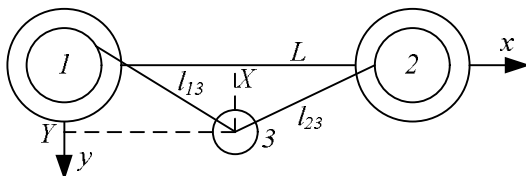


Рис. 1. Механічна система визначення координат із лінійними вимірювачами відстані

До складу подібних координатографів входить система вимірювачів довжини типу рулетки із електронними зчитувачами міток (1,2), які закріплюються на поверхні об'єкта контролю (ОК) на відстані  $L$  одна від одної. Вільні кінці мірних стрічок приєднуються до ВП та утворюють відрізки  $l_{13}$   $l_{23}$ . Координати ВП визначаються наступними рівняннями:

$$X = \frac{l_{31}^2 - l_{32}^2 + L^2}{2L}; \quad Y = \sqrt{l_{31}^2 - \left[ \frac{l_{31}^2 - l_{32}^2 + L^2}{2L} \right]^2}.$$

Точність визначення координат  $X, Y$  в такій системі відліку залежить від похибки вимірювання значень  $l_{13}$   $l_{23}$  та точності встановлення відстані  $L$ . Граничні значення похибки визначення координат за умови, що відстань  $L$  дорівнює 1 м, становить:

$$\Delta X_{\Delta D} = \Delta Y_{\Delta D} = \pm 17,4 \text{ і } \mu\text{м}.$$

Детальний аналіз похибок цього способу наведено в [1]. Спосіб має невисоку точність, його не зовсім зручно застосовувати за межами вимірювальної лабораторії для чого необхідно закріплювати систему рулеток на поверхню ОК та не підходить до неплоских поверхонь.

Інший поширений контактний спосіб визначення координат ВП реалізований в механічній координатній системі на основі перетворювачів кута повороту. Прикладом такої системи є координатограф фірми BALLUFF. Конструктивно координатограф представляє собою механічну систему (рис. 2) із 4 плечима у вузлах яких знаходяться перетворювачі кут повороту – цифровий код (рис 2– елементи 1,2,3,4). Один кінець системи приєднаний до стола на якому проводиться контроль об'єкта, а до іншого – ВП дефектоскопу.

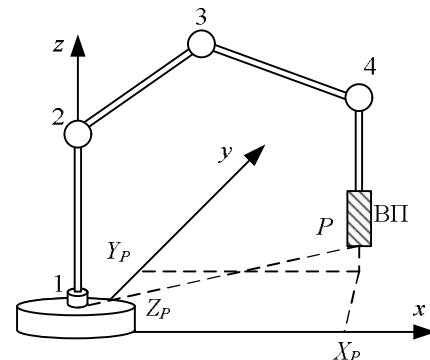


Рис. 2. Механічна система визначення координат із перетворювачами кут повороту – цифровий код

Формули для розрахунку координат та похибки їх визначення за цим способом наведено в [1], згідно яких граничні значення похибки складає  $\Delta_{\text{гран}} = \pm 15,9 \text{ мм}$  для довжини важелів  $L = 0,5 \text{ м}$ . Перевагами такого способу є відносна простота, можливість визначення просторових координат об'ємних поверхонь, а недоліками – обмеженість області вимірювання обладнаним робочим місцем, дещо висока похибка визначення координат.

Іншою перспективною групою способів визначення координат є безконтактні, в основі яких лежать методи радіолокації. Вони полягають у використанні радіо, або акустичного хвильового випромінювання, джерело якого знаходиться на ВП дефектоскопа, та декількох приймачів цих хвиль, за допомогою яких шляхом аналізу часових запізнень сигналів кожного з приймачів визначають відстань від приймача до ВП з використанням фазових методів обробки сигналів. Детальний аналіз цієї групи методів наведено в [3, 4]. Ці методи мають суттєві недоліки викликані відбиттям та накладанням радіохвильових чи акустичних сигналів, що призводить до появи помилок визначення фазових зсувів сигналів та відстаней до перетворювача, сумарна похибка яких лежить у межах  $\pm 14 \text{ мм}$ . Крім того, спосіб також вимагає ретельно

обладнаного робочого місця, що ускладнює проведення дефектоскопії за межами лабораторії.

Достатньо новими та перспективними є оптичні способи визначення координат датчиків НК. Їх суть полягає у використанні джерела точкового світла приєднаного до ВП, декількох оптичних відеокамер, розташованих певним чином навколо робочого місця дефектоскопіста, зображення з яких аналізуються та знаходяться відносні координати джерела точкового світла, які співпадають з координатами ВП. В [1] наведено аналіз різних схем розташування камер, різних методів аналізу зображень та пошуку координат, проте в кожному з описаних випадків мають місце головні недоліки таких способів – чутливість відеокамер до джерел паразитного засвітлення та випадок коли джерело точкового світла перекривається рукою оператора під час роботи, або об'єктом контролю, або конструктивними елементами місця проведення контролю. З цього випливає, що такі способи можуть бути застосовані лише у спеціально обладнаному приміщенні і надійність визначення координат за ними підлягає ретельній перевірці з боку оператора, який повинен бути впевненим у наявності прийому камерами випромінювання від точкового світла.

З огляду на представлені способи та специфіку задачі визначення координат саме для потреб дефектоскопії можна зробити наступні висновки відносно вимог до таких способів. Похибка визначення координат при скануванні поверхні об'єкта контролю не повинна перевищувати  $\pm 10$  мм для більш точного визначення області дефекту. Надійність визначення координат не повинна залежати від впливу зовнішніх факторів, рівномірності освітлення чи наявності відблисків, оскільки умови контролю при практичній експлуатації дефектоскопів суттєво відрізняються від лабораторних. Важливо забезпечити можливість використання дефектоскопів із системами визначення координат за межами лабораторій для проведення робіт безпосередньо на об'єктах контролю без їх вилучення з місця експлуатації (що технологічно не завжди можливо).

В [1] стисло наведено використання систем інерційної навігації для задач визначення координат, проте зроблено висновок про їх неактуальність для потреб дефектоскопії через великі розміри та високу вартість. Однак, завдяки досягненням сучасної електроніки широкому колу дослідників стали доступні відносно недорогі та малагабаритні інтегральні інерційні датчики на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС). До них відносяться датчики лінійних прискорень, кутових швидкостей, напруженості магнітного поля, на основі яких можна побудувати інерційну систему навігації, або її елементи для вирішення поставленої задачі. В основу системи визначення координат в цьому випадку покладено метод безплатформенної інерційної навігації (БІНС). Спрощену структурну схему навігаційної системи наведено на рис. 3. До складу такої системи входить трьохосьовий датчик лінійних при-

скорень (акселерометр – 1), трьохосьовий датчик кутових швидкостей (гіроскоп – 2) та трьохосьовий датчик напруженості магнітного поля (компас – 3). Монтажна плата резидентної частини такої системи (яка приєднується до ВП дефектоскопу) за розмірами може не перевищувати  $2 \times 1$  см.

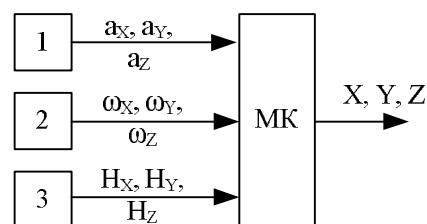


Рис. 3. Структурна схема інерційної навігаційної системи

БІНС має ряд переваг, таких як незалежність показів від впливу зовнішнього середовища, спотворень акустичних або радіолокаційних сигналів. Проте є й ряд недоліків: досить високі похибки визначення переміщення за рахунок використання операцій подвійного інтегрування математично визначеного прискорення. Ця проблема полягає в тому, що отримати безпосереднє прискорення руху за допомогою датчиків в БІНС неможливо. Акселерометри чутливі до уявного прискорення, тобто у вихідних сигналах міститься інформація і про прискорення руху, і про прискорення вільного падіння. Для того щоби отримати прискорення руху необхідно від вектора уявного прискорення відняти аналітично розрахований вектор прискорення вільного падіння з урахуванням кутів нахилу датчиків. Нехай  $a_x, a_y, a_z$  – миттєві значення проєкцій рівнодіючого прискорення на координатні осі, які утворюють вектор  $\vec{A} = (a_x, a_y, a_z)$ , вектор  $\vec{A}'$  прискорення переміщення,  $\vec{A}' = \vec{A} - \mathbf{M}_X(\alpha) \cdot (\mathbf{M}(\beta) \cdot \vec{G})$ ,  $\vec{G} = (0; 0; 9,8)$  – вектор прискорення вільного падіння,

$$\mathbf{M}_X(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{M}_Y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix},$$

де  $\alpha, \beta$  – кути нахилу датчиків по осям X та Y,  $\mathbf{M}_X(\alpha), \mathbf{M}_Y(\beta)$  – матриці повороту навколо осей X та Y відповідно. Тоді прискорення руху розраховується наступним чином. Визначене прискорення інтегрують та отримують вектор переміщення:

$$\vec{P} = \iint \vec{A}'(t) dt^2.$$

Якщо припустити, що похибка визначення кутів нахилу дорівнює  $0,5^\circ$  (що є типовим значенням для МЕМС датчиків), а похибками акселерометра знехтувати, то за 10 хвилин роботи такої інерційної системи накопичиться похибка визначення переміщення, яка дорівнюватиме  $\sim 0,5$  м. Звісно, такий результат є не-

прийнятним, особливо для задач сканування поверхонь, де така похибка не повинна перевищувати 1 см.

Одним з можливих рішень цієї проблеми є використання інших способів визначення переміщення без операції інтегрування прискорення. Довжину вектору переміщення можна знаходити за допомогою механічних або оптичних вимірювачів переміщення, які широко застосовуються в комп'ютерних

маніпуляторах, а його напрям – за допомогою інерційних датчиків інерційної навігаційної системи. Доповнений таким чином метод інерційної навігації є достатньо перспективним для використання в задачах визначення координат при скануванні поверхонь під час проведення дефектоскопії об'єктів.

Результати порівняльного аналізу існуючих методів визначення координат наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати порівняльного аналізу існуючих методів визначення координат

Методи Властивості	Механічні	Оптичні	Радіохвильова навігація	Ультразвукова навігація	Інерційна навігація
Мобільність засобів	Залежно від способу	Обмежено налаштованою робочою зоною	Обмежена налаштованою робочою зоною	Обмежена налаштованою робочою зоною	Висока мобільність, не вимагає ретельного налаштування робочої зони
Граничні похибки	До $\pm 16$ мм на 1 м поверхні	До $\pm 2$ мм на 1 м поверхні	До $\pm 16$ мм на 1 м поверхні	До $\pm 5$ мм на 1 м поверхні	Пропорційна часу роботи системи. Граничні значення: 10 хв $\sim$ 0,5 м; 1 хв $\sim$ 5 см
Залежність від дії зовнішніх завад	Не залежить від дії завад	Чутливий до відблисків та нерівномірного освітлення	Відбиття та накладання хвиль, що збільшує похибки	Відбиття та накладання хвиль, що збільшує похибки	Не залежить від дії завад
Можливість роботи з об'єктами поверхнями	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Можлива робота із поверхнями будь-яких форм та розмірів

## Висновки

В роботі виконано аналіз існуючих методів визначення координат що можуть бути використані в задачах дефектоскопії при скануванні поверхонь об'єктів контролю. Як показано в табл. 1, оптичні методи мають найбільшу точність, проте можливість їх застосування суттєво обмежені. З іншого боку, перспективними для використання в задачах реєстрації координат ВП є методи інерційної навігації. Їх головний недолік – прогресуюча з часом похибка. Вона викликана способом визначення переміщення, як показано в роботі. Для її усунення необхідно застосувати в ІНС принципово інший спосіб визначення довжини вектору переміщення, а напрямком вектору визначати за допомогою датчиків ІНС – акселерометра, гіроскопа та магнітного компасу. Перспективи використання ІНС полягають в потенційно високій мобільності такої системи, низькій залежності від зовнішніх факторів та завад, можливості роботи із поверхнями довільної форми та об'єктами великих розмірів.

З огляду на роль та практичне використання інерційної навігації в авіації, при вирішенні задачі пошуку координат доцільно передбачити можливість використання двох або більше методів визначення

координат. В залежності від поточних умов, стану датчиків, наявності помилок в прийнятих сигналах слід використати ті значення координат які були отримані з найбільшою точністю. Тобто, якщо використовувати модифікований метод інерційної навігації в комбінації з оптичним, то у випадку наявності в кадрі відблисків чи іншої неможливості використати значення координат отримані за допомогою ІНС. Такий підхід дозволяє отримати переваги обох методів, а деякі з їх недоліки звести до мінімуму.

## Список літератури

1. Маєвський С.М. Координатна реєстрація в дефектоскопії / С.М. Маєвський, К.М. Серий. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2011. – 116 с.
2. Albert S. Birks. *Nondestructive Testing Handbook. Second* / Albert S. Birks, Robert E. Green. –ASNT 1991. – Edition. Vol. 7. –P. 451.
3. Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны / Г.Б. Белоцерковский. – М.: Сов. радио, 1978. –240 с.
4. Рудашевский Г.Е. Акустические методы измерения расстояний в воздушной среде / А.А. Горбатов, Г.Е. Рудашевский. – М.: Энергоиздат, 1981. –243 с

Надійшла до редколегії 14.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.М. Щербак, Національний авіаційний університет, Київ.

## МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ КООРДИНАТ В ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

А.В. Дергунов, Ю.В. Куц

Выполнен обзор существующих методов определения координат, которые используются для сканирования поверхностей объектов в неразрушающем контроле. Рассмотрена задача поиска новых решений для координатной регистрации в дефектоскопии. Обозначены перспективы использования инерционных навигационных систем для решения задач координатной регистрации положения датчиков неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, координатная регистрация, сканирование объектов.

**COORDINATE REGISTRATION METHODS IN DEFECTOSCOPY**

O.V. Dergunov, Y.V. Kuts

*A review of existing methods for coordinate detection in nondestructive testing is presented. New solutions for coordinate registrations are described. The prospects for the use of inertial navigation systems in coordinate registration of NDT probes are shown.*

**Keywords:** *nondestructive testing, coordinate registration, surface scan.*