

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 2023 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-науковою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Координатна реєстрація інформації в системах
автоматизованої вихрострумової дефектоскопії»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ПК-11мн

Малько Володимир Петрович _____

Науковий керівник:

Професор кафедри АСНК, доктор технічних наук, професор

Куц Юрій Васильович _____

Консультант з розробки стартап-проекту:

професор кафедри економічної кібернетики,

доктор економічних наук, доцент

Шевчук Олена Анатоліївна _____

Рецензент:

Завідувач каф. ІВТ, доктор технічних наук, професор

Єременко Володимир Станіславович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-наукова програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Мальку Володимиру Петровичу

1. Тема дисертації «Координатна реєстрація інформації в системах автоматизованої вихрострумової дефектоскопії», науковий керівник дисертації Куц Юрій Васильович, професор кафедри АСНК, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «03» квітня 2023 р. № 1389-с.

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Мета дослідження: Розроблення безконтактного ультразвукового завадостійкого методу двокоординатної реєстрації просторового положення первинного перетворювача на поверхні виробу при проведенні вихрострумового неруйнівного контролю.

4. Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасні методи та засоби визначення просторових координат первинних перетворювачів в задачах НК;
- розробити новий метод реєстрації координат положення датчиків на основі ультразвукового багаточастотного фазового методу відстаней;
- удосконалити метод усунення неоднозначності фазових вимірів, що ґрунтується на використанні числової системи залишкових класів (ЧСЗК);

- розробити методику калібрування ультразвукової системи двокоординатної реєстрації інформації за швидкістю звуку, а також методику визначення розмірів мертвих зон для забезпечення заданої похибки визначення координат;
- розробити програмно-алгоритмічне забезпечення системи, її структуру та надати рекомендації щодо її апаратної реалізації.

5. Об'єкт дослідження: процес визначення координат перетворювачів в автоматизованих системах НК.

6. Предмет дослідження: ультразвуковий багаточастотний фазовий метод визначення координат з усуненням неоднозначності на основі ЧСЗК.

7. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація (22 слайди).

8. Орієнтовний перелік публікацій: 2 статті (1 у фаховому виданні), 4 тези.

9. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Шевчук О. А., д.е.н., доцент, професор кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського	15.03.2023	

10. Дата видачі завдання: _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Формулювання завдання магістерської дисертації	01.08.2022	Виконано
2.	Аналітичний огляд теоретичного матеріалу	01.09.2022	Виконано
3.	Розроблення способу усунення багатозначності фазових вимірів на основі ЧСЗК	01.10.2022	Виконано
4.	Моделювання системи визначення координат за розробленим методом.	01.11.2022	Виконано
5.	Аналіз похибок вимірювання відстані в системі координатної реєстрації інформації	10.12.2022	Виконано
6.	Реалізація системи координатної реєстрації за умови дій шумів	05.01.2023	Виконано
7.	Моделювання системи координатної реєстрації за малого відношення с/ш	15.02.2023	Виконано
8.	Технічна реалізація запропонованої системи координатної реєстрації.	15.03.2023	Виконано
9.	Розроблення стартап-проекту	10.04.2023	Виконано
10.	Підготовка документації	10.05.2023	Виконано

Студент

Володимир МАЛЬКО

Науковий керівник дисертації

Юрій КУЦ

Реферат

Актуальність теми: На сьогодні в різних технічних застосунках в галузі автоматизованого неруйнівного контролю (НК) актуальним є питання визначення координат дефектів, різного роду неоднорідностей матеріалу тощо, які не відповідають вимогам якості контрольованих виробів. Використання координатної інформації дає змогу проводити моніторинг дефектів, а також будувати В- та С-скани, які містять не лише інформацію про дефекти, але й координати їх розташування на поверхні об'єкта контролю (ОК). За такого підходу згідно отриманих даних можна як спостерігати процес розвитку дефектів, так і відслідковувати появу нових дефектів, проводити додаткові дослідження виявлених дефектів іншими методами НК, а також виконувати оцінку загального стану ОК.

Розв'язання питань автоматизації НК в багатьох практичних задачах вимагає застосування безконтактних методів реєстрації координатної інформації. Такі методи потребують використання додаткових засобів інформаційно-вимірювальної техніки, орієнтованих на використання різних фізичних полів та явищ – акустичних, оптичних тощо, і формування відповідних інформаційних сигналів, які є носіями координатної інформації. В реальних умовах такі сигнали спостерігаються на фоні значних шумів та завад. Тому дослідження безконтактних методів координатної реєстрації інформації в системах автоматизованого НК, які забезпечують достовірне і точне визначення координат за умов малого відношення сигнал/шум є актуальним напрямом розвитку НК.

Мета дослідження: Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні безконтактного ультразвукового завадостійкого методу двокоординатної реєстрації просторового положення первинного перетворювача на поверхні виробу при проведенні вихрострумового неруйнівного контролю.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені та вирішені наступні завдання:

- проаналізувати сучасні засоби визначення просторових координат первинних перетворювачів в задачах НК та реалізовані в них методи реєстрації координат, дослідити можливість автоматизації різних методів та засобів НК за рахунок реєстрації положення датчиків;

- розробити новий метод реєстрації координат положення датчиків за використання ультразвукового багаточастотного фазового методу визначення відстаней з усуненням неоднозначності фазових вимірів на основі числової системи залишкових класів (ЧСЗК);

- удосконалити метод усунення неоднозначності фазових вимірів, що ґрунтується на використанні ЧСЗК з метою забезпечення достовірного визначення координат за менших значень відношення сигнал/шум;

- розробити методику калібрування ультразвукової системи двокоординатної реєстрації інформації за швидкістю звуку з метою підвищення точності визначення координат, а також методику визначення розмірів мертвих зон, в яких неможливо точно розрізнити дві суміжні координати за заданої похибки визначення координат;

- розробити програмно-алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропоновані методи та методики реєстрації координат первинного перетворювача;

- розробити структуру апаратної частини засобу координатної реєстрації положення датчиків НК та надати рекомендації по вибору елементної бази.

Об’єкт дослідження: процес визначення координат перетворювачів в автоматизованих системах НК.

Предмет дослідження: ультразвуковий багаточастотний фазовий метод визначення координат з усуненням неоднозначності на основі ЧСЗК.

Методи дослідження базуються на використанні: методів технічної діагностики і неруйнівного контролю; теорії автоматичного регулювання; інформаційно-вимірювальних технологіях; теорії чисел; математичного аналізу; цифрових методів оброблення сигналів, а саме дискретного перетворення Гільберта; теорії ймовірностей та математичної статистики; комп'ютерного моделювання

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Удосконалено метод визначення координат датчика на основі двовимірної трилатерації та ультразвукового багаточастотного фазового методу визначення відстаней з оцінюванням повного фазового зсуву між випроміненим та прийнятими сигналами за допомогою ЧСЗК, що дає змогу реєструвати координати перетворювача з підвищеною точністю.

2. Розроблено метод усунення багатозначності фазових вимірів при застосуванні ЧСЗК, який ґрунтується на узгодженні лишків ЧСЗК, отриманих за результатами фазових вимірювань на всіх робочих частотах, що дає змогу усунути грубі помилки відновлення повного фазового зсуву за низького відношення сигнал/шум, і відповідно отримати коректні значення відстані між випромінювачем і приймачами ультразвукових коливань.

3. Запропоновано спосіб зменшення похибки вимірювання просторових координат датчика, який ґрунтується на проведенні додаткового вимірювання швидкості поширення акустичного сигналу, що дало змогу забезпечити інваріантність результатів вимірювання відстані за зміни метеопараметрів середовища.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено методику визначення координат первинного перетворювача за умови використання ультразвукового багаточастотного фазового методу та ЧСЗК, яка ґрунтується на відновленні повного фазового зсуву сигналів та усунення неоднозначності фазових вимірів за допомогою ЧСЗК.

2. Розроблено методику застосування ЧСЗК для забезпечення коректної роботи в умовах наявності низького відношення сигнал/шум, яка ґрунтується на узгодженні лишків ЧСЗК, отриманих за результатами фазових вимірювань на всіх робочих частотах.

3. Розроблено методику визначення мертвих зон, яка ґрунтується на визначенні областей в межах контрольованої ділянки виробу, для яких немає змоги розрізнити дві суміжні координати за заданої похибки їх визначення.

4. Виконані комп'ютерні обчислювальні експерименти при використанні ультразвукового багаточастотного методу та ЧСЗК дали змогу відпрацювати програмну реалізацію алгоритму визначення координат датчика та підтвердити ефективність запропонованого методу реєстрації координат.

5. Розроблено структуру апаратної частини засобу координатної реєстрації положення датчиків НК, що, за рахунок використання коректного підбору базових елементів, а також проведення калібрування по швидкості, дало змогу зменшити похибку вимірювання координат позиціонування датчиків НК.

Висновки:

1. В результаті дослідження був удосконалений метод ЧСЗК призначений для усунення неоднозначності фазових вимірів при визначенні відстаней за методом трилатерації. Для удосконалення був використаний метод узгодження лишків ЧСЗК, який ґрунтується на встановленні певних правил округлення лишків, що дає змогу коректно відновити значення фазового зсуву за умови малого відношення сигнал/шум. Запропонований метод забезпечує достовірне відновлення фазового зсуву при відношенні сигнал/шум не менше 1.1 за умови використання прямокутної обвідної та не менше 2.5 за використання гауссової обвідної зондуючих акустичних сигналів.

2. Розроблений новий ультразвуковий фазовий метод двокоординатної реєстрації інформації, який призначений для визначення положення датчика під час проведення автоматизованого неруйнівного контролю. Він базується на визначенні координат за методом трилатерації.

Відстані між випромінювачем і двома приймачами ультразвукових коливань визначалась за допомогою акустичного багаточастотного фазового методу, а неоднозначність фазових вимірів усувалась на основі використання ЧСЗК. Запропонований метод дає змогу визначати координати положення датчика з похибкою ± 0.5 мм, що цілком достатньо для його використання у вихрострумовій дефектоскопії.

3. Розроблена методика визначення мертвих зон, для пошуку яких, виходячи зі значення дискрету фазових вимірів, встановлена гранична похибка в 17° (~ 0.3 рад), яка дала змогу встановити, що запропонована акустична система визначення координат має мертву область на початку вимірювальної відстані площею 1000×80 мм². Також була визначена мертва зона приймачів ультразвукового сигналу з круговою діаграмою напрямленості в 135° площею в 1000×207.1 мм².

4. Для зменшення похибки визначення координат була розроблена методика калібрування системи за швидкістю акустичних хвиль у навколишньому середовищі. Її застосування дало змогу зменшити додаткову похибку визначення координат датчика в умовах варіації метеопараметрів до 0,1%.

5. Проведений модельний експеримент, в якому передбачалось, що ультразвуковий випромінювач суміщений з первинним перетворювачем дефектоскопу, а на кінцях бази встановлено два ультразвукові приймачі. Вхідні данні: контрольована плоска ділянка ОК має вигляд квадрата розміром 1×1 м, ґратка координат розташування датчика задавалась в межах квадрату з дискретним кроком 1 мм, значення бази (відстані між приймачами) дорівнювало 1 м, кількість робочих частот – три, метод визначення координат – багаточастотний фазовий метод, метод усунення неоднозначності фазових вимірів – на основі ЧСЗК. Результати моделювання довели можливість практичної реалізації та використання запропонованих методів та методик при

використанні в вихрострумовому неруйнівному контролі. За кількості відліків фазового зсуву на період сигналу 16 зберігалась працездатність системи за відношення сигнал/шум >2 .

6. Запропонована система може бути використана в якості самостійного засобу визначення координат, або в якості підсистеми координатної реєстрації в засобах автоматизованого неруйнівного контролю. Мала похибка виміру координат забезпечує можливість використання системи координатної реєстрації для малоапертурних сенсорів – як вихрострумових, так і ультразвукових.

7. Розроблено структуру апаратно-програмного засобу запропонованої багаточастотної фазової системи двокоординатної реєстрації інформації, на основі ЧСЗК, в системах автоматизованого ВСНК та надано рекомендації по вибору елементної бази для її реалізації. Запропоновано використати випромінювач ультразвукових коливань частотою до 40 кГц з круговою діаграмою напрямленості в 360⁰ марки US40KT-01, приймач-випромінювач 400EP14D частотою до 40 кГц з круговою діаграмою напрямленості в 135⁰. Для опрацювання фазових даних та визначення координат положення датчика НК запропоновано використовувати мікропроцесор типу ATtiny826.

Abstract

Relevance of the topic: Today, in various technical applications in the field of automated non-destructive testing (NDT), the issue of determining the coordinates of defects, various types of material inhomogeneities, etc., which do not meet the quality requirements of the controlled products, is relevant. The use of coordinate information makes it possible to monitor defects, as well as to build B- and C-scans, which contain not only information about defects, but also the coordinates of their location on the surface of the control object (OC). With this approach, according to the obtained data, it is possible to observe the process of the

development of defects, and to monitor the appearance of new defects, to conduct additional studies of the detected defects by other NC methods, as well as to perform an assessment of the general condition of the object of control.

Solving the issues of NDT automation in many practical tasks requires the use of non-contact methods of registration of coordinate information. Such methods require the use of additional means of information and measurement technology, focused on the use of various physical fields and phenomena - acoustic, optical, etc., and the formation of appropriate information signals that are carriers of coordinate information. In real conditions, such signals are observed against the background of significant noise and interference. Therefore, the study of non-contact methods of coordinate registration of information in systems of automated NDT, which provide reliable and accurate determination of coordinates under conditions of low signal/noise ratio, is an actual direction of development of NDT.

Purpose of the research: The purpose of the dissertation is to develop a non-contact ultrasonic interference-resistant method of two-coordinate registration of the spatial position of the primary transducer on the surface of the control object during eddy current non-destructive testing.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved in the work:

- to analyze the modern means of determining the spatial coordinates of the primary transducers in NDT tasks and the coordinate registration methods implemented in them, to investigate the possibility of automating various NDT methods and means due to the registration of sensor positions;
- to develop a new method of registering the coordinates of the position of the sensors using the ultrasonic multi-frequency phase method of determining distances with the elimination of the ambiguity of phase measurements based on the numerical system of residual classes (NSRC);
- to improve the method of eliminating the ambiguity of phase measurements, which is based on the use of the NSRC in order to ensure reliable determination of coordinates at lower values of the signal/noise ratio;

- to develop a method of calibrating the ultrasonic system of two-coordinate information registration according to the speed of sound in order to increase the accuracy of coordinate determination, as well as a method of determining the size of dead zones in which it is impossible to accurately distinguish two adjacent coordinates with a given coordinate determination error;

– to develop software and algorithmic support that implements the proposed methods and techniques for registering the coordinates of the primary transducer.

– the structure of the hardware part of the tool for coordinate registration of the position of NDT sensors was developed, which, due to the use of the correct selection of basic elements, as well as speed calibration, made it possible to reduce the measurement error of the positioning coordinates of NDT sensors.

The object of research: the process of determining the coordinates of transducers in automated NDT systems.

The subject of the research: ultrasonic multi-frequency phase coordinate determination method with disambiguation on the basis of NSRC.

Research methods are based on the use of: methods of technical diagnostics and non-destructive testing; theories of automatic regulation; information and measurement technologies; number theory; mathematical analysis; digital methods of signal processing, namely discrete Hilbert transformation; theory of probabilities and mathematical statistics; computer modeling.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. The method of determining the coordinates of the sensor based on two-dimensional trilateration and the ultrasonic multi-frequency phase method of determining distances with the estimation of the full phase shift between the emitted and received signals with the help of the NSRC has been improved, which makes it possible to register the coordinates of the transducer with increased accuracy.

2. A method has been developed to eliminate ambiguity of phase measurements when applying the NSRC, which is based on the reconciliation of the NSRC residuals obtained from the results of phase measurements at all operating frequencies, which makes it possible to eliminate gross errors of restoring the full

phase shift at a low signal-to-noise ratio, and, accordingly, to obtain correct the value of the distance between the emitter and the receivers of ultrasonic vibrations.

3. A method of reducing the measurement error of the spatial coordinates of the sensor is proposed, which is based on the additional measurement of the acoustic signal propagation speed, which made it possible to ensure the invariance of the distance measurement results with changes in the meteorological parameters of the environment.

The practical significance of the obtained results is as follows:

1. A technique for determining the coordinates of the primary transducer has been developed, provided that the ultrasonic multi-frequency phase method and the NSRC are used, which are based on the restoration of the complete phase shift of the signals and the elimination of the ambiguity of the phase measurements using the NSRC.

2. The method of applying the NSRC to ensure correct operation in the presence of a low signal/noise ratio has been developed, which is based on the reconciliation of the residuals of the NSRC obtained from the results of phase measurements at all operating frequencies.

3. A technique for determining dead zones has been developed, which is based on the determination of areas within the controlled area of the product, for which it is not possible to distinguish two adjacent coordinates with a given error of their determination.

4. The performed computer computing experiments using the ultrasonic multi-frequency method and NSRC made it possible to work out the software implementation of the algorithm for determining the coordinates of the sensor and to confirm the effectiveness of the proposed method of registration of coordinates.

5. The structure of the hardware part of the tool for coordinate registration of the position of NDT sensors was developed, which, due to the use of the correct selection of basic elements, as well as speed calibration, made it possible to reduce the measurement error of the positioning coordinates of NDT sensors.

Conclusions:

1. As a result of the research, the NSRC method was improved, designed to eliminate the ambiguity of phase measurements when determining distances using the trilateration method. For improvement, the method of matching the residuals of NSRC was used, which is based on established certain rules for rounding off the residuals, which makes it possible to correctly restore the value of the phase shift under the condition of a low signal-to-noise ratio. The proposed method provides reliable recovery of the phase shift with a signal-to-noise ratio of at least 1.1 when using a rectangular contour and at least 2.5 when using a gaussian contour when probing acoustic signals.

2. A new ultrasonic phase method of two-coordinate information registration has been developed, which is designed to determine the position of the sensor during automated non-destructive testing. It is based on the determination of coordinates by the method of trilateration. The distance between the emitter and two receivers of ultrasonic oscillations were determined using the acoustic multi-frequency phase method, and the ambiguity of phase measurements was eliminated based on the use of the NSRC. The proposed method makes it possible to determine the coordinates of the sensor position with an error of ± 0.5 mm, which is quite sufficient for its use in eddy current flaw detection.

3. The method of determining dead zones was developed, for the search of which, based on the discrete value of phase measurements, a marginal error of 170 (~ 0.3 rad) was established, which made it possible to establish that the proposed acoustic coordinate determination system has a dead zone at the beginning of the measuring distance with an area of 1000×80 mm². Also, the dead zone of the ultrasonic signal receivers with a circular pattern of 135° with an area of 1000×207.1 mm² was determined.

4. To reduce the error in determining the coordinates, a system calibration method was developed based on the speed of acoustic waves in the environment. Its application made it possible to reduce the additional error of determining the sensor coordinates in conditions of variation of meteorological parameters to 0.1%.

5. A model experiment was conducted, in which it was assumed that the ultrasonic emitter is combined with the primary transducer of the flaw detector, and two ultrasonic receivers are installed at the ends of the base. Input data: the controlled flat section of the OK has the form of a square with the size of 1x1 m, the coordinate grid of the sensor location was set within the square with a discrete step of 1 mm, the value of the base (the distance between the receivers) was equal to 1 m, the number of operating frequencies was three, the method of determining the coordinates was multi-frequency phase method, the method of eliminating the ambiguity of phase measurements - based on NSRC. The simulation results proved the possibility of practical implementation and use of the proposed methods and techniques when used in eddy current non-destructive testing. Based on the number of phase shift readings per signal period of 16, the system's performance was maintained at a signal/noise ratio > 2.

6. The proposed system can be used as an independent means of determining coordinates, or as a subsystem of coordinate registration in means of automated non-destructive control. The small error of coordinate measurement ensures the possibility of using the coordinate registration system for small-aperture sensors - both eddy current and ultrasonic.

7. The structure of the hardware and software tool of the proposed multi-frequency phase system of two-coordinate information registration, based on NSRC, in the systems of the automated eddy-current non-destructive testing was developed and recommendations were given for the selection of the element base for its implementation. It is proposed to use a US40KT-01 emitter with a frequency of up to 40 kHz with a circular directional diagram of 360°, a 400EP14D receiver-emitter with a frequency of up to 40 kHz with a circular directional diagram of 135°, and to process phase data and determine coordinates on an ATtiny826 microprocessor.

ЗМІСТ

Перелік скорочень та умовних позначень:	18
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	21
1.1. Місце та значення підсистеми координатної реєстрації в засобах автоматизованого НК.....	21
1.2. Фізичні принципи реалізації задач координатної реєстрації в засобах автоматизованого НК.....	22
1.2.1. Інерційні системи координатної реєстрації інформації.....	22
1.2.2. Механічні системи координатної реєстрації інформації.....	23
1.2.3. Безконтактні системи координатної реєстрації інформації .	26
1.3. Теоретичний базис безконтактного методу двокоординатної реєстрації інформації	32
1.3.1. Метод трилатерації	33
1.3.2. Багаточастотний фазовий метод визначення відстаней	34
1.3.3. Аналіз методів розв’язання задачі неоднозначності фазових вимірів	36
1.3.4. Застосування числової системи залишкових класів для розв’язання задачі неоднозначності фазових вимірів	40
1.4. Постановка задачі дослідження.....	42
Висновки до першого розділу	43
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СПОСОБУ УСУНЕННЯ БАГАТОЗНАЧНОСТІ ФАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ НА ОСНОВІ ЧИСЛОВОЇ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ	44
2.1. Визначення відстані багаточастотним фазовим методом з використанням ЧСЗК.....	44
2.2. Постановка задачі визначення відстані з використанням ЧСЗК	49
2.3. Розроблення алгоритму розрахунку відстані в багаточастотній фазовій системі координатної реєстрації інформації на основі ЧСЗК.....	50

2.4. Приклади розрахунку параметрів ЧСЗК в задачах визначення відстані	52
2.4.1. Розрахунок параметрів ЧСЗК в задачі визначення відстані за використання тришкальної системи	52
2.4.2. Розрахунок параметрів розширеної системи ЧСЗК для контролювання коректного відновлення лишків.....	55
Висновки до другого розділу.....	58
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ В СИСТЕМІ КООРДИНАТНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ ДАТЧИКА ВСНК.....	59
3.1. Постановка задачі оцінювання похибки вимірювання координат датчика ВСНК з використанням ЧСЗК в ультразвукових фазових системах двокоординатної реєстрації інформації	59
3.2. Визначення випадкової складової похибки вимірювання координат за аналізом рівняння вимірювання	60
3.3. Моделювання процесу визначення похибки вимірювання координат за використання багаточастотного фазового методу з використанням ЧСЗК в системах двокоординатної реєстрації інформації за відсутності шумів.....	64
3.3.1. Визначення вхідних параметрів ЧСЗК	64
3.3.2. Моделювання процесу визначення координат на основі ЧСЗК та за відсутності шумової складової сигналу.....	66
3.4. Оцінювання розмірів мертвих зон в задачах визначення координат положення датчика ВСНК.....	72
3.5. Калібрування ультразвукової системи координатної реєстрації по швидкості поширення ультразвукового сигналу	75
Висновки до третього розділу	77
РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ ЗА УМОВИ ДІЙ ШУМІВ	78
4.1. Розроблення структурно-логічної схеми ультразвукової фазової тришкальної системи двокоординатної реєстрації інформації	78

4.2. Моделювання процесу визначення координат на основі ЧСЗК та оцінка похибки визначення координат за наявності шумової складової сигналу	82
4.3. Аналіз можливостей технічної реалізації запропонованої системи координатної реєстрації.....	90
4.3.1 Визначення основних характеристик базових елементів для реалізації акустичної підсистеми	90
4.3.2 Надання рекомендації по вибору конкретної моделі приймачів та випромінювачів ультразвукових коливань по визначеним характеристикам.....	92
Висновки до четвертого розділу.	95
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	97
5.1. Опис ідеї проекту	97
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	99
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	101
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	111
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	115
Висновки до п'ятого розділу	123
ВИСНОВКИ.....	125
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	127
ДОДАТКИ.....	131
Додаток А.....	132
Додаток Б	133
Додаток В.....	138
Додаток Г	142
Додаток Д.....	143

Перелік скорочень та умовних позначень:

Позначення	Пояснення
ЧСЗК	Числова система залишкових класів (NSRC).
НК	Неруйнівний Контроль (NDT).
ОК	Об'єкт Контролю (ОС).
CMD	Оператор усереднення на колі фазових даних. (Circular Mean Direction).
U_i	Амплітуда ультразвукового сигналу на i -тій частоті.
u_i	Ультразвуковий сигнал на i -тій частоті.
f_i	Значення i -тої частоти.
λ_i	Довжина хвилі на i -тій частоті.
t	Поточний час.
T_ϵ	Час випромінювання сигналів.
k	Кількість робочих частот.
i	Порядковий номер робочих частот.
$[j]$	Дискретне значення параметра.
$\Phi_i^{a,b,c}[j]$	Дискретний повний фазовий зсув на i -тій частоті сторін a,b та c.
$\varphi_i^{a,b,c}[j]$	Дискретний фазовий зсув на i -тій частоті сторін a,b та c.
$\Delta\varphi_i$	Дискрет фазового зсуву на i -тій частоті.
d_0	Дискретний крок визначення відстані.
x_A, y_A	Координати перетворювача
m_i	Модуль ЧСЗК на i -тій частоті.
$G^{a,b,c}$	Чисельний результат вимірювання представлений в ЧСЗК.
g_i	Залишки ЧСЗК на кожній i -тій частоті.
G_{max}	Максимально відновлювальна відстань в ЧСЗК
B_i	Ортонормовані базиси на кожній i -тій частоті.

ВСТУП

В умовах конкурентної боротьби на ринку товарів та послуг постійно зростають вимоги до рівня автоматизації виробничих технологічних процесів. Така тенденція не оминула і напрями розвитку неруйнівного контролю (НК) в цілому і вихрострумового НК зокрема. У зв'язку з підвищенням вимог до якості продукції, достовірності результатів контролю технологічного стану об'єктів та виробів автоматизація процесів НК стає однією з першочергових задач його розвитку.

Для автоматизації процесу НК необхідно вирішити дві головні проблеми: усунення суб'єктивної похибки, яку вносить оператор в процесі проведення контролю, та необхідність отримання поточної діагностичної інформації про дефекти, їх розміри, координати положення та інші. Отримані діагностичні дані дають змогу моніторити стан дефектів об'єкту контролю, будувати В- та С- скани контрольованих ділянок ОК, а також дозволяють проконтролювати проблемні ділянки ОК іншими методами НК, порівнявши які можна підвищити надійність результатів контролю.

Система координатної реєстрації може представляти собою як механічну так і безконтактну систему. Існують різні методи реєстрації координат, такі як механічні, електричні, магнітні, оптичні тощо. Вибір методу залежить від типу об'єкта контролю, форми перетворювача і необхідної точності реєстрації.

Безконтактне визначення координат може відбуватись на основі використання різних фізичних полів та за допомогою методів триангуляції, трилатерації або полігонометрії. Вибір метода залежить від необхідної точності та вибраного методу визначення відстаней або кутів. Отримані координати передаються як один з трьох аргументів сигналу $u(t, \bar{p}, \bar{r})$ (t – час, $\bar{p}$ – вектор контрольованих параметрів, $\bar{r}$ – вектор координат перетворювача), який надходить на вхід автоматизованої системи НК. На основі отриманого сигналу роблять висновок про результат контролю.

Використання систем вихрострумової дефектоскопії накладають обмеження на точність визначення положення первинного перетворювача. Абсолютна похибка визначення координат малоапертурних приймачів, до кола яких належать і перетворювачі вихрострумової дефектоскопії, повинна становити не більше 0.1 мм. Така вимога дає підстави розглядати ультразвукові методи реєстрації координат як перспективні для використання в засобах НК. Проте більшість ультразвукових методів орієнтовані на амплітудні методи опрацювання сигналів і дають змогу визначати координати з точністю в 1..2 мм.

Для досягнення меншої похибки необхідно використовувати спеціальні прецизійні методи визначення координат, які зберігають високу точність за низького відношення сигнал/шум.

Задачею дисертації є розробка безконтактного ультразвукового завадостійкого методу двокоординатної реєстрації просторового положення первинного перетворювача на поверхні виробу при проведенні вихрострумового неруйнівного контролю, а також проведення моделювання системи визначення координат, що реалізує запропонований метод.

РОЗДІЛ 1.АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Метою розділу є розкриття ролі та значення системи координатної реєстрації в засобах автоматичного НК, огляд існуючих методів реєстрації координат та розкриття сильних та слабких сторін розглянутих методів.

Тематика аналітичного огляду присвячена засобам та методам координатної реєстрації, які призначені для використання в автоматичних так і в автоматизованих приладах контролю.

1.1. Місце та значення підсистеми координатної реєстрації в засобах автоматизованого НК

В даний час автоматизовані системи неруйнівного контролю з використанням підсистеми координатної реєстрації застосовують як під час самого виробництва, тобто для одночасної перевірки та виготовлення виробу так і після виробництва для перевірки контрольованих ділянок на наявність дефектів. В таких засобах підсистема координатної реєстрації грає важливу роль, її задача отримати координати положення первинного перетворювача дефектоскопа для синхронізації їх з іншими засобами пошуку та виявлення дефектів.

Завдяки використанню підсистем координатної реєстрації в тандемі з засобом виявлення дефектів контрольованої ділянки з'являється можливість будування карт контролю, В- та С- сканів контрольованої ділянки, відслідковування динаміку дефектів, а також оцінювати загальний стан об'єкта контролю з більшою достовірністю та точністю.

Перевагами використання підсистем координатної реєстрації в порівнянні з використанням ручного методу є: висока швидкість визначення координат дефектів, висока точність, портативність, адаптивність, а також відсутність суб'єктивної похибки. Також отримані координати дефектів зберігаються в пам'ять пристрою, тому їх легко використовувати для наступних обчислень.

1.2. Фізичні принципи реалізації задач координатної реєстрації в засобах автоматизованого НК

Для визначення координат положення перетворювача відносно початку координат необхідно провести аналіз існуючих способів та методів координатної реєстрації розроблених різними авторами як зарубіжними та і вітчизняними.

Методи координатної реєстрації поділяють на інертні, механічні та безконтактні. Розглянемо декілька прикладів для кожного виду реалізацій систем координатної реєстрації.

1.2.1. Інерційні системи координатної реєстрації інформації

В роботі [1] проаналізовано використання систем інерційної навігації для задач визначення координат. Система складається з датчика лінійних прискорень 1, датчика напруженості магнітного поля 2 та датчика кутових швидкостей 3 (рис.1.1). Для реалізації системи був використаний метод безплатформенної інерційної навігації.

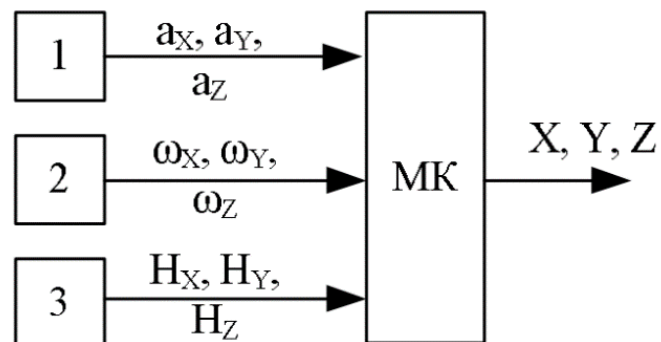


Рисунок 1.1 Структурна схема інерційної системи реєстрації координат перетворювача

Використання такої системи має ряд недоліків: наявність великої похибки вимірювання, що накопичується з часом, зумовленою складністю розрахунків, а саме використанням подвійного інтегрування для отримання значення координат. Накопичення похибки вимірювання може досягати ~ 0.5

м всього за 10 хвилин роботи. Використання системи з такою похибкою не допустиме в системах НК.

Перевагами такої системи є захист від спотворення сигналів ультразвукових та радіохвильових датчиків, а також відсутність впливу зовнішніх умов на результат вимірювання.

1.2.2. Механічні системи координатної реєстрації інформації

Одним з характерних прикладів механічних систем координатної реєстрації в неруйнівному контролі наведено в роботі [2]. Авторами був розроблений координатограф фірми «Panametrics», який був застосований при контролі товщини листів. Координатограф визначав положення датчика завдяки механічному методу координатної реєстрації. Для реалізації цього методу необхідно закріпити дві вимірювальні рулетки за допомогою магнітних присосів до листа металу. Магнітні присоси обладнанні реверсивними зчитувачами довжин стрічок. До кінців мірних стрічок рулеток приєднаний перетворювач дефектоскопу.

Для визначення координат використовують метод трилатерації, тобто за допомогою відомого значення бази (відстані між зчитувачами) та зчитаних значень довжин двох стрічок визначають координати перетворювача. При цьому початок координат співпадає з першим зчитувачем.

Точність виміру координат залежить від похибки виміру довжин стрічок та точності встановленні бази вимірювань. Гранична похибка виміру становить ± 17.4 мм.

Перевагами такого методу є простота алгоритму та реалізації методу. До недоліків можна віднести наявність суб'єктивної та контактної похибки, неможливість визначати тривимірні координати об'єктів, а також висока похибка вимірів, яка неприйнятна при використанні в системах НК.

Для збільшення точності механічного методу виміру координат первинного перетворювача дефектоскопу, авторами [3, 4] був запропонований

штанговий метод визначення полярних координат. Пристрій складається з рами, яка закріплюється за допомогою магнітних присосів до листа металу, в свою чергу рама містить в собі поворотний механізм з рухомою штангою. На кінці штанги приєднаний перетворювач. Штанга та поворотний механізм мають рівномірну шкалу проградуировану відповідно для вимірювання відстаней та кутів.

Оптичний зчитувач визначає кут повороту згідно шкали поворотного механізму, а вимірювач дозволяє визначити довжину вибігу штанги.

Завдяки отриманим значенням довжини та кута повороту визначають координати перетворювача. Точність виміру координат залежить від похибки визначення кута повороту, похибку можна зменшити при використанні ноніусного методу. Похибка виміру координат становить ± 10 мм та залежить від точності визначення кута повороту та довжини штанги.

Перевагою розглянутого методу є простота реалізації методу, а до недоліків можна віднести: необхідність точного визначення кута повороту та довжини штанги, висока похибка вимірювання координат, наявність суб'єктивної та контактної похибки, а також неможливість вимірювати координати об'єктів складної форми.

Для забезпечення можливості вимірювати координати об'єктів складної форми, авторами [4] була запропонована механічна система визначення координат перетворювача, яка дозволяє не тільки покращити точність виміру, а також проводити вимірювання тривимірних координат перетворювача (рис.1.2).

Система складається з чотирьох оптичних вимірювачів кутів, рами з поворотним механізмом, та трьох важелів АВ, ВС та CD. Кінець важеля CD з'єднаний з перетворювачем. Для визначення координат перетворювача необхідно визначити кути повороту: горизонтальний кут α , вертикальний кут β , кут між важелем ВС та нормаллю та кут між важелем CD та нормаллю. Довжина важеля CD в два рази більше ніж довжини важелів АВ та ВС, крім цього важелі АВ та ВС мають однакову довжину.

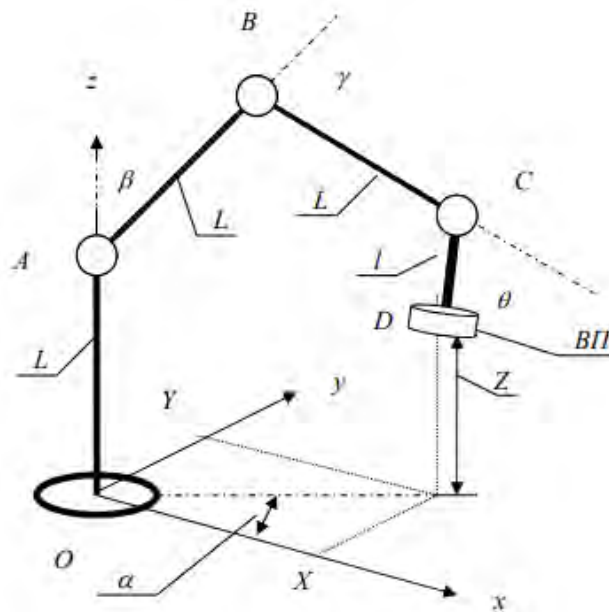


Рисунок 1.2. Система координатної реєстрації на основі кутових вимірювальних перетворювачів: О, А, В, С – вимірювачі кута повороту, D – перетворювач дефектоскопу.

Завдяки відомим значень кутів та довжин важелів розраховують три координати x , y та z .

Точність визначення координат розглянутого пристрою залежить від точності вимірювання кожного з кутів повороту. Похибка виміру становить ± 5 мм та залежить від точності визначення кутів повороту.

Отже, використовуючи дану систему можна отримати точність виміру в 5 мм, яка в порівнянні з попереднім методом менша в три рази, крім цього метод дозволяє вимірювати тривимірні координати. Недоліком методу є необхідність контакту з перетворювачем дефектоскопу та складність реалізації.

В роботі [5], авторами була наведена автоматизована механічна система позиціонування первинного перетворювача, яка має практичне застосування для контролю лопатей вітрогенераторів без необхідного попереднього демонтажу. Для контролю використовують ультразвуковий метод неруйнівного контролю, а система координатної реєстрації представляє собою алюмінієву раму, яка кріпиться до лопаті на вакуумних присосках у

вертикальному положенні. Перетворювач переміщується в межах цієї рамки по направляючим за допомогою крокових двигунів які і визначають координати перетворювача.

Перевагами наведеного методу є висока точність в порівнянні з іншими механічними методами, яка залежить від розміру кроку двигунів. До недоліків можна віднести наявність контактної способу визначення координат, який певним чином обмежує його використання.

1.2.3. Безконтактні системи координатної реєстрації інформації

Безконтактні методи координатної реєстрації мають широку область застосування завдяки відсутності необхідності в контакті між перетворювачами та початком координат. Такі системи можуть бути оптичними, ультразвуковими та електромагнітними. Системи можуть бути використані в різних сферах в залежності від особливості випромінювання, яке було використано.

В роботі [4] був запропонований безконтактний триангуляційний оптично-механічний метод визначення координат (рис.1.3). Система основана на використанні цього методу складається з двох обертальних синхронних екранів 1 та 2, двох джерел світла 3 та 4, фотоприймача 5 та фотоприймача 8 (розміщеного на первинному перетворювачі дефектоскопа), оптичних щілин 6, вимірювального перетворювача 7, ЦАП та мікроконтролера.

Два циліндричні екрани з вбудованими джерелами світла сформують два плоских промені світла, які завдяки синхронному та зустрічному обертанню екранів сканують поверхню об'єкту контролю. Скануючи простір промені світла приймаються двома фотоперетворювачами: один стаціонарний, а інший розміщений на перетворювачі дефектоскопа. Імпульси напруги на виході стаціонарного фотоперетворювача з'являються завдяки почерговому освітленні їх світлом джерел 3 та 4.

На основі отриманих імпульсів визначають часові затримку та кути α та

β. Отримані параметри перетворюються в цифровий код та подаються в мікроконтролер.

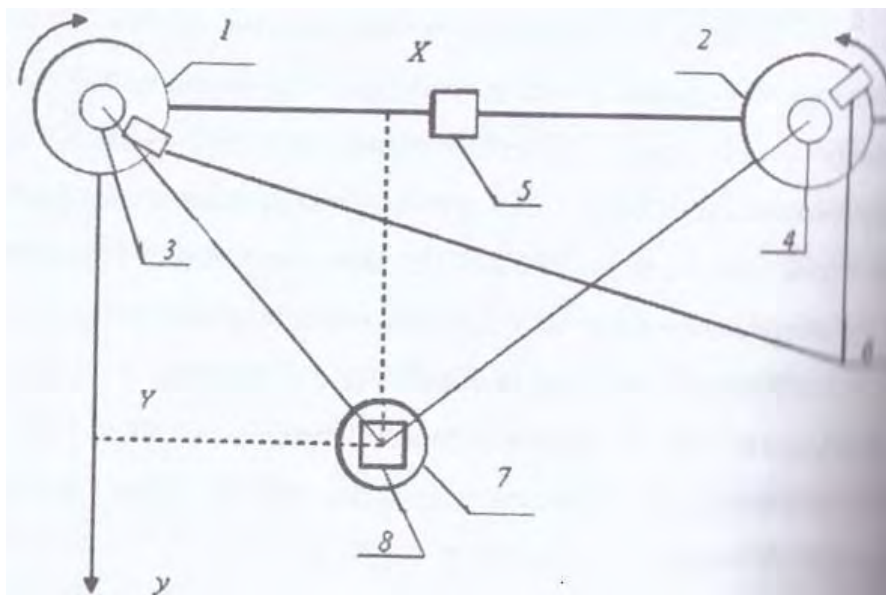


Рисунок 1.3. Схема визначення координат перетворювача оптично-механічним методом

Згідно отриманих значень часових затримок, кутів α та β мікроконтролер визначає координати положення датчиків. Точність визначення координат дорівнює ± 5 мм та залежить від точності визначення кутів α та β .

Перевагами методу є висока точність, безконтактність. Недоліками наявність відблисків, яких можна уникнути при зміні джерел світла на інфрачервоні, неможливість визначення тривимірних координат та наявність обертальних частин.

Для збільшення точності визначення координат перетворювача, авторами [6] був розроблений безконтактний триангуляційний оптичний метод визначення координат перетворювача. Система складається з двох поворотних дзеркал, двох джерел світла, один з яких встановлений на перетворювачі дефектоскопа, а інший між двома дзеркалами, та двох фотоприймачів (рис.1.4). При обертанні кожного з дзеркал відбувається сканування простору поверхні об'єкту контролю в секторі приблизно рівному 90° . Кожен промінь формує два імпульси напруги при освітленні кожного з двох фотодіодів 3, 4 або 5 встановленого на перетворювачі.

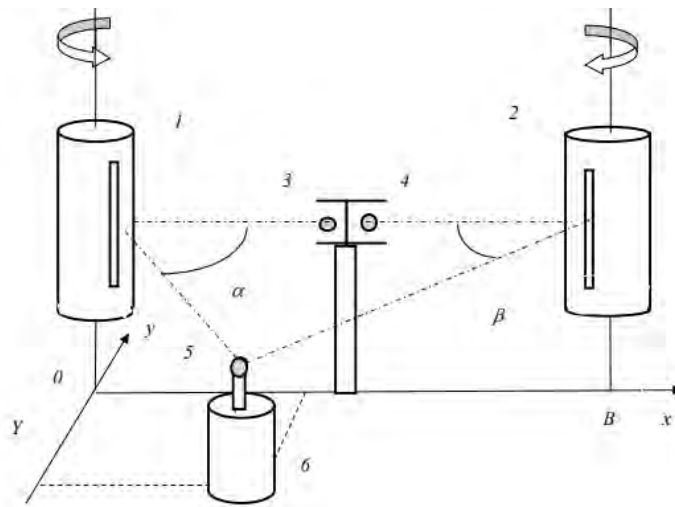


Рисунок 1.4. Схема оптичного пристрою визначення координат перетворювача

В результаті визначаються кутові відстані α та β для лівого та правого дзеркала відповідно. Згідно значень кутових відстаней та тангесних функцій визначаються координати перетворювача x та y . Через наявність тангесних функцій величина кутів α та β повинні бути менші за 90° . Гранична похибка визначення координат становить ± 2 мм та залежить від точності виміру значень кутів α та β .

Отже, запропонований метод не тільки дозволяє збільшити точність виміру, крім цього завдяки використанню безконтактного методу відсутній вплив похибки тертя на результат виміру.

Недоліком системи є складність обчислень, неможливість визначення тривимірних координат та наявність обертальних частин.

Для визначення тривимірних координат (x, y, z) первинного перетворювача дефектоскопу, авторами [7] була запропонована схема оптичної системи координатної реєстрації (рис.1.5), яка у послідовному визначенні координат двох точкових джерел світла, які розташовані на відомій відстані один від одного та від перетворювача дефектоскопу. Оптична система має три дзеркала, що синхронно обертаються. Два поворотних дзеркала розташовані на відомій відстані один від одного, а третій піднятий на висоту більшу за максимальне можливе значення координати Z точкових джерел

світла, розташованих на перетворювачі дефектоскопа. Третє дзеркало обертається синхронно з попередніми та визначає кут χ точкового джерела відносно площини Oyz . Згідно значень визначених кутів α , β та χ проводять розрахунок координат x , y та z . Точність визначення координат дорівнює ± 2 мм та залежить від точності виміру значень кутів α , β та χ .

Перевагами є можливість визначення просторових координат перетворювача, а недоліком є неможливість визначення координат більш як одного перетворювача, низька завадостійкість та наявність обертальних частин.

Для забезпечення високої завадостійкості оптичної системи координатної реєстрації, авторами [4, 7] була розроблена модернізована схема (рис.1.5).

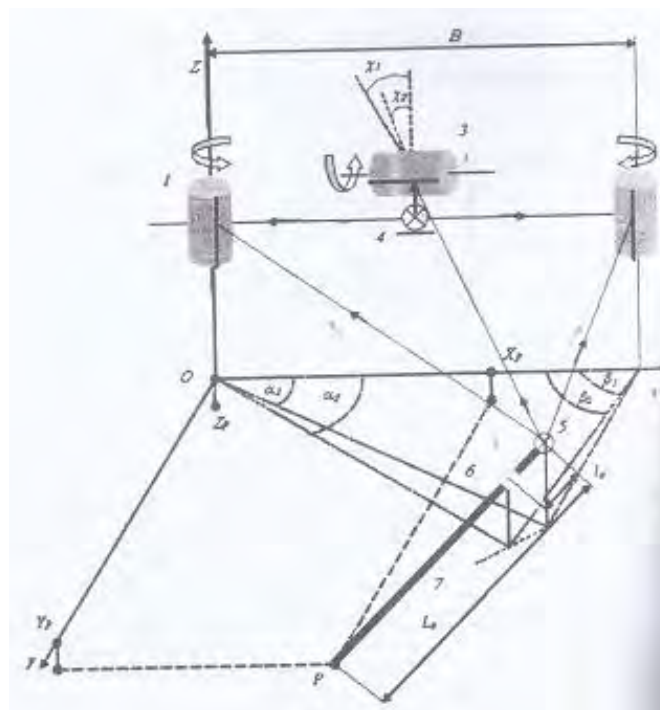


Рисунок 1.5. Схема визначення просторових координат перетворювача оптичним методом: 1,2,3 – обертові циліндри з щілинами; 5, 6 – точкові джерела світла; 7 – вимірювальний перетворювач

На відміну від попередньої схеми замість дзеркал використовується циліндричні обертові екрани з щілинами всередині яких дзеркала та світловоди виконують передачу світла до нерухомих фотоперетворювачів, які

розміщуються в торцях обертових циліндрів. Частота обертання екранів більша ніж дзеркал та дорівнює приблизно 10-20 Гц при швидкості сканування 20 мм/с. Приймальні кути світлових джерел фотоприймачами відповідають кутових напрямкам положення щілин екранів. Ці напрями пропорційні часовим запізненням імпульсів сформованих опорним джерелом світла та джерел А або С. Значення відстаней між точковими джерелами знаходять завдяки раніше визначених кутів α , β та χ . А координати перетворювача за визначеними відстанями між токовими джерелами світла та вимірювальним перетворювачем. Похибка виміру координат становить ± 2 мм та залежить від точності виміру значень кутів α , β та χ .

Перевагами використання є невелика похибка виміру, завадостійкість та можливість визначення просторових координат. Недоліком є наявність обертання асиметричних елементів, що зменшує надійність системи.

В роботі [4, 6, 8] авторами представлена ультразвукова безконтактна система координатної реєстрації положення первинного перетворювача. Координати розраховуються на основі методу трилатерації (рис.1.6).

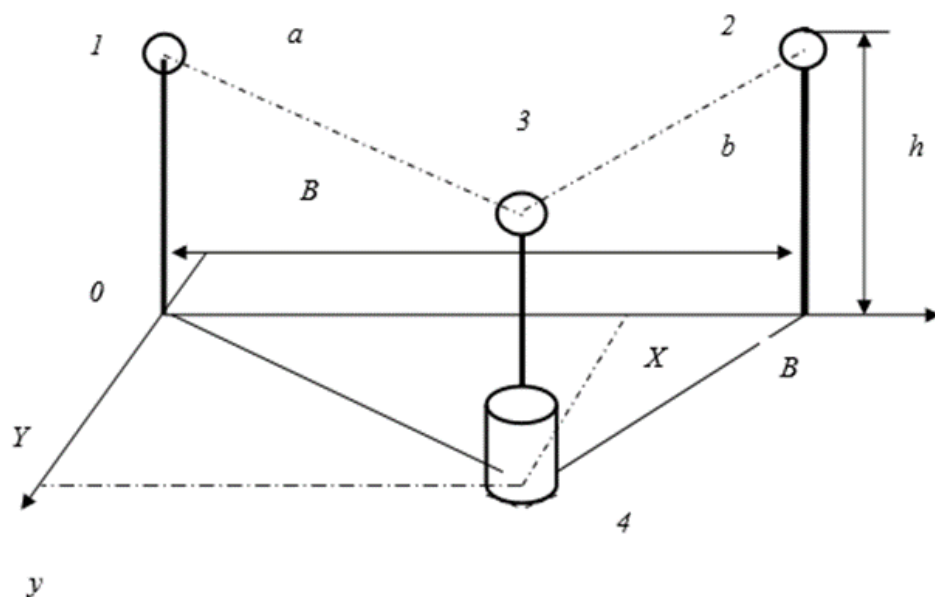


Рисунок 1.6. Схема ультразвукової системи визначення координат положення перетворювача: 1,2 – ультразвукові приймачі, 3 – ультразвуковий випромінювач.

В цій системі перетворювач НК суміщений з ультразвуковим ненаправленим збудником ультразвукових коливань, що поширюються в навколишньому середовищі до двох ультразвукових перетворювачів, які знаходяться на відомій відстані один від одного.

Часова затримка ультразвукових коливань вимірюється амплітудним методом за обвідними сигналу. За високого відношення сигнал/шум такий спосіб дає можливість отримати похибку позиціонування датчику порядку 1...2 см. Завдяки малій похибці такий метод можна використовувати в системах неруйнівного контролю, але сфера його застосування обмежена так як така похибка завелика при використанні малоапертурних ультразвукових сенсорів [9] або вихрострумів перетворювачів [10].

Наступна реалізація дозволяє визначати тривимірні координати датчика НК за допомогою ультразвукового методу, авторами [11] була розроблена ультразвукова система (рис.1.7).

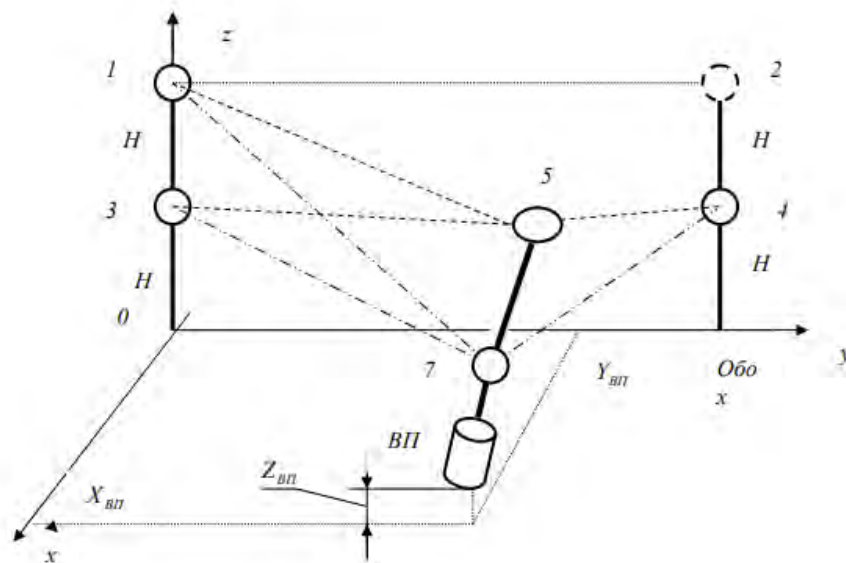


Рисунок 1.7. Схема ультразвукової системи визначення просторових координат положення перетворювача.

Ультразвукові коливання перетворювачів приймаються трьома ультразвуковими перетворювачами розміщеними на кінцях бази вимірювання довжиною В. Приймальні перетворювачі розміщені на відстані Н один від

одного. Сигнали від кожного випромінювача приймаються ультразвуковими приймачами. Далі визначається часова затримка між моментом отримання сигналу приймачем та моментом початку випромінювання ультразвукового випромінювача.

Визначаються відповідні відстані через часову затримку та швидкість звуку. Завдяки отриманим значень відстаней визначають координати двох ультразвукових випромінювачів. Так як координати випромінювачів не є координатами вимірювального перетворювача дефектоскопу, тому необхідно виходячи з рівняння прямої, та відомих двох точок визначити третю координату, що відповідає координаті вимірювального перетворювача. Точність виміру координат дорівнює ± 1 мм та залежить від точності виміру часової затримки.

До переваг можна віднести: можливість визначення просторових координат, велику точність виміру, безконтактність та швидкодію. До недоліків низьку завадостійкість до температури та вітру, яку можна підвищити при проведенні калібрування швидкості звуку перед кожним виміром.

Методи координатної реєстрації в яких похибка виміру координат становить не більше ± 1 мм застосовуються в вихрострумовій дефектоскопії, наприклад в автоматизованій вихрострумовій системі експрес-моніторингу об'єктів контролю [12] або в роботизованих системах вихрострумового неруйнівного контролю виробів зі складною геометрією [13], за умови можливості вимірювання тривимірних координат.

1.3. Теоретичний базис безконтактного методу двокоординатної реєстрації інформації

Для визначення координат перетворювача необхідно: по-перше вибрати метод визначення координат, це може бути метод трилатерації, тріангуляції або полігонометрії, а по-друге вибрати метод визначення відстаней та кутів,

наприклад фазовий метод.

1.3.1. Метод трилатерації

Метод трилатерації полягає у визначенні координат точки за трьома сторонами трикутника (рис.1.8).

За умови, що сторони a, b, c трикутника ABC відомі, а база – сторона BC відома з високою точністю та пов'язана з декартовою системою координат xOy . Тоді використовуючи теорему Піфагора можна визначити координати точки $A(x_A, y_A)$, в межах області, заданою квадратом BCDE. Точка $A(x_A, y_A)$ визначає координати положення датчика НК на контрольованій ділянці ОК. Сторони AB та AC підлягають вимірюванню одним з відомих способів [14].

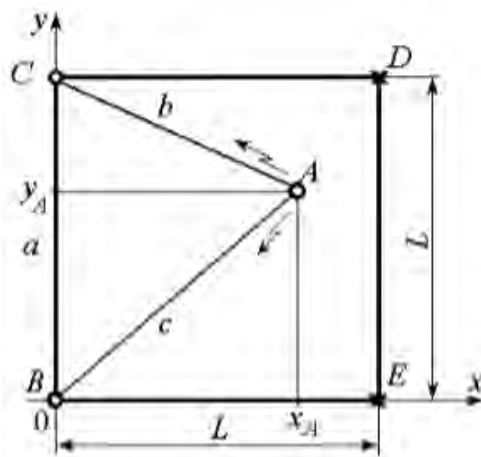


Рисунок 1.8. Геометрична модель визначення координат датчика за методом трилатерації

Для розрахунку координат за теоремою Піфагора використовують наступні формули:

$$x_A = \sqrt{c^2 - \left(\frac{c^2 + a^2 - b^2}{2a} \right)^2}; \quad y_A = \frac{c^2 + a^2 - b^2}{2a}. \quad (1.1)$$

Перевагами методу трилатерації є висока точність та надійність визначення координат, простота формул, можливість роботи за будь-яких умов освітленості і видимості, незалежність від орієнтації приладу.

Недоліками є низька точність у порівнянні з методами триангуляції та

полігонометрії у випадку визначення відстаней амплітудними методом.

1.3.2. Багаточастотний фазовий метод визначення відстаней

Так як для знаходження координат перетворювачів необхідно визначати відстані або кути, тому необхідно використовувати метод який дозволить визначати ці лінійні величини з високою точністю.

Фазові вимірювачі відстані забезпечують високу точність вимірювань, перетворення, а також передачі інформації. Це зумовлено завдяки високій чутливості, надійності, завадозахищеності, а також прецизійності. Область застосування дуже широка: їх використовують в енергетичній, електротехнічній, радіотехнічній, оптичних та інших галузях. За допомогою вимірювання кумулятивних фазових зсувів сигналів можна визначити значення фазового зсуву, що значно перевищують величину 2π , на основі чого можна визначити часову затримку, відстань або переміщення об'єкта у просторі з високою точністю.

Фазовий багаточастотний метод вимірювання відстаней полягає у наступному. Випромінювач ультразвукових коливань синусної форми в передавально-приймальному блоці (рис. 1.9) формує ультразвукові коливання, які поширюються в сторону відбивача, розташованого на відстані D від випромінювача-приймача. Відбивач віддзеркалює випромінювання у зворотному напрямі – до приймача ультразвукових коливань, розташованому у передавально-приймальному блоці. Моделі прийнятого і випроміненого коливань на i -тій робочій частоті за відстані D між ними представляються формулами [15]:

$$\begin{aligned} u_{i,1}(t, D) &= U_{i,1} \cos(2\pi f_i t - 4\pi D/\lambda_i), \quad t \in T_B, \quad i = \overline{1, k}, \\ u_{i,2}(t) &= U_{i,2} \cos(2\pi f_i t), \quad t \in T_B, \quad i = \overline{1, k}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де, $U_{i,1}$, $U_{i,2}$ – амплітуди сигналів на i -тій частоті, f_i – значення i -тої частоти, t – поточний час, T_B – час випромінювання сигналів, λ_i – довжина хвилі i -тої частоти, k – кількість робочих частот.

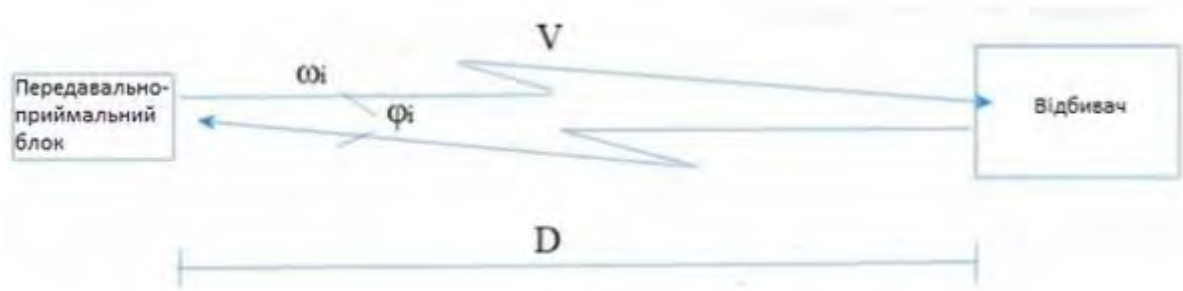


Рисунок 1.9. Ідея фазового методу вимірювання відстаней

Значення часу випромінювання сигналів T_e вибирають незначним з метою мінімізації впливу на результат ймовірних відбиттів ультразвукових коливань від сторонніх предметів в околі зони контролю, які можуть впливати на сигнал, в результаті чого він спотворюється, який розповсюджується між випромінювачем та приймачем вздовж прямої.

Параметр T_e розраховується за формулою:

$$T_e = \frac{k}{f}, \quad (1.3)$$

де, k – кількість періодів ультразвукових коливань, f – частота ультразвукового сигналу.

Наприклад, якщо сигнал $u_{i,1}(t, D)$ містить 10 періодів ультразвукових коливань частотою 40 кГц, то значення $T_e = 0.25$ мс. Завдяки чому з'являється можливість уникнути відблисків сигналів від інших об'єктів, для яких довжина хвилі в акустичному каналі в повітряному середовищі збільшується на величину 8.25 см, за умови, що швидкість ультразвукових хвиль у повітрі дорівнює 330 м/с.

При визначенні відстані в задачах далекометрії приймають, що випромінений акустичний (чи іншої фізичної природи) сигнал розповсюджується вздовж відстані D в обох напрямках. Передавально-приймальний пристрій випромінює та приймає віддзеркалений сигнал від відбивача. Цей сигнал поширюється у просторі зі швидкістю V при круговій частоті ω . В результаті віддзеркалення сигналу від відбивача з'являється зсув фази між початковим та віддзеркаленим коливаннями.

Відстань D розраховується за формулою:

$$D = \frac{V \cdot \Phi}{2 \cdot \omega}, \quad (1.4)$$

де, V – швидкість розповсюдження акустичної чи іншої хвилі, Φ – кумулятивний (повний) фазовий зсув, $\Phi = 2\pi(N + \Delta N) > 2\pi$, ω – кругова частота.

Поняття кумулятивного фазового зсуву сигналів виникає за необхідності вимірювання фазового зсуву за межами діапазону $\varphi \in [0, 2\pi)$. При цьому виникає неоднозначність виміру фази сигналу – для визначення фазового зсуву необхідно визначити ціле число напівхвиль укладених на відстані тим самим усунути невизначеність результатів виміру фазового зсуву [16].

Перевагами фазового методу є висока точність визначення як відстаней так і фазового зсуву. Основним недоліком є ускладнення алгоритмів визначення кумулятивних фазових зсувів $\Phi > 2\pi$.

Швидкість поширення ультразвукових коливань у повітряному середовищі залежить від метеопараметрів, тому має місце проведення калібрування швидкості поширення акустичного сигналу перед вимірюванням відстані до об'єкта для підвищення достовірності та точності отриманої відстані, приклад такого калібрування буде наведений в 3 розділі.

1.3.3. Аналіз методів розв'язання задачі неоднозначності фазових вимірів

Для використання фазового методу в широкому діапазоні зміни відстаней необхідно виключити вплив на результат виміру неоднозначності фази. Для цього в роботі [17], авторами був використаний метод кратних масштабних частот для усунення неоднозначності фази в задачах вимірювання відстані до об'єктів.

В цьому випадку використовують кратні значення частот. Кількість таких частот залежить від дальності дії далекоміра та від значення найвищої

масштабної частоти.

Генератор фазового далекоміра генерує декілька фіксованих масштабних частот. Розв'язання неоднозначності фазових вимірів починають із найнижчої частоти та закінчують найвищою, яка називається основною частотою. Значення частот вибирають відносно коефіцієнта багатозначності k : перша частота - найбільша, а кожна наступна менша в k разів від попередньої, тобто друга частота менша за першу в k разів, а третя в k разів менша другою і так далі. Для забезпечення кращого результату коефіцієнт k приймають рівним 10. При цьому вимірювальна відстань D повинна бути менше довжини хвилі при максимальній частоті.

Для вирішення проблеми неоднозначності виміру відстані значення вимірної відстані приймають рівною D' з похибкою $\delta D'$. Значення похибки повинно становити не більше 0.25λ . При вимірюванні відстані на найнижчій частоті отримують значення похибки значення якої менше похибки $\delta D'$ прийнятою при вимірі відстані D' . Отримане значення відстані на найнижчій частоті приймають початковим наближенням при вирішенні неоднозначності фазових вимірів на наступній, більшій, частоті. Після вирішення неоднозначності вимірів відстані на кожній частоті вважається, що проблема неоднозначності вирішена.[17]

Перевагою такої системи є простота теорії та формул, висока точність виміру відстані та часової затримки, але головним недоліком є складна реалізація на практиці, через необхідність використовувати масштабні частоти, що належать до різних частотних діапазонів.

Для забезпечення можливості реалізації на практиці, авторами [18] був запропонований метод комбінаційних масштабних частот для вирішення неоднозначності фази в задачах вимірювання відстані до об'єктів. Метод комбінаційних частот, оснований на послідовному зменшенні різниці першої та наступних частот в ціле число разів.

У цьому методі співвідношення між другою частотою f_2 та першою частотою f_1 визначається формулою:

$$f_2 - f_1 = \frac{f_1}{k} \quad (1.5)$$

Частоти f_1 та f_2 в k разів менше, ніж перша головна масштабна частота f_1 . Зазвичай, $k=10$. Різниця між третьою та першою частотами дорівнює f_1 / k і так далі [18].

Якщо сформувати різницю відліків ΔN , на першій і на другій частоті, то результат дорівнюватиме відліку, який був би отриманий на різницевої частоті. І значення цієї різницевої частоти у k разів менше значення першої основної масштабної частоти. Використання третьої частоти ще k разів знижує вимоги до точності наближеного значення вимірюваної відстані і так далі.

За умови наявності 5 частот, при обробці вимірювань відлік N_1 , отриманий на частоті f_1 , віднімають з відліками N_2, N_3, N_4, N_5 , отриманих на інших частотах: f_2, f_3, f_4 і f_5 .

На першому етапі вирішення багатозначності використовують різницю $\Delta N_5 - \Delta N_1$, оскільки частота f_5 найбільш близька до частоти f_1 і, отже, довжина синтезованої хвилі $\lambda_{1,5}$ є найбільшою в порівнянні з довжинами синтезованих хвиль на всіх інших синтезованих частотах. Далі для вирішення багатозначності формують різниці $N_4 - N_1, N_3 - N_1, N_2 - N_1$. Якщо отримані різниці дорівнюють нулю то проблема багатозначності вирішена. [17, 18]

Перевагою цього методу в порівнянні з попереднім є можливість практичної реалізації у вузькому діапазоні частот, крім цього метод забезпечує високу точність визначення як відстані так і часової затримки, але певним недоліком є складність розрахунків.

Авторами [19] був запропонований метод плавної зміни частоти масштабних коливань для визначення дальності до об'єкта на основі фазового методу. Визначення числа N називається вирішення неоднозначності (або багатозначності) в різних типах фазових далекомірів проблема багатозначності вирішується по-різному. Метод плавної зміни частоти масштабних коливань оснований на плавній зміні частоти масштабних коливань, яка дозволить визначити частоту, за якої $\Delta N=0$.

$$D = \frac{V}{2f} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right) = \frac{\lambda}{2} (N + \Delta N). \quad (1.6)$$

Це означає, що в вимірюваній відстані вкладається ціла кількість напівхвиль масштабних коливань. Масштабну частоту можна плавно змінювати в межах деякого діапазону. У межах частотного діапазону можлива наявність декількох частот, за яких $\Delta N=0$. Чим більша відстань, тим більше таких частот укладається у частотному діапазоні [19].

Спочатку вибираються дві частоти f_1 та f_{n+1} на початку та в кінці частотного діапазону відповідно. Відповідне число напівхвиль, що укладаються на відстані при частотах та, позначимо N_1 і N_{n+1} при частотах f_1 та f_{n+1} відповідно. У процесі плавної зміни масштабної частоти від f_1 до f_{n+1} вважають, що кількість напівхвиль N між N_1 і N_{n+1} є цілим числом. На основі отриманих значень кількості напівхвиль, довжини та визначених масштабних частот проводиться перевірка відсутності неоднозначності фазових вимірів.

Для контролю вибираються чотири частоти по дві з кожного краю частотного діапазону. Вибирають дві частоти f_1 та f_2 на початку діапазону та дві частоти f_n та f_{n+1} наприкінці діапазону. Далі згідно визначених частот вираховують кількість напівхвиль N при кожній частоті.

В результаті одержують чотири системи рівнянь. З яких обчислюють чотири значення N_1 , N_2 , N_n та N_{n+1} . Кожне з цих значень округляють до цілого найближчого числа. Якщо в результаті округлення значення $N_1 \dots N_{n+1}$ дає єдине значення N , це означає, що проблема багатозначності (неоднозначності) вирішена [17, 18, 19].

Перевагами методу є висока точність виміру як відстані, так і часової затримки, простіший алгоритм розрахунку, можливість роботи за меншого відношення залишати пне залежить від амплітуди сигналу, яка може бути зашумленою або зміненою, зменшує шум і покращує співвідношення сигнал/шум, має високу ефективність передачі.

Недоліком є необхідність наявності складного обладнання для генерації та прийому сигналу.

1.3.4. Застосування числової системи залишкових класів для розв'язання задачі неоднозначності фазових вимірів

Основними обмеженнями на використання відомих способів усунення багатозначності фазових вимірювань в задачах координатної реєстрації інформації в системах автоматизованого НК є низька завадостійкість та неможливість контролю коректності розв'язання задачі багатозначності результатів фазових вимірювань. Перспективним шляхом подолання цих обмежень є використання у фазових далекомірах числової системи залишкових класів (ЧСЗК).

Сутність ЧСЗК полягає в тому, що для подання результату вимірювання кумулятивних фазових зсувів використовують цілі числа A , які представляються в ЧСЗК множиною невід'ємних лишків $(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$ від ділення чисел на раніше визначені модулі системи $(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$. Значення модулів представляють собою групу взаємно простих чисел, множину і значення яких вибирають згідно максимального значення вимірювальної відстані та необхідної точності виміру. Можливість застосування ЧСЗК ґрунтується на тому факті, що і лишки чисел $a_i \equiv A \pmod{m_i}$, і доступний вимірюванню фазовий зсув сигналів $\varphi_i \equiv \Phi_i \pmod{2\pi}$ отримують в результаті застосування операції отримання лишку за певним модулем [20].

Розв'язок задачі неоднозначності полягає у відновленні в позиційній системі числення цілого числа представленого у ЧСЗК. Для отримання цього числа необхідно, щоб вибрані модулі були взаємно простими числами та максимальна вимірювальна відстань не перевищувала добуток модулів.

Найбільш суттєвими властивостями ЧСЗК є [20]:

1. Відсутність зв'язків між суміжними розрядами в представленні чисел в ЧСЗК.
2. Можливість організації ефективної системи виявлення та виправлення похибок при передачі та арифметичній обробці числових даних.

Для реалізації ефективної системи виявлення похибок ЧСЗК система

модулів доповнюється ще одним або декількома модулями (що у фазовому далекомірі забезпечується введенням додаткових частот та здійсненням відповідних фазових вимірювань) тим самим можна організувати контроль правильності усунення багатозначності фазових вимірювань, що актуально за умови низьких рівнів сигналу (за умови $c/\text{ш} \leq 1$).

При додаванні додаткового модуля $m_{n+1} > m_n$ в результаті нова ЧСЗК має повний діапазон $[0, G_n)$, де $G_n = \prod_{i=1}^{n+1} m_i$. Якщо відбувається груба помилка, тобто спотворюється значення лишків $g_1 \dots g_{n+1}$, відновлене ціле число A виходить за межі робочого діапазону $[0, M)$ в заборонений діапазон $[M, M \cdot m_{n+1})$, а вхід в заборонену зону є індикатором грубої помилки [21, 24].

На рисунку 1.10 зображений процес переходу в заборонений діапазон $[M, G_n)$ неправильно визначеного числа в результаті некоректного розрахунку (спотворення) лишку g_i та повернення числа в робочий діапазон після виправлення лишку [21].



Рисунок 1.10. Графік переходу відновлювального числа в заборонений інтервал, з наступним поверненням в робочий діапазон

Таким способом можна виявити не тільки однократні, але багатократні помилки при розрахунку відновлювального цілого числа A .

Завдяки вказаним властивостям, а також властивості циклічності ЧСЗК та фазових зсувів сигналів, система залишкових класів дає змогу передавати, представляти та відновлювати передану інформації в тому числі і кумулятивні фазові зсуви сигналів у фазовому методі виміру відстаней.

Треба відзначити, що ЧСЗК використовується не тільки в задачах далекометрії, а також для побудови відмовостійких швидкодіючих засобів обчислень, опрацювання інтерферограм з визначенням повної фази, яка відповідає різниці ходу променів у плечах інтерферометра, шифрування та передачі інформації по спеціальних каналах зв'язку, розрахунку кутів, тощо.[20, 21].

1.4. Постановка задачі дослідження

Необхідно визначити двовимірні декартові координати датчика ВСНК на контрольованій плоскій ділянці ОК розміром $L \times L$ з похибкою, що не перевищує 1 мм. Визначення координат відбувається за методом трилатерації. Вимірювання відстаней виконується через визначення затримок ультразвукових коливань частотою не менше 25 кГц, що поширюються від випромінювача до приймачів. Останні збуджуються у повітряному просторі перетворювачем, встановленим на корпусі датчика НК і сприймаються двома приймачами, розташування яких на ОК задає декартову систему координат.

Затримка коливань визначається багаточастотним фазовим методом з усуненням багатозначності фазових даних на основі ЧСЗК. Необхідно виконати моделювання процесу визначення координат положення перетворювачів без шумової складової та за адитивної шумової складової, визначити відношення сигнал/шум, за якого зберігається працездатність системи та оцінити розміри мертвих зон та похибок визначення координат датчика та фазового зсуву в межах контрольованої ділянки ОК.

Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні безконтактного ультразвукового завадостійкого методу двокоординатної реєстрації просторового положення первинного перетворювача на поверхні виробу при проведенні вихрострумового неруйнівного контролю.

Висновки до першого розділу

Проведене у першому розділі дослідження дає змогу зробити наступні висновки.

1. При проведенні порівняльного аналізу існуючих методів та засобів координатної реєстрації положення датчиків НК, зважаючи на переваги і недоліки кожного з них та орієнтуючись на забезпечення необхідної точності визначення координат, було встановлено, що завдяки високій швидкодії, простоті практичного застосування, а також заданій похибці вимірювання координат ± 1 мм обґрунтований для реалізації ультразвуковий багаточастотний фазовий метод координатної реєстрації.

2. Детально розглянутий багаточастотний фазовий метод визначення відстаней, який полягає у визначенні фазового зсуву між випроміненим та прийнятим віддзеркаленим сигналом від відбивача, з наступним обчисленням відстані за величиною фазового зсуву та швидкістю поширення акустичного сигналу. Але цей метод потребує визначення фазових зсувів сигналів $\Phi > 2\pi$.

3. Проведено аналіз існуючих способів вирішення задачі неоднозначності фазових вимірів за критеріями: простота реалізації, швидкодія та завадостійкість. За результатами аналізу перспективним шляхом подолання неоднозначності фазових вимірів є використання у фазових систем реєстрації координат числової системи залишкових класів (ЧСЗК).

4. За результатами загального аналізу ЧСЗК було визначено основні обмеження, властивості, область застосування, а також визначена головна особливість – можливість контролю та корекції результатів вимірів під час визначення координат.

5. Визначені мета дисертаційної роботи, об'єкт та предмет дослідження і завдання дослідження.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СПОСОБУ УСУНЕННЯ БАГАТОЗНАЧНОСТІ ФАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ НА ОСНОВІ ЧИСЛОВОЇ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

2.1. Визначення відстані багаточастотним фазовим методом з використанням ЧСЗК

Багаточастотний фазовий метод дає змогу визначати відстань з високою точністю при цьому завдяки прецизійності та завадостійкості він може бути використаний як ефективний метод захисту результату виміру від шумів.

Для визначення відстані між приймачем та випромінювачем, за умови одностороннього випромінювання, необхідно виміряти фазовий зсув φ_i між прийнятим та випроміненим сигналом на кожній i -тій частоті. При вимірюванні відстані в широкому динамічному діапазоні, в результаті виходу значень фазових зсувів за інтервал їх однозначного визначення $[0, 2\pi)$, з'являється необхідність розв'язання задачі багатозначності результатів фазових вимірів.

Для визначення координат положення первинного перетворювача в автоматизованих системах НК використовують багаточастотний фазовий метод, який реалізується наступним чином. Первинний перетворювач дефектоскопа конструктивно суміщений з ультразвуковим ненаправленим випромінювачем системи координатної реєстрації (його положенню відповідає т.А на рис.2.1). Випромінювач формує ультразвукові коливання, які сприймаються двома приймачами (їхньому положенню відповідають т.В та т.С) рознесеними на відстань бази a довжиною L . Прийнятим та випроміненим коливанням на i -тій робочій частоті відповідає загальна модель сигналів (1.2). За отриманими сигналами, використовуючи метод трилатерації, визначаються координати датчика НК – x_A та y_A [21].

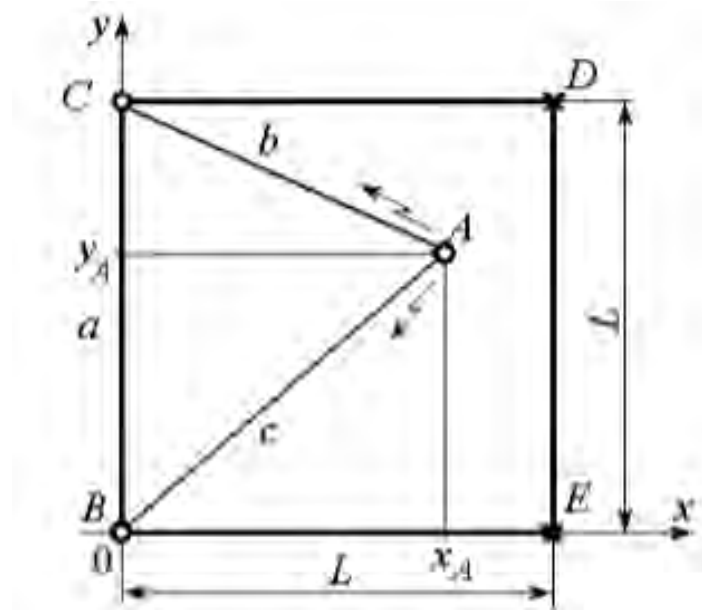


Рисунок 2.1. Геометрична модель визначення координат датчика НК методом трилатерації

Так як загальна модель сигналів (1.2) представлена в аналоговій формі та враховує відбиття випроміненого сигналу від об'єкту, а оброблення сигналів в реальних системах координатної реєстрації інформації орієнтовано на використання дискретних сигналів, представимо модель аналізованих сигналів наступними дискретними послідовностями [21]:

$$u_{i,1}[j, D] = U_{i,1} \cos \left(2\pi f_i j T_d - \frac{2\pi D}{\lambda_i} \right), t \in T_b, D = \{b, c\}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, J}, \quad (2.1)$$

$$u_{i,2}[j] = U_{i,2} \cos(2\pi f_i j T_d), t \in T_b, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, J},$$

де, T_d – період дискретизації сигналів $T_d \ll f_i^{-1}$.

Застосування до послідовностей (2.1) дискретного перетворення Гільберта [22, 23], дає змогу визначити різницю дискретних фаз сигналів на кожній робочій частоті в межах інтервалу $[0, 2\pi]$ за формулою:

$$\varphi_i^b[j] = \Phi_i^b[j] \pmod{2\pi} = 2\pi \frac{b}{\lambda_i} \pmod{2\pi}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, J}, \quad (2.2)$$

$$\varphi_i^c[j] = \Phi_i^c[j] \pmod{2\pi} = 2\pi \frac{c}{\lambda_i} \pmod{2\pi}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, J},$$

де, $\Phi_i^b[j]$, $\Phi_i^c[j]$ – повні (кумулятивні) фазові зсуви сигналів, значення яких

значно більше за 2π , які отримані при поширенні сигналів вздовж дистанцій b_i та c_i на i -тій робочій частоті.

За умови однозначного визначення $\Phi_i^b[j], \Phi_i^c[j]$ відстань випромінювача по каналах b_i та c_i за використання багаточастотного фазового методу обчислюється за формулою:

$$b_i = \frac{V \cdot \Phi_i^b}{\omega_i}, \quad c_i = \frac{V \cdot \Phi_i^c}{\omega_i}. \quad (2.3)$$

Для розв'язання задачі багатозначності виміру фазового зсуву необхідно визначити ціле число напівхвиль укладених на пройденій відстані. Для цього доцільно використовувати числову систему залишкових класів (ЧСЗК), яка полягає в представленні допустимих вимірюванню фазових зсувів виду $\varphi_i = \Phi_i[j](\bmod 2\pi)$, не менш ніж на 2 частотах, множиною невід'ємних лишків $(g_1 \dots g_i \dots g_n)$. У цьому випадку розв'язок неоднозначності фазових вимірів зводиться до задачі відновлення в позиційній системі числення цілого числа представленого у ЧСЗК [24].

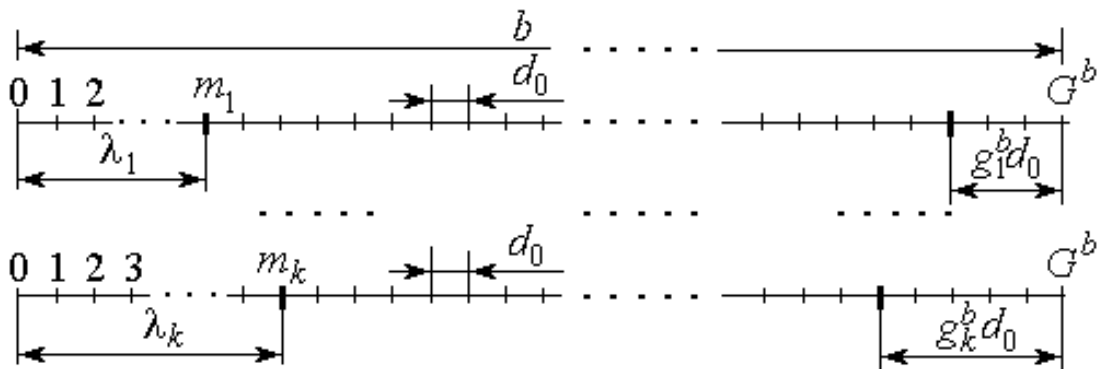


Рисунок 2.2. Графічна ілюстрація отримання лишків ЧСЗК для фазового методу вимірювання відстані

Можливість відновлення в позиційній системі числення цілого числа за використання ЧСЗК ґрунтується на властивості циклічності, що притаманна як представленню послідовності цілих чисел в ЧСЗК так і фазовим зсувам сигналів. На рис.2.2 зображена графічна ілюстрація ідеї використання ЧСЗК у багаточастотних фазових вимірюваннях.

Відстань b розраховується, з точністю до дискрету вимірювання відстані d_0 , за лишками g_i^b обчисленими за вимірними фазовими зсувами сигналів на n частотах, за формулою:

$$b = d_0 \cdot G^b. \quad (2.4)$$

де, d_0 – дискрет визначення відстані, який задається за умовою досягнення необхідної точності вимірювання, $G^b = (g_1^b, g_2^b, \dots, g_k^b)$ – числовий результат вимірювання відстані b згідно лишків ЧСЗК.

Для представлення G^b в ЧСЗК достатньо задати наступні параметри сигналів та режиму їх опрацювання [20, 24]:

1. Довжини ультразвукових хвиль λ_i для кожної робочої i -тої частоти за формулою:

$$\lambda_i = m_i \cdot d_0, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2.5)$$

де, k – кількість частот.

2. Сітку робочих частот f_i та циклічних частот ω_i :

$$f_i = \frac{V}{m_i d_0}, \quad i = \overline{1, k}; \quad (2.6)$$

$$\omega_i = \frac{2\pi \cdot V}{m_i \cdot d_0}, \quad (2.7)$$

де, m_i – модулі ЧСЗК, d_0 – дискретний крок вимірювання.

3. Дискрети вимірювання фазових зсувів $\Delta\varphi_i$ на i -тій робочій частоті

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{m_i}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2.8)$$

4. Значення і кількість модулів обираються такими, щоб задовольнити умову відновлення максимального числа $G_{\max}$ лишками ЧСЗК:

$$G_{\max} < M = \sum_{i=1}^k m_i, \quad b_{\max} < d_0 \cdot G_{\max}. \quad (2.9)$$

Задання цих параметрів та виконання наведеної умови забезпечує можливість обчислення лишків g_i через результати фазових вимірювань:

$$g_i(b) = G^b \pmod{m_i} = \left[\frac{\bar{\varphi}_i^b}{\Delta\varphi_i} \right]^+, \quad i = \overline{1, k}, \quad (2.10)$$

де, $[]^+$ – оператор виділення цілої частини числа, $\bar{\varphi}_i^b$ – усереднене значення фазового зсуву сигналів, отримане при вимірювання відстані b на i -ті-й частоті.

Відновлення цілого числа G^b в позиційній системі числення виконується за формулою:

$$G^b = \sum_{i=1}^k g_i^b B_i \pmod{M}, \quad (2.11)$$

де, $(B_1, \dots, B_i, \dots, B_k)$ – система ортогональних базисів для обраної числової системи модулів [24].

Виходячи з вище наведеного можна визначити алгоритм вимірювання відстані з використання багаточастотного фазового методу з використанням ЧСЗК послідовністю таких дій:

1. Виміряти фазовий зсув між двома сигналами на різних частотах (не менше 2);
2. Використовуючи ЧСЗК отримати однозначно визначений фазовий зсув між сигналами;
3. Розрахувати відстань, використовуючи однозначно визначений фазовий зсув, з високою точністю.

Використання ЧСЗК дає змогу, не тільки вирішити задачу неоднозначності фазових вимірів, а також проводити виявлення та виправлення некоректно отриманих лишків. Спотворення лишків може бути викликано як шумами в каналах поширення ультразвукових коливань вздовж відстаней b та c , так і шумами електронних блоків апаратної частини системи координатної реєстрації інформації.

Проведення процедури коригування лишків у разі їх спотворення ґрунтується на розширенні основного діапазону відновлення чисел ЧСЗК. Для цього необхідно здійснити додаткове вимірювання на частоті ω_{n+1} (або на

декількох частотах), та визначити додатковий лишок g_{i+1} . Такий спосіб коригування заснований на теоремі [25] (теорема 4.1 на ст.159). Суть теореми полягає в тому, що при доповненні ЧСЗК, з модулями $[m_1 \dots m_i \dots m_n]$ та максимально відновлювальним числом $G_{\max} = \prod_{i=1}^k m_i - 1 = M - 1$, додатковим модулем m_{n+1} (значення якого більше за значення інших модулів), в результаті отримують закономірності:

1. При відновленні числа G^b , за наявного спотвореного лишка g_i , відбувається відновлення цілого числа у забороненому діапазоні $G^b \in (M, M \cdot m_{n+1})$.
2. Існує єдине значення спотвореного лишка g_i за якого не відбувається перехід відновленого числа в заборонений діапазон, тобто $G^b \in (0, M)$. [24]

За потреби наведена теорема може бути використана в розробленні способів усунення багатозначності фазових вимірювань на основі ЧСЗК підвищеної надійності.

Крім того слід зазначити, що точність виміру відстані багаточастотним фазовим методом залежить від кількох факторів, таких як: точність виміру частоти, точність виміру фазового зсуву та реалізацій систем калібрування, одна з яких буде представлена в 3 розділі.

2.2. Постановка задачі визначення відстані з використанням ЧСЗК

Задача визначення відстані між приймачем та конструктивно суміщеним з перетворювачем НК випромінювачем ультразвукових коливань формується наступним чином:

Необхідно визначити відстань D незмінну на інтервалі часу спостереження T_c з діапазону значень $(0 - D_{\max})$ з дискретним кроком вимірювання d_0 . Вимірювання здійснюється фазовим багаточастотним методом на n частотах ω_i ($i = 1 \dots n$), за яких довжина хвилі для всіх частот

набагато менше за значення шуканої відстані, тобто $\lambda_i \ll D$. В результаті виміру однозначно визначається розмір фазового зсуву $\varphi_i < 2\pi$ між прийнятим та випроміненим сигналами.

2.3. Розроблення алгоритму розрахунку відстані в багаточастотній фазовій системі координатної реєстрації інформації на основі ЧСЗК

Для розрахунку відстані між приймачем та випромінювачем в багаточастотній фазовій системі координатної реєстрації необхідно реалізувати наступний алгоритм (згідно п.2.1).

1. Задання основних параметрів ЧСЗК:

1.1 Задання модулів m_i ЧСЗК за такими умовами:

- Вибрані модулі m_i є взаємо простими числами;
- Максимальна вимірювальна відстань D_{max} не повинна перевищувати добуток модулів M ($D_{max} < M$).

1.2 Визначення довжини хвиль λ_i за формулою (2.5);

1.3 Вибір сітки робочих частот f_i та ω_i проводять за формулами (2.6), (2.7);

1.4 Розрахунок дискретів відліку фази $\Delta\varphi_i$ на різних частотах здійснюється за формулою (2.8);

1.5 Розрахунок ортонормованих базисів B_i :

Алгоритм розрахунку базисів B_i за трьох модулів ЧСЗК:

- Для розрахунку першого базису необхідно підібрати таке число, значення якого ділилось націло на другий та третій модуль, а остача від ділення на перший модуль дорівнювала одиниці.

$$B_1 \bmod(m_2) = 0; B_1 \bmod(m_3) = 0; B_1 \bmod(m_1) = 1.$$

- Для розрахунку другого базису необхідно підібрати таке число, значення якого ділилось націло на перший та третій модуль, а остача від ділення на другий модуль дорівнювала одиниці.

$$B_2 \bmod(m_1) = 0; B_2 \bmod(m_3) = 0; B_2 \bmod(m_2) = 1.$$

- Для розрахунку третього базису необхідно підібрати таке число, значення якого ділилось націло на перший та другий модуль, а остача від ділення на третій модуль була рівною одиниці.

$$B_3 \bmod(m_1) = 0; B_3 \bmod(m_2) = 0; B_3 \bmod(m_3) = 1.$$

Після визначення значень ортонормованих базисів необхідно перевірити умову правильності вибору ортонормованих базисів:

$$\left[\sum_{i=1}^n B_i \right] (\bmod M) = 1. \quad (2.12)$$

2. Використовуючи дискретне перетворення Гільберта визначити початковий фазовий зсув $\varphi_i < 2\pi$ (2.2) між сигналами $u_{i,1}$ та $u_{i,2}$, представлених моделлю сигналів за формулою (2.1);

3. Розрахувати лишки g_i ЧСЗК виходячи зі значень початкового фазового зсуву φ_i та дискрету фазових вимірювань $\Delta\varphi_i$ на кожній i -тій частоті за формулою (2.10);

4. Відновити ціле число $G^{a,b}_i$ в позиційній системі числення за формулою (2.11);

5. Використовуючи визначені лишки g_i та значення дискретного кроку вимірювання d_0 розрахувати відстань між приймачем та випромінювачем ультразвукових коливань за формулою (2.4).

Фазовий метод з використанням ЧСЗК дає змогу отримати значення з похибкою в межах одного дискрету ЧСЗК результату. Але для отримання результатів такої точності необхідно, щоб вхідні дані фазових зсувів сигналів були визначені безпомилково для правильного відновлення чисел. Навіть незначні похибки вимірювання значень фазових зсувів сигналів можуть привести до появи похибки або грубої помилки кінцевого результату. Це приводить до проблеми нестійкості розв'язків. Тому вимірювання необхідно проводити із застосуванням статистичних методів опрацювання результатів фазових вимірювань та використанням ЧСЗК з застосуванням методів виявлення/корекції помилок, моделювання який буде описано в 3 розділі.

2.4. Приклади розрахунку параметрів ЧСЗК в задачах визначення відстані

2.4.1. Розрахунок параметрів ЧСЗК в задачі визначення відстані за використання трихшкальної системи

Проведемо моделювання процесу усунення неоднозначності в фазовому далекомірі. Для цього сформулюємо задачу визначення відстані:

Необхідно провести обчислювальний експеримент з визначення відстані 1.5 м з дискретністю 1 мм. Тобто $D = 1.500$ м, $d_0 = 0.001$ м, на якому перевірити алгоритм розрахунків.

Розрахуємо основні базисні величини згідно поставленого завдання:

1. Вибір модулів, частот та ортонормованих базисів:

Приймемо $m_1 = 11$, $m_2 = 12$, $m_3 = 13$.

Визначимо максимально відновлюване число $G_{\max}$:

$$G_{\max} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 - 1 = 11 \cdot 12 \cdot 13 = 1716 - 1 = 1715.$$

Перевіримо умови однозначного вимірювання відстані за формулою (2.9):

$$D_{\max} = d_0 \cdot G_{\max} = 0.001 \cdot 1715 = 1.715 \text{ м},$$

$$D(1.5 \text{ м}) < D_{\max}(1.715 \text{ м}).$$

Розрахуємо частоти ω_i за формулою (2.7):

$$\omega_1 = 2\pi \cdot \frac{V}{m_1 \cdot d_0} = 2\pi \cdot \frac{331}{11 \cdot 0.001} = 2\pi \cdot 30.091 \text{ рад кГц}$$

Аналогічним чином розрахуємо частоти для модулів $m_2=12$ та $m_3=13$:

$$\omega_2 = 2\pi \cdot \frac{V}{m_2 \cdot d_0} = 2\pi \cdot \frac{331}{12 \cdot 0.001} = 2\pi \cdot 27.583 \text{ рад кГц}$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot \frac{V}{m_3 \cdot d_0} = 2\pi \cdot \frac{331}{13 \cdot 0.001} = 2\pi \cdot 25.461 \text{ рад кГц}$$

Розрахуємо ортонормованих базисів B_i за алгоритмом вказаним у п.2.3:

Для пошуку значення першого ортономованого базису B_1 потрібно

підібрати таке значення, щоб після ділення на 12 та 13 остача дорівнювала нулю, а при діленні на 11 остача дорівнювала одиниці:

$$B_1 \bmod(12) = 0; \quad B_1 \bmod(13) = 0; \quad B_1 \bmod(11) = 1.$$

Для цього підберемо таке значення c_1 , щоб виконувалась умова:

$$[c_1 \cdot 12 \cdot 13] \bmod(11) = 1,$$

де c_1 – будь-яке ціле число.

Умова виконується при $c_1 = 6$, тому маємо:

$$B_1 = c_1 \cdot 12 \cdot 13 = 6 \cdot 12 \cdot 13 = 936.$$

Аналогічним чином знайдемо значення ортонормованих базисів B_2 та B_3 , для цього використаємо наступні умови:

$$B_2 \bmod(11) = 0; \quad B_2 \bmod(13) = 0; \quad B_2 \bmod(12) = 1.$$

$$B_3 \bmod(11) = 0; \quad B_3 \bmod(12) = 0; \quad B_3 \bmod(13) = 1.$$

Підберемо числа c_2 та c_3 для наступних умов:

$$[c_2 \cdot 11 \cdot 13] \bmod(12) = 1.$$

$$[c_3 \cdot 11 \cdot 12] \bmod(13) = 1.$$

Найменші значення c_2 та c_3 , за яких виконуються необхідні умови, дорівнюють 11 та 7 відповідно.

Отже значення базисів ЧСЗК B_2 та B_3 дорівнюють:

$$B_2 = c_2 \cdot 11 \cdot 13 = 11 \cdot 11 \cdot 13 = 1573.$$

$$B_3 = c_3 \cdot 11 \cdot 12 = 7 \cdot 11 \cdot 12 = 924.$$

Перевіримо правильність розрахунку ортогональних базисів B_i за формулою (2.12):

$$\left(\sum_{i=1}^3 B_i \right) \bmod(M) = (936 + 1573 + 924) \bmod(1716) = 3433 \bmod(1716) = 1.$$

Оскільки умова (2.12) виконується, значення базисів розраховані правильно.

1. Розрахунок дискретів фази $\Delta\varphi_i$, очікуваних значень фазових зсувів φ_i , та лишків g_i для визначеної сітки частот:

Розрахуємо дискрети фази $\Delta\varphi_i$ за формулою (2.8):

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{m_1} = \frac{2\pi}{11} = 0.571 \text{ рад}$$

Аналогічним чином розрахуємо дискрети фази для модулів $m_2 = 12$ та $m_3 = 13$:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{m_2} = \frac{2\pi}{12} = 0.524 \text{ рад}$$

$$\Delta\varphi_3 = \frac{2\pi}{m_3} = \frac{2\pi}{13} = 0.483 \text{ рад}$$

Розрахуємо очікувані значення повних фазових зсувів Φ_i за наступною формулою:

$$\Phi_i(D) = \frac{\omega_i \cdot D}{V}. \quad (2.13)$$

Визначимо значення повного фазового зсуву Φ_1 :

$$\Phi_1 = (2\pi \cdot 30091) \cdot \frac{1.5}{331} = 856.8 \text{ рад}$$

Аналогічним чином розрахуємо значення повних фазових зсувів для модулів $m_2=12$ та $m_3=13$:

$$\Phi_2 = (2\pi \cdot 27583) \cdot \frac{1.5}{331} = 785.4 \text{ рад}, \quad \Phi_3 = (2\pi \cdot 25461) \cdot \frac{1.5}{331} = 725 \text{ рад}$$

Підставивши отримане значення повного фазового зсуву в формулу (2.2), отримаємо значення очікуваного фазового зсуву φ_i :

$$\varphi_1 = \Phi_1 \bmod(2\pi) = 856.8 \bmod(2\pi) = 2.287 \text{ рад}$$

Аналогічним чином обчислимо значення очікуваного фазового зсуву для модулів $m_2=12$ та $m_3=13$:

$$\varphi_2 = \Phi_2 \bmod(2\pi) = 785.4 \bmod(2\pi) = 0.002 \text{ рад}$$

$$\varphi_3 = \Phi_3 \bmod(2\pi) = 725 \bmod(2\pi) = 2.434 \text{ рад}$$

На основі отриманих значень очікуваних фазових зсувів φ_i та дискретів фази $\Delta\varphi_i$ розрахуємо значення лишків g_i за формулою (2.10):

$$g_1 = \left[\frac{\varphi_1}{\Delta\varphi_1} \right]^+ = \left[\frac{2.287}{0.571} \right]^+ = 4 .$$

Аналогічним чином отримаємо значення лишків g_2 та g_3 для модулів $m_2 = 12$ та $m_3 = 13$:

$$g_2 = \left[\frac{\varphi_2}{\Delta\varphi_2} \right]^+ = \left[\frac{0.002}{0.524} \right]^+ = 0, \quad g_3 = \left[\frac{\varphi_3}{\Delta\varphi_3} \right]^+ = \left[\frac{2.434}{0.483} \right]^+ = 5$$

2. Розрахунок відстані D за отриманими значеннями фазових зсувів сигналів та розрахованих ортогональних базисів за виконуємо за формулами (2.4), (2.11):

$$\begin{aligned} D &= 0.001 \cdot [4 \cdot 936 + 0 \cdot 1573 + 5 \cdot 924] \bmod(1716) = \\ &= 0.001 \cdot [8364] \bmod(1716) = 0.001 \cdot 1500 = 1.5 \text{ м} \end{aligned}$$

Отже, шукана відстань відповідає вихідним даним. Проведений обчислювальний експеримент підтверджує коректність алгоритму усунення багатозначності фазових вимірювань на основі числової системи залишкових класів.

2.4.2. Розрахунок параметрів розширеної системи ЧСЗК для контролювання коректного відновлення лишків

Реалізуємо на поставленій задачі можливість організації контролю, грубих помилок, які виникають під час отримання лишків, та відновлення числа. З цією метою доповнимо систему модулів ЧСЗК додатковим модулем $m_4 = 17$.

Розрахуємо межове значення розширеного відновленого числа G_p :

$$G_p = M \cdot m_4 = 29172.$$

Розрахунок дискрет фази $\Delta\varphi_4$ за формулою (2.8) дає такий результат:

$$\Delta\varphi_4 = \frac{2\pi}{m_4} = \frac{2\pi}{17} = 0.367 \text{ рад}$$

Розрахуємо кругову частоту ω_4 за формулою (2.7):

$$\omega_4 = 2\pi \cdot \frac{V}{m_4 \cdot d_0} = 2\pi \cdot \frac{331}{17 \cdot 0.001} = 2\pi \cdot 19471 \text{ рад кГц}$$

Розрахуємо повний фазовий зсув Φ_4 за формулою (2.13):

$$\Phi_4 = (2\pi \cdot 19471) \cdot \frac{1.5}{331} = 554.4 \text{ рад}$$

Визначимо очікуваний фазовий зсув φ_4 за формулою (2.2):

$$\varphi_4 = \Phi_4 \bmod(2\pi) = 554.4 \bmod(2\pi) = 1.478 \text{ рад}$$

Визначимо залишок g_4 за формулою (2.10):

$$g_1 = \left[\frac{\phi_4}{\Delta\phi_4} \right]^+ = \left[\frac{1.478}{0.367} \right]^+ = 4.$$

Визначимо значення ортонормованих базисів B_i для розширеної систем модулів $[m_1 \dots m_4]$:

Запишемо умови для визначення ортонормованих базисів:

$$B_1 \bmod(12) = 0; \quad B_1 \bmod(13) = 0; \quad B_1 \bmod(17) = 0; \quad B_1 \bmod(11) = 1.$$

$$B_2 \bmod(11) = 0; \quad B_2 \bmod(13) = 0; \quad B_2 \bmod(17) = 0; \quad B_2 \bmod(12) = 1.$$

$$B_3 \bmod(11) = 0; \quad B_3 \bmod(12) = 0; \quad B_3 \bmod(17) = 0; \quad B_3 \bmod(13) = 1.$$

$$B_4 \bmod(11) = 0; \quad B_4 \bmod(12) = 0; \quad B_4 \bmod(13) = 1; \quad B_4 \bmod(17) = 1.$$

Підберемо для цих умов значення коефіцієнтів $c_1 \dots c_4$:

$$[c_1 \cdot 12 \cdot 13 \cdot 17] \bmod(11) = 1; \quad [c_2 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17] \bmod(12) = 1;$$

$$[c_3 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 17] \bmod(13) = 1; \quad [c_4 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 13] \bmod(17) = 1.$$

Значення $c_1 \dots c_4$ дорівнюють:

$$c_1 = 1; \quad c_2 = 7; \quad c_3 = 5; \quad c_4 = 16.$$

Значення ортонормованих базисів дорівнюють:

$$B_1 = c_1 \cdot 12 \cdot 13 \cdot 17 = 11 \cdot 12 \cdot 13 \cdot 17 = 2652,$$

$$B_2 = c_2 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 = 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 = 17017,$$

$$B_3 = c_3 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 17 = 5 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 17 = 11220,$$

$$B_4 = c_4 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 13 = 16 \cdot 11 \cdot 12 \cdot 13 = 27456.$$

Перевіримо правильність розрахунку ортонормальних базисів B_i :

$$\left(\sum_{i=1}^4 B_i \right) \bmod(M) = (2652 + 17017 + 11220 + 27456) \bmod(29172) = \\ = 58345 \bmod(29172) = 1.$$

Отже, ортонормовані базиси знайдені правильно.

На основі лишків g_i та ортонормованих базисів B_i за формулою (2.11) визначимо відновлювальне число G_i :

$$G_i = [g_1 \cdot B_1 + g_2 \cdot B_2 + g_3 \cdot B_3 + g_4 \cdot B_4] \bmod(G_p) = \\ = [4 \cdot 2652 + 0 \cdot 17017 + 5 \cdot 11220 + 4 \cdot 27456] \bmod(29172) = \\ = [176532] \bmod(29172) = 1500$$

Значення $G_i = 1500$ відповідає відновлювальному числу поставленого завдання при 3 модулях.

Перевіримо роботу пошуку помилок визначення лишків g_i , для цього змінимо значення одного з лишків, наприклад $g_3 = 1$:

$$G_i = [g_1 \cdot B_1 + g_2 \cdot B_2 + g_3 \cdot B_3 + g_4 \cdot B_4] \bmod(G_p) = \\ = [4 \cdot 2652 + 0 \cdot 17017 + 1 \cdot 11220 + 4 \cdot 27456] \bmod(29172) = \\ = [131652] \bmod(29172) = 14964$$

Якщо число G_i знаходиться в забороненому інтервалі $[M, G_p)$ тобто в інтервалі $[1716, 29172)$, тоді в ході розрахунку лишків g_i відбулась помилка; якщо $G_i \notin [1716, 29172)$, то розрахунок лишків ЧСЗК вірний.

Оскільки значення $G_i = 14964$ знаходиться в забороненій зоні, отже в процесі визначення лишків наявна помилка, тому процес виявлення помилок працює вірно. Таку розширену систему доцільно використовувати за низького відношення сигнал/шум, коли суттєво збільшується ймовірність появи грубих помилок, з метою усунення або зменшення впливу шумів на результат виміру.

Висновки до другого розділу

Проведене у другому розділі дослідження дає змогу зробити наступні висновки.

1. Використання числової системи залишкових класів є перспективним напрямом розвитку багаточастотних фазових вимірювань. Застосування цієї технології дає змогу збільшити швидкість та надійність вимірювання відстаней при використанні фазового ультразвукового методу визначення координат перетворювачів в автоматизованих системах НК.

2. Задача вимірювання повних фазових зсувів сигналів у прецизійній багаточастотній фазовій далекометрії може бути зведена до задачі відновлення цілих чисел з їх представлення лишками в ЧСЗК. Така можливість досягається відповідним вибором ряду параметрів – системи модулів ЧСЗК, значень робочих частот та ступенів квантування фазових зсувів сигналів.

3. При використанні багаточастотного фазового методу далекометрії на основі ЧСЗК, завдяки особливостям останньої і виконанні вимірювань на допоміжній частоті (одній чи декількох), реалізується можливість виявлення та виправлення грубих помилок під час вимірювання відстані фазовим методом. Це дає змогу забезпечити працездатність системи визначення координат перетворювача НК за понижених відношень сигнал/шум.

4. Коректність запропонованих алгоритмів обчислення відстаней в багаточастотному фазовому далекомірі з усуненням неоднозначності фазових вимірів на основі ЧСЗК підтверджене результатами моделювання процесу визначення.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ В СИСТЕМІ КООРДИНАТНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ ДАТЧИКА ВСНК

3.1. Постановка задачі оцінювання похибки вимірювання координат датчика ВСНК з використанням ЧСЗК в ультразвукових фазових системах двокоординатної реєстрації інформації

Постановка задачі визначення відстані багаточастотним фазовим методом з використанням ЧСЗК для розв'язання задачі неоднозначності фазових вимірювань, в системі двокоординатній реєстрації положення датчиків ВСНК полягає в наступному.

Необхідно визначити двовимірні декартові координати датчика ВСНК з дискретним кроком d_0 ($d_0 = 1$ мм), на контрольованій плоскій ділянці ОК розміром $L \times L$ ($L = 1$ м) (рис. 2.1). Для визначення координат x_A та y_A використовується метод трилатерації. Для реалізації багаточастотного фазового ультразвукового методу визначення відстаней b , c між конструктивно-суміщеними датчиком ВСНК та ненаправленим випромінювачем ультразвукових коливань, використовуються сигнали частотою від 20 до 40 кГц. Приймачі ультразвукових коливань, встановлені в т.В та т.С (рис. 2.1), рознесені на відстань a , яка дорівнює довжині ребра плоскої ділянки ОК ($a = L = 1$ м).

Ультразвуковий випромінювач збуджує ультразвукові хвилі, які приймаються двома приймачами ультразвукових коливань, в результаті вимірюється затримка ультразвукових коливань між випроміненим та прийнятими сигналами по двом акустичним каналам b та c . Затримка ультразвукових коливань визначається багаточастотним фазовим методом з усуненням неоднозначності фазових вимірювань з використанням числової системи залишкових класів (ЧСЗК) на трьох частотах ($n = 3$). Методикою проведення вимірювань передбачити визначення швидкості поширення

ультразвукового сигналу для зменшення похибки вимірювання відстаней b та c [26].

Необхідно виконати моделювання процесу визначення координат x_A та y_A , оцінити похибки визначення координат датчика в межах контрольованої ділянки ОК, а також оцінити похибки відновлення повного фазового зсуву та перевірити завадостійкість запропонованої системи.

3.2. Визначення випадкової складової похибки вимірювання координат за аналізом рівняння вимірювання

Оцінювання похибки виміру відстаней виконується непрямим методом. Рівняння вимірювання в цьому випадку в загальному виді представляється функціональною залежністю результатів $(x_1, x_2 \dots x_n)$ прямих вимірювань.

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_n) \quad (3.1)$$

Обґрунтування визначення дисперсії такого виду вимірювань наведено в [27]. Якщо розглядати результати вимірювань як реалізації випадкових величин $(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n)$, то рівняння (3.1) можна представити у такому виді:

$$\eta = f(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n) \quad (3.2)$$

Передбачається, що математичне сподівання, дисперсії та коефіцієнти кореляції випадкових величин $(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n)$ відомі. Визначення ймовірнісних характеристики випадкової величини η за числовими характеристиками випадкових аргументів $(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n)$ відбувається у лінійному наближенні. Це дає змогу замінити нелінійну в загальному випадку функцію випадкових аргументів (3.2) лінійною і оцінити характеристики випадкової величини η за числовими характеристиками випадкових аргументів $(\xi_1, \xi_2 \dots \xi_n)$.

Лінеаризація функції одного випадкового аргументу представляє собою наближення цієї функції першими двома членами ряду Тейлора.

Визначення лінеаризованої функції в околі точки $\mathbf{M}\xi$, де $\mathbf{M}$ – оператор визначення математичного сподівання випадкової величини, за обмеження двома першими членами ряду Тейлора, виглядає так:

$$\eta = f(\mathbf{M}\xi) + f'(\mathbf{M}\xi) \cdot (\xi - \mathbf{M}\xi) \quad (3.3)$$

Числові характеристики випадкової величини (3.3) розраховуються як:

$$\mathbf{M}\eta = \mathbf{M}[f(\mathbf{M}\xi) + f'(\mathbf{M}\xi) \cdot (\xi - \mathbf{M}\xi)] = f(\mathbf{M}\xi) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{D}\eta = [f'(\mathbf{M}\xi)]^2 \cdot \mathbf{D}\xi, \quad (3.5)$$

де $\mathbf{D}$ – оператор визначення дисперсії випадкової величини

Оскільки в загальному випадку кількість аргументів функції (3.2) дорівнює n , то формули (3.4) та (3.5), у випадку некорельованих аргументів, необхідно представити у такому виді:

$$\mathbf{M}\eta = \sum_{j=1}^n f(\mathbf{M}\xi_j) \quad (3.6)$$

$$\mathbf{D}\eta = \sum_{j=1}^n [f'(\mathbf{M}\xi_j)]^2 \cdot \mathbf{D}\xi = \sum_{j=1}^n \left(\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x_j} \right|_{x=\mathbf{M}\xi_j} \right)^2 \cdot \sigma_{\xi_j}^2 \quad (3.7)$$

де, похідні $\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x_j} \right|_{x=\mathbf{M}\xi}$ – коефіцієнти впливу.

За наявності кореляції аргументів $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ ($r_{ij} \neq 0$) формула визначення дисперсії випадкової величини (3.7) доповнюється додатковими складовими [27]:

$$\mathbf{D}\eta = \sum_{j=1}^n \left(\left. \frac{\partial f}{\partial x_j} \right|_{x=\mathbf{M}\xi_j} \right)^2 \cdot \sigma_{\xi_j}^2 + 2 \sum_{i < j} \left(\left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x=\mathbf{M}\xi_i} \right) \cdot \left(\left. \frac{\partial f}{\partial x_j} \right|_{x=\mathbf{M}\xi_j} \right) \cdot r_{ij} \cdot \sigma_{\xi_i} \cdot \sigma_{\xi_j} \quad (3.8)$$

де, r_{ij} – коефіцієнт кореляції випадкових величин ξ_i, ξ_j .

Для визначення числових характеристик випадкових величин $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ необхідно обґрунтувати закони їх розподілу.

Застосуємо метод лінеаризації до визначення похибок вимірювання відстаней в запропонованому методі вимірювань.

Прийmemo, що похибка виміру фазового зсуву для сторін b та c підпорядковується рівномірному закону розподілу. Тоді її середньоквадратичне значення σ_{ξ_1} визначається як:

$$\sigma_{\xi_1} = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}}, \quad a \leq \delta\varphi_i \leq b, \quad (3.9)$$

де, a – нижня межа похибки, а b – верхня межа похибки вимірювання фазового зсуву.

Так як багаточастотний фазовий метод за використання ЧСЗК дає змогу отримати значення з похибкою в межах одного дискрету $\Delta\varphi_i$ фазового зсуву сигналів, приймаємо, що $\delta\varphi_i \in [-0.5\Delta\varphi_i, 0.5\Delta\varphi_i]$. Відповідно межі похибки визначення відстані становитимуть $[-0.5d_0, 0.5d_0]$.

Враховуючи зазначений діапазон можна розрахувати середньоквадратичну похибку σ_{ξ_1} за формулою (3.9):

$$\sigma_{\xi_1} = \sqrt{\frac{d_0^2}{12}} = \frac{d_0}{2\sqrt{3}} \text{ мм.}$$

Наступним кроком є визначення коефіцієнтів впливу $\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x_j} \right|_{x=\mathbf{M}_\xi}$ та

$\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right|_{x=\mathbf{M}_\xi}$ на координати виміру x_A та y_A :

Визначення координат x_A та y_A відбувається методом трилатерації за формулами:

$$x_A = \sqrt{c^2 - \left(\frac{c^2 + a^2 - b^2}{2a} \right)^2}; \quad y_A = \frac{c^2 + a^2 - b^2}{2a}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнти впливу для координат x_A та y_A дорівнюють:

$$\frac{\partial x_A}{\partial b} = \frac{b(a^2 - b^2 + c^2)}{2a^2 \sqrt{c^2 - \frac{(a^2 - b^2 + c^2)^2}{4a^2}}}; \quad \frac{\partial x_A}{\partial c} = \frac{2c - \frac{c(a^2 - b^2 + c^2)}{a^2}}{2 \sqrt{c^2 - \frac{(a^2 - b^2 + c^2)^2}{4a^2}}} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial y_A}{\partial b} = -\frac{b}{a}; \quad \frac{\partial y_A}{\partial c} = \frac{c}{a} \quad (3.11)$$

Враховуючи отримані значення коефіцієнтів впливу та середнього квадратичного відхилення σ_{ξ_1} визначимо дисперсію похибки виміру координати x_A за формулою (3.8):

$$\begin{aligned} \mathbf{D}\eta &= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial x_A}{\partial b} \right)^2 \cdot \sigma_{\xi_j}^2 + 2 \sum_{i < j} \left(\frac{\partial x_A}{\partial b} \right) \cdot \left(\frac{\partial x_A}{\partial c} \right) \cdot r_{ij} \cdot \sigma_{\xi_i} \cdot \sigma_{\xi_j} = \\ &= \sum_{j=1}^n \left(\frac{b(a^2 - b^2 + c^2)}{2a^2 \sqrt{c^2 - \frac{(a^2 - b^2 + c^2)^2}{4a^2}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{d_0}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \\ &+ 2 \sum_{i < j} \left(\frac{b(a^2 - b^2 + c^2)}{2a^2 \sqrt{c^2 - \frac{(a^2 - b^2 + c^2)^2}{4a^2}}} \right) \left(\frac{2c - \frac{c(a^2 - b^2 + c^2)}{a^2}}{2 \sqrt{c^2 - \frac{(a^2 - b^2 + c^2)^2}{4a^2}}} \right) \cdot r_{ij} \cdot \left(\frac{d_0}{2\sqrt{3}} \right)^2. \end{aligned}$$

Визначимо значення середньоквадратичної похибки σ_{x_A} :

$$D_{x_A}(1) = \frac{d_0^2 \cdot (b+c) \cdot (a-b+c) \cdot (a+b-c)}{24 \cdot a^2 \cdot \sqrt{-\frac{a^4 - 2a^2b^2 - 2a^2c^2 + b^4 - 2b^2c^2 + c^4}{4 \cdot a^4}}}. \quad (3.12)$$

$$D_{x_A}(2) = r_{ij} \cdot \frac{d_0^2 \cdot b \cdot c \cdot (a^2 + b^2 - c^2) \cdot (a^2 - b^2 + c^2)}{6 \cdot a^2 \cdot (a-b+c) \cdot (a+b+c) \cdot (a-b-c) \cdot (a+b-c)}. \quad (3.13)$$

$$\sigma_{x_A} = \sqrt{D_{x_A}(1) + D_{x_A}(2)}. \quad (3.14)$$

Враховуючи отримані значення коефіцієнтів впливу та середнього квадратичного відхилення σ_{ξ_1} визначимо дисперсію похибки виміру координати y_A за формулою (3.8):

$$\mathbf{D}\eta = \sum_{j=1}^n \left(-\frac{b}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{d_0}{2\sqrt{3}}\right)^2 + 2 \sum_{i < j} \left(-\frac{b}{a}\right) \cdot \left(\frac{c}{a}\right) \cdot r_{ij} \cdot \left(\frac{d_0}{2\sqrt{3}}\right)^2 =$$

$$= -\frac{d_0^2 \cdot (a \cdot b - a \cdot c + 2 \cdot b \cdot c \cdot r_{ij})}{12 \cdot a^2}.$$

Визначимо значення середньоквадратичної похибки:

$$\sigma_{y_A} = \sqrt{\frac{-d_0^2 \cdot (a \cdot b - a \cdot c + 2 \cdot b \cdot c \cdot r_{ij})}{12 \cdot a^2}}. \quad (3.15)$$

Значення коефіцієнта кореляції r_{ij} не лінійне для кожної пари координат (x_A, y_A) , тому функції похибка вимірів координат не буде носити лінійний характер.

Для оцінювання числових значень похибки необхідно проводити модельні дослідження визначення координат в системі координатної реєстрації.

3.3. Моделювання процесу визначення похибки вимірювання координат за використання багаточастотного фазового методу з використанням ЧСЗК в системах двокоординатної реєстрації інформації за відсутності шумів

3.3.1. Визначення вхідних параметрів ЧСЗК

Першим етапом моделювання є розрахунок вхідних параметрів, який відбувається згідно методики вказаної в п. 2.3.

1. Максимальна вимірювальна відстань D_{max} .

Так як плоска ділянка ОК представляє собою квадрат зі стороною довжиною $a = 1$ м, то максимальна відстань для цього випадку дорівнює:

$$D_{max} = \sqrt{a^2} = \sqrt{2} = 1.414 \text{ м.}$$

Оскільки відстань D_{max} значно перевищує довжину ультразвукової хвилі у повітрі, застосування ультразвукового фазового методу вимагає

однозначного вимірювання фазових зсувів $\Phi_i > 2\pi$ за допомогою використання ЧСЗК.

2. Вибір кількості та номінали модулів $m_i = (m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$ ЧСЗК.

Кількість модулів та номінали модулів m_i вибираються згідно значення кількості робочих частот n та максимально вимірювальної відстані D_{max} при врахованні дискретного кроку d_0 .

Так як значення максимально вимірювальної відстані D_{max} дорівнює 1.414 м, врахувавши дискретизацію відстані в 1 мм, маємо, що добуток модулів m_i повинен перевищувати величину 1414. Крім цього при виборі модулів m_i потрібно врахувати умову, що модулі m_i – взаємно прості числа.

Для досягнення поставленої задачі обираємо $m_{1..3} = (11, 12, 13)$. Для цієї системи модулів ЧСЗК максимальне відновлювальне число G_{max} дорівнює:

$$G_{max} = \sum_{i=1}^3 m_i - 1 = M - 1 = 11 \cdot 12 \cdot 13 - 1 = 1715.$$

Отримане значення еквівалентне вимірній відстані в 1.715 м тобто перевищує максимальне вимірювальне значення відстані D_{max} .

3. Вибір сітки робочих частот f_i та кругових частот ω_i за умови $n = 3$ згідно формули (2.6, 2.7):

$$f_1 = 30.091 \text{ кГц}; \quad \omega_1 = 2\pi \cdot 30.091 \text{ рад} \cdot \text{кГц};$$

$$f_2 = 27.583 \text{ кГц}; \quad \omega_2 = 2\pi \cdot 27.583 \text{ рад} \cdot \text{кГц};$$

$$f_3 = 25.461 \text{ кГц}; \quad \omega_3 = 2\pi \cdot 25.461 \text{ рад} \cdot \text{кГц};$$

4. Розрахунок ортонормованих базисів B_i дає наступний результат:

$$B_1 = 936, \quad B_2 = 1573, \quad B_3 = 924.$$

Значення ортонормованих базисів розраховувались програмним шляхом (див. додаток А).

Коректність розрахунку базисів підтверджена перевіркою:

$$\sum_{i=1}^3 B_i \pmod{M} = [936 + 1573 + 924] \pmod{1716} = 1.$$

5. Дискрети фазових вимірювань $\Delta\varphi_i$ згідно (2.8) дорівнюють:

$$\Delta\varphi_1 = 0.571 \text{ рад},$$

$$\Delta\varphi_2 = 0.524 \text{ рад},$$

$$\Delta\varphi_3 = 0.483 \text{ рад}.$$

6. Швидкість поширення ультразвукового сигналу V прийняти рівною 331 м/с.

3.3.2. Моделювання процесу визначенням координат на основі ЧСЗК та за відсутності шумової складової сигналу

Моделювання відбувалось згідно зі структурно-логічною схемою ультразвукової системи координатної реєстрації інформації (рис.3.1).

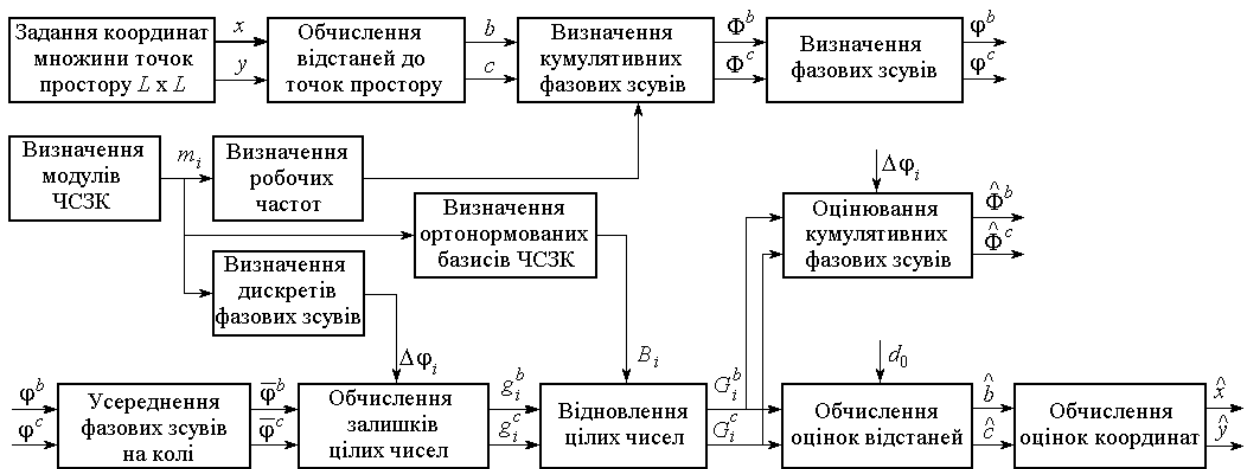


Рисунок 3.1 Структурно-логічна схема системи координатної реєстрації положення датчиків ВСНК

Процес моделювання можна поділити на два етапи: підготовка вхідних даних та розрахунок координат з наступним оцінюванням їх точності.

На першому етапі формуються вхідні параметри ЧСЗК (згідно п. 3.3.1): сітки робочих частот f_i та кругових частот ω_i , ортонормовані базиси B_i , дискрети фазового зсуву $\Delta\varphi^{b,c}_i$, масиви даних фазових зсувів $\varphi^b_i, \varphi^c_i, i = \overline{1,3}$ для кожної відстані b_i та c_i згідно кожної координати простору зони контролю розміром 1x1 м.

Для т. A (рис. 2.1) було задано масив координат (x_A, y_A) розміром 1000×1000 точок, для кожної координати розраховувались відстані b та c та відповідні їм фазові зсуви $\varphi_i^b(x_A, y_A), \varphi_i^c(x_A, y_A), i = \overline{1, 3}$ [29].

На другому етапі був проведений процес відновлення відстаней b_i та c_i за допомогою ЧСЗК. Він полягає у визначенні цілої кількості фазових циклів повного фазового зсуву та визначенні фазового доміру на трьох частотах, з наступним перетворенням в значення лишків g_i ЧСЗК, для вирішення задачі неоднозначності виміру фази.

За величиною лишків g_i та значенням дискрету фазового зсуву $\Delta\varphi_i$ визначався відновлений фазовий зсув $\Phi_i^{b,c}$. За значенням повного фазового зсуву, враховуючи дискретний крок d_0 , відновлювались значення відстаней $\hat{b}_i$ та $\hat{c}_i$, згідно яких, використовуючи метод трилатерації (формула (3.10)), визначались координати x_A та y_A .

На третьому етапі моделювання оцінювалась похибка визначення координат точок (x_A, y_A) , як різниця між заданими та розрахованими значеннями координат згідно відновлених фазових зсувів. Правильність отримання лишків g_i ЧСЗК перевірялась за відсутністю грубих помилок при відновленні значення повного фазового зсуву $\overline{\Phi}_i^{b,c}$ або розрахунку координат точок (x_A, y_A) .

$$\Phi_i^b(x_A, y_A) = G_i^b(x_A, y_A) \cdot \Delta\varphi_i, \Phi_i^c(x_A, y_A) = G_i^c(x_A, y_A) \cdot \Delta\varphi_i, i = \overline{1, 3} \quad (3.16)$$

Програмний код моделювання наведений в додатку Б.

Результати моделювання.

Проведене моделювання дозволило визначити зміну значення повного фазового зсуву від координат. На рис. 3.2 та рис. 3.3 показані тривимірні графіки відновленої повної фази Φ_i^b та Φ_i^c для сторін b та c відповідно.

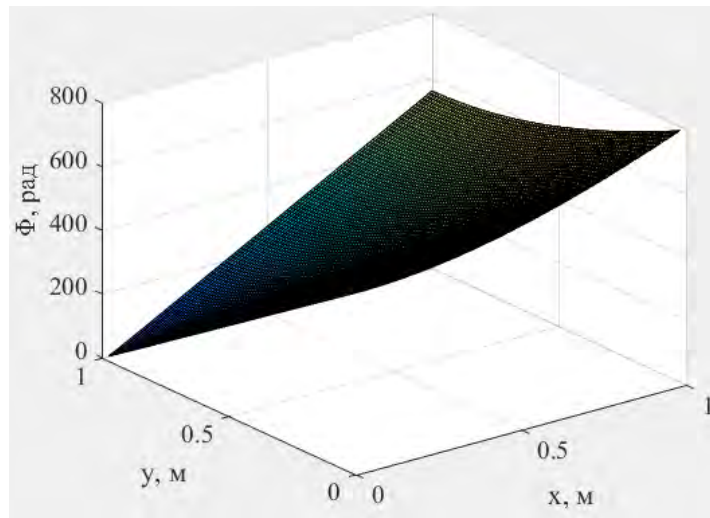


Рисунок 3.2. 3D графік відновленої повної фази Φ_i^b сторони b

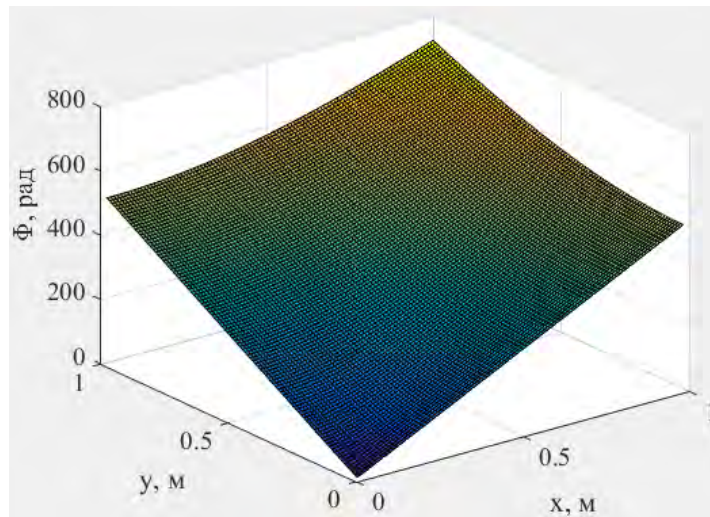


Рисунок 3.3. 3D графік відновленої повної фази Φ_i^c сторони c

Похибка визначення координат зв'язана з похибкою визначення повного фазового зсуву $\Phi_i^{b,c}$. На рис. 3.4 та 3.5 наведені тривимірні графіки визначення абсолютної похибки відновлення повної фази Φ_i^b та Φ_i^c для сторін b та c в залежності від координат x_A та y_A на частоті $f_1 = 30.091$ кГц, на якій відбувається вимірювання фазових зсувів сигналів з дискретом $\Delta\varphi_1 = 0,571$.

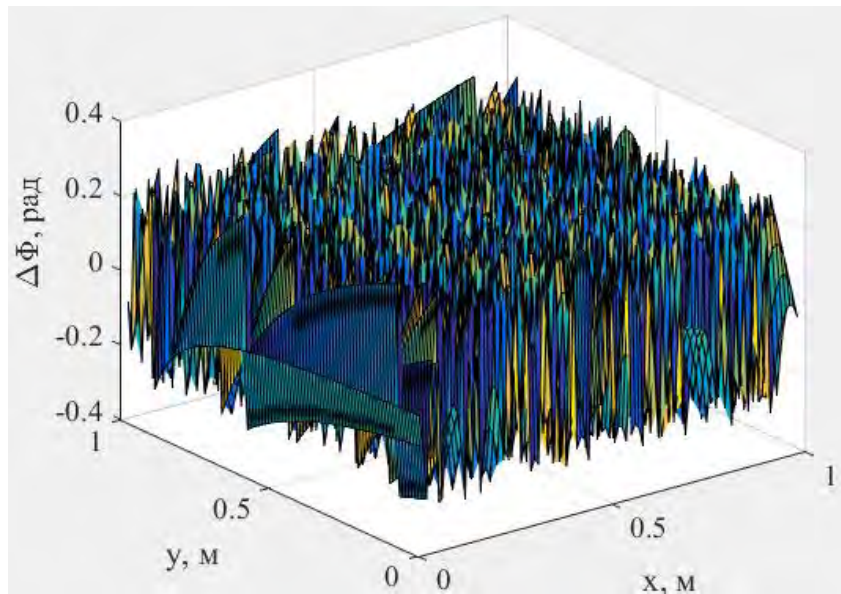


Рис.3.4. 3D графіки похибки відтворення повних фазових зсувів з відстані b

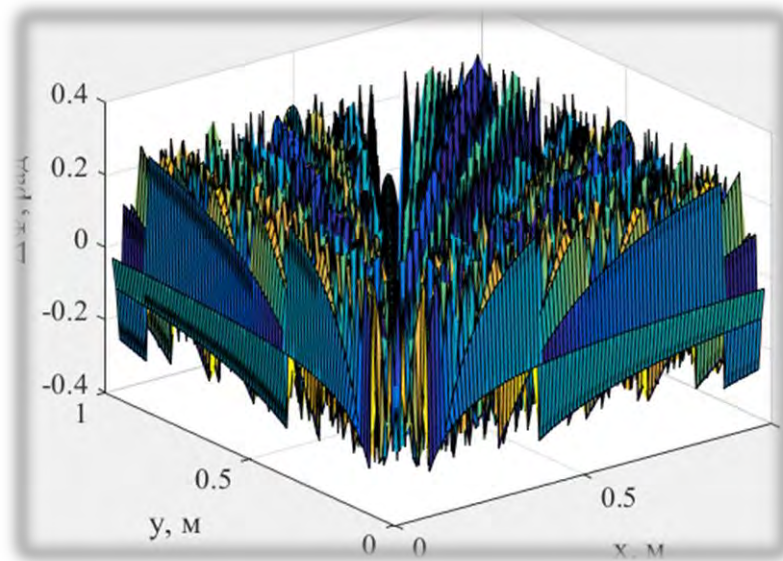


Рис.3.5. 3D графіки похибки відтворення повних фазових зсувів з відстані c

Значення абсолютної похибки виміру повного фазового зсуву визначались за формулою

$$\Delta\Phi_1^c(x_A, y_A) = \Phi_1^c(x_A, y_A) - \Phi_1^c(x_A, y_A). \quad (3.17)$$

Проаналізувавши рис. 3.4 та рис. 3.5 можна констатувати, що значення усередненої похибки виміру повного фазового зсуву для сторін b та c , за відсутності шуму, мають приблизно однакове значення $\Delta\Phi_i(x_A, y_A) = \pm 0.3$ рад, що відповідає куту в 17° .

Абсолютна похибки вимірювання координат визначається як різниця між заданими значеннями координат та відновленими координатами, які отримані за значеннями повного фазового зсуву. Графіки визначеної абсолютної похибки розрахунку координат наведені на рис. 3.6 та рис. 3.7.

Аналіз рис. 3.6 та 3.7 показав, що похибка виміру координати x_A у всій зоні контролю може сягати значень ± 5 мм, а похибка вимірів координати y_A – ± 2 мм, що значно перевищує очікувані результати. Проте такі завищені значення похибок спостерігаються в невеликій за розміром області в околі бази a . Цю область доцільно розглядати як заборонену для визначення координат (далі «мертву зону»).

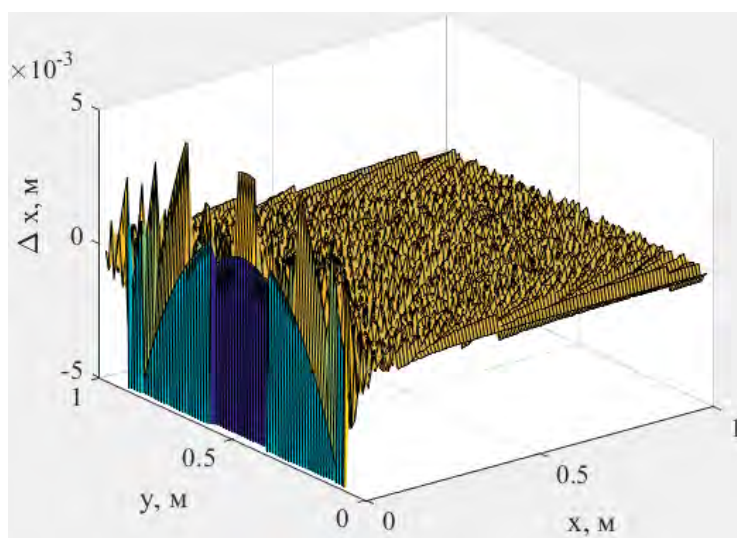


Рис.3.6. 3D графіки похибки відтворення координати x_A

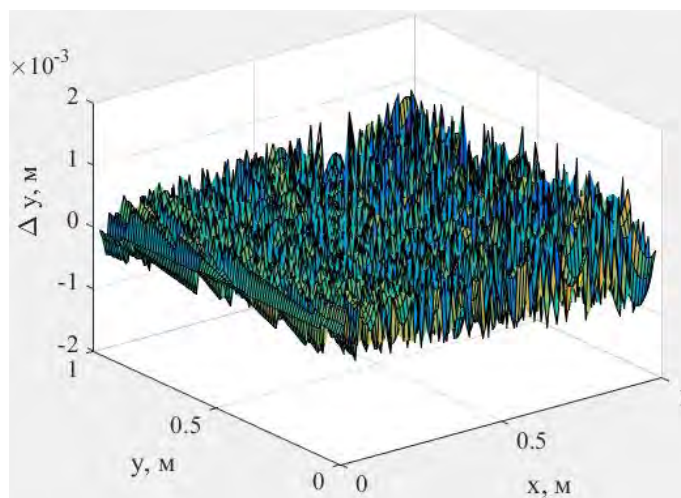


Рис.3.7. 3D графіки похибки відтворення координати y_A

На практиці на результаті виміру координат впливають шуми. Вони можуть бути як зовнішніми (акустичні шуми в каналах передачі вздовж відстаней b та c), так і внутрішніми (власні шуми перетворювачів, електричні шуми приймання та перетворення акустичних сигналів, шуми дискретизації АЦП тощо).

Вплив таких шумів може привести до появи грубих помилок під час визначенні як повного фазового зсуву так і розрахунку координат. Для підтвердження цього на рис.3.8 представлені графіки відновлення повного фазового зсуву сигналу без впливу шумів (епюра a) та за наявності шумової складової сигналу з нормальним розподілом (епюра b).

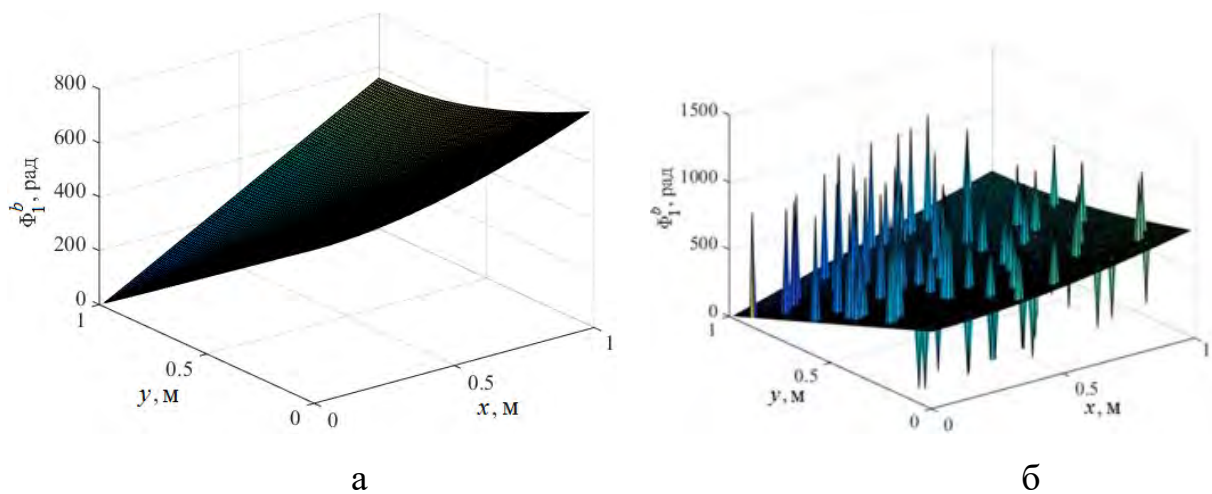


Рис. 3.8. 3D графік відновленого повного фазових зсуву $\Phi_i^b(x_A, y_A)$ зі сторони b на частоті $f_i = 30$ кГц за відсутності (а) та наявності фазового шуму з СКЗ $\sigma_\varphi = 0.006$ рад та нульовим математичним сподіванням (б)

Графіки на рис.3.6 свідчать, що за наявності шумів виникають грубі помилки відновлення повних фазових зсувів сигналів, які приводять до голкоподібних викидів значень повного фазового зсуву. Причиною цього явища є некоректне визначення лишків ЧСЗК. Механізм цього явища полягає в тому, що наявність навіть незначних похибок визначення фазового зсуву призводять до того, що відліки на різних шкалах можуть опинитись по різні сторони від цих межових значень. Через це значення одного або декількох лишків ЧСЗК відрізняються на ± 1 , в результаті з'являються грубі помилки.

На наступному графіку (рис.3.7) показана похибка виміру координат за наявності шуму з нормальним розподілом з СКЗ $\sigma_{\varphi} = 0,006$ рад та нульовим математичним очікуванням.

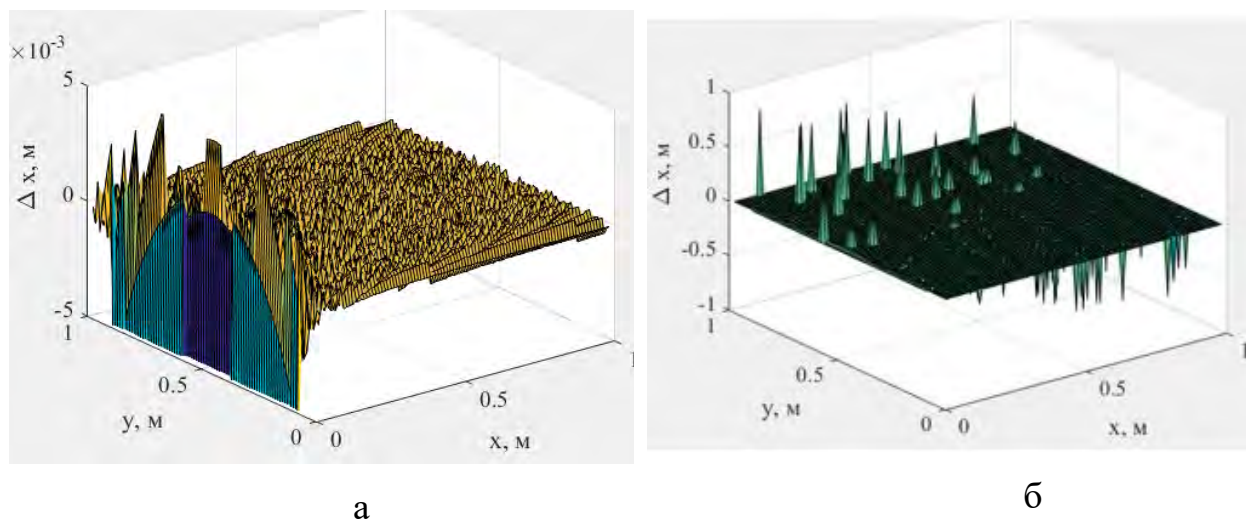


Рис. 3.9. 3D графік похибки визначення координат без наявності шумів (а) та наявності фазового шуму з СКЗ $\sigma_{\varphi} = 0,006$ рад (б)

Проведений модельний експеримент дозволив підтвердити, що запропонована система координатної реєстрації дає змогу визначити координати x_A та y_A в дозволений області визначення з похибкою, що належить інтервалу значень ± 1 мм,. Але розглянута система має низьку завадостійкість, що підтверджено виконаними модельними дослідженнями. Отже, система координатної реєстрації інформації з використанням ЧСЗК потребує підвищення завадостійкості для забезпечення працездатності за низького відношення сигнал/шум. Удосконалення цього методу з метою підвищення завадостійкості буде наведене в четвертому розділі.

3.4. Оцінювання розмірів мертвих зон в задачах визначення координат положення датчика ВСНК

При визначенні координат за використання фазового методу постає питання про можливість розрізнення сусідніх координат один від одного. Значення повного фазового зсуву сигналів для двох суміжних координат може

бути майже однаковим, тобто $|\Phi_i - \Phi_{i+1}| \approx 0$, в результаті визначення точного значення координати на практиці стає неможливим. Область в якій не можливо відрізнити дві сусідні координати точки називають мертвою зоною.

Моделювання визначення розмірів мертвих зон відбувалось у два етапи.

На першому етапі була задана похибка розрізнення двох сусідніх координат виходячи зі значення абсолютної похибки відновлення повного фазового зсуву наведеної в п.3.2.3, яка становить $\Delta\Phi = \pm 0.3$ рад. Розмір прийнятої похибки дає змогу розрізнити дві сусідні координати з проектною похибкою, що належить інтервалу ± 0.5 мм. Також були сформовані масиви різниць сусідніх значень повних фазових зсувів $\Delta\Phi_i^r$.

На другому етапі проведено оцінювання розмірів областей мертвих зон визначення координат положення датчика ВСНК.

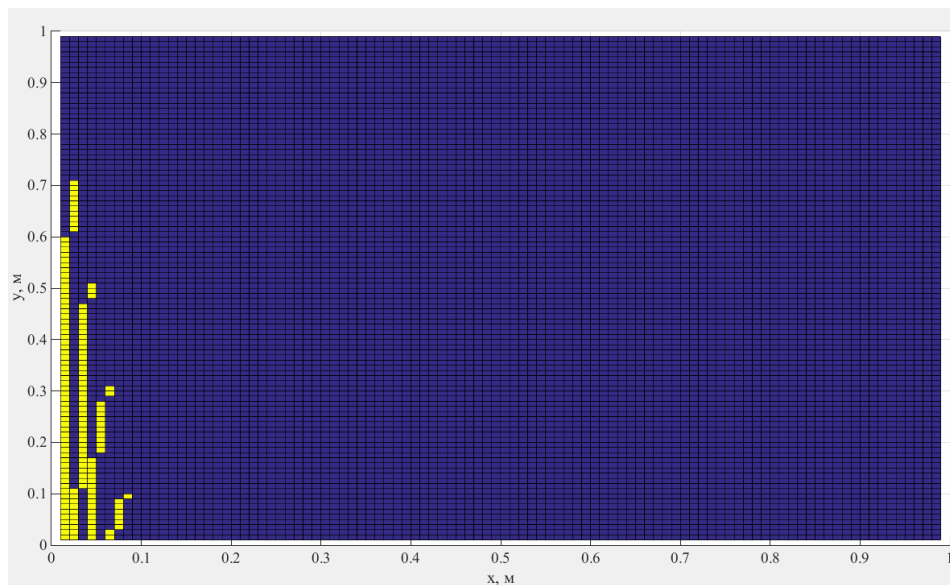


Рисунок 3.10. Графік розмірів мертвої зони для сторони b

На рис. 3.10 та рис. 3.11 наведена мертва зона, яка була визначення при розрахунку Φ_i^r для сторін b та c . Синім кольором показано дозволена зону контролю, а жовтим кольором значення координат, які не можливо розрізнити один від одного ($\Phi_i^r > \Delta\Phi_i^r$).

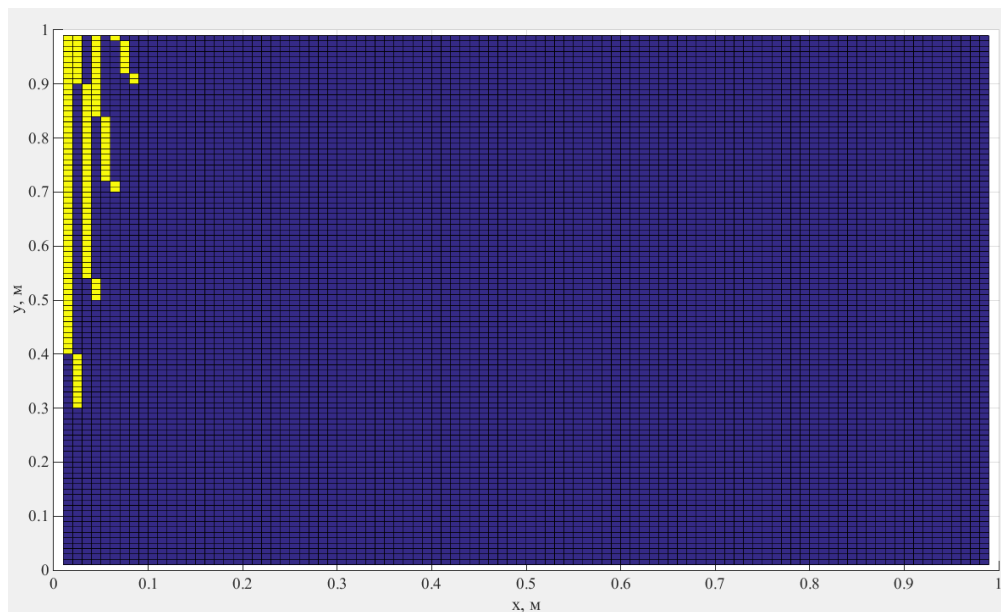


Рисунок 3.11. Графік розмірів мертвої зони для сторони c

Об'єднав результати мертвих зон отриманих на рис. 3.10 та рис.3.11 можна визначити загальну мертву зони для заданого об'єкта контролю (рис.3.12):

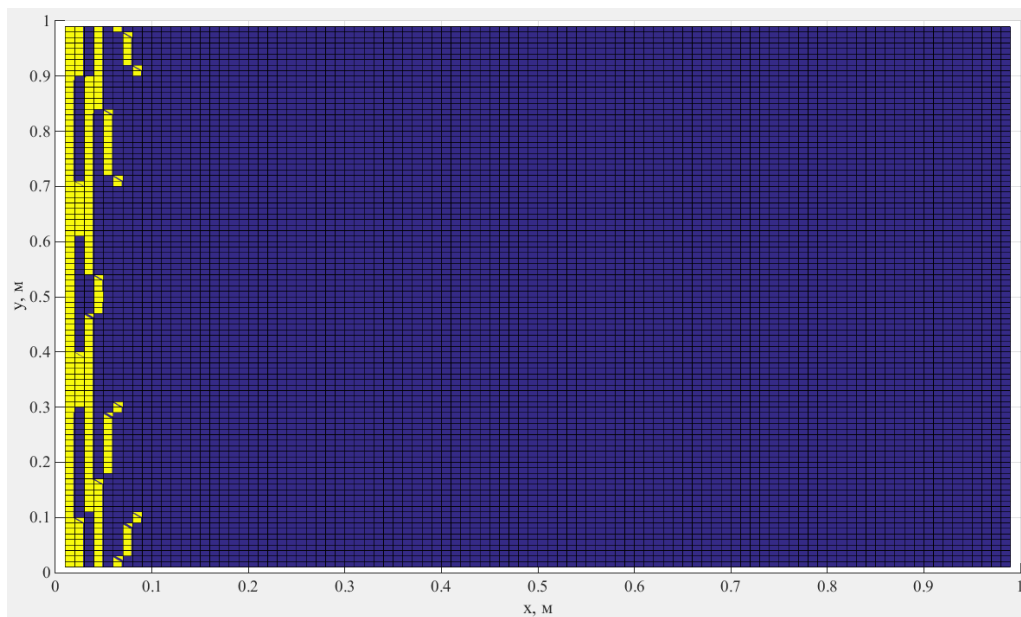


Рисунок 3.12. Графік загальної мертвої зони визначення сторін b та c

Отже, за результатами моделювання мертва зона не перевищує розміру $1000 \times 80 \text{ мм}^2$ та знаходиться праворуч бази a . Для компенсації визначеної мертвої зони рекомендовано врахувати її розмір при розробці системи координатної реєстрації.

Програмний код моделювання процесу визначення мертвої зони наведений в додатку В.

3.5. Калібрування ультразвукової системи координатної реєстрації по швидкості поширення ультразвукового сигналу

Визначення відстаней фазовим методи ґрунтується на визначення затримки ультразвукових коливань, а також на значенні швидкості поширення акустичного сигналу. Швидкість поширення ультразвуку величина не постійна, вона залежить від метеопараметрів зовнішнього середовища. Так, наприклад швидкість поширення ультразвукового сигналу за температури в 0⁰С становить 331 м/с, а за температури в 20⁰С – 343 м/с, тобто значення температури збільшується приблизно на 0.6 м/с на градус Цельсія. Тому доцільним є проведення калібрування системи за швидкістю поширення акустичного сигналу перед початком вимірювання координат положення датчика ВСНК.

Методика калібрування полягає в наступному:

1. Визначити дві опорні точки (відстань до яких відома заздалегідь),
2. Визначити з високою точністю відстань D_0 між опорними точками.
3. Використовуючи систему координатної реєстрації виміряти повний фазовий зсув Φ_0 , який накопичується при поширенні у середовищі на відстань D_0 .
4. Розрахувати поточне значення швидкості поширення ультразвуку в середовищі за формулою:

$$V = \frac{\omega \cdot D_0}{\Phi_0}, \quad (3.18)$$

Отримане значення швидкості ультразвуку (3.18) використовувати далі для визначення відстаней в системі координатної реєстрації.

За необхідності підвищення точності оцінювання швидкості (3.18) її визначення може бути повторене для інших баз з наступним усередненням результатів вимірів.

Блок-схема процесу калібрування для однієї точки наведена на рис.3.13.



Рисунок 3.11. Блок-схема процесу калібрування системи координатної реєстрації положення датчика ВСНК по швидкості

Калібрування системи координатної реєстрації за розглянутою методикою дасть можливість підвищити точність визначення як відстаней, так і координат положення датчика ВСНК на поверхні ОК.

Програмний код калібрування ультразвукової системи координатної реєстрації по швидкості поширення ультразвукового сигналу в додатку Г.

Висновки до третього розділу

Проведене у третьому розділі дослідження дає змогу зробити наступні висновки.

1. Використання багаточастотного фазового методу з використанням ЧСЗК в системах координатної реєстрації дає змогу визначати координати положення датчиків ВСНК з високою точністю. Для обраних вихідних даних визначення координат (x_A , y_A) в значній області може відбуватись з похибками, що не виходять за межі інтервалу ± 0.5 мм. Це уможливило використання ультразвукової системи координатної реєстрації в автоматизованих системах вихрострумового контролю.

2. Запропонована модель системи координатної реєстрації має мертву зону розміром в 1000×80 мм², що розташована та знаходиться праворуч бази a . Для забезпечення проектного розрізнення координат необхідно виключити можливість контролю в мертвій зоні.

3. Для підвищення точності визначення координат положення датчика НК запропонована методика калібрування швидкості поширення акустичного сигналу. Вона полягає в розрахунку швидкості поширення ультразвукового сигналу перед початком проведення процесу координатної реєстрації в залежності від метеопараметрів середовища.

4. Для забезпечення стійкої роботи ЧСЗК в умовах дії шумів необхідно удосконалити запропонований метод координатної реєстрації положення датчиків ВСНК.

5. Коректність запропонованих алгоритмів та методик підтверджено модельними дослідженнями, програмні коди яких наведені у додатках.

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ ЗА УМОВИ ДІЙ ШУМІВ

Проведені в попередньому розділі дослідження показали, що ультразвукова багаточастотна фазова система з використанням ЧСЗК має високу точність визначення координат положення датчиків НК при проведенні вихрострумовевого контролю, але також вказали на суттєву ваду, а саме низьку завадостійкість. Вирішення проблеми низької завадостійкості є головною метою четвертого розділу.

4.1. Розроблення структурно-логічної схеми ультразвукової фазової тришкальної системи двокоординатної реєстрації інформації

Структурно-логічна схема ультразвукової системи визначення координат положення датчика ВСНК багаточастотним фазовим методом з використанням ЧСЗК наведена на рис. 4.1.

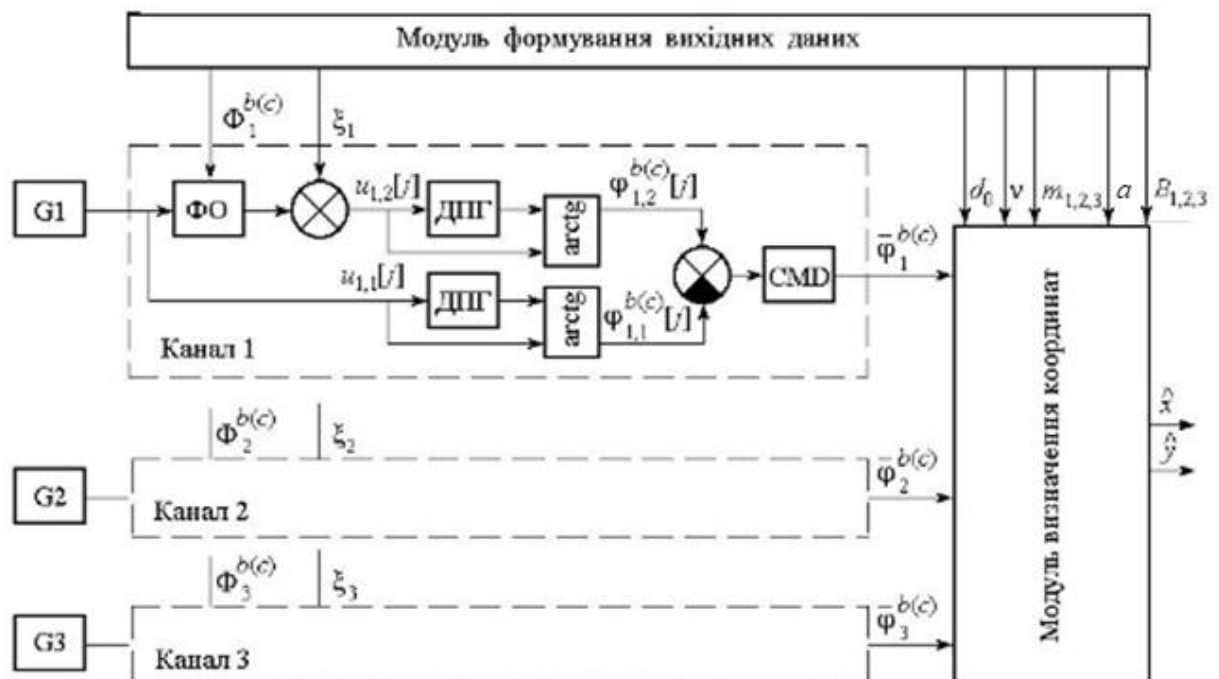


Рисунок 4.1. Структурно-логічна схема ультразвукової системи
двокоординатної реєстрації інформації

Генератор G1 формує два ультразвукових сигналів відомої частоти та амплітуди $u_{i,1}$ та $u_{i,2}$. Один з сигналів, а саме $u_{i,1}$ має шумову складову, а сигнал $u_{i,2}$ приймається опорним. Застосування до сигналів $u_{i,1}$ та $u_{i,2}$ дискретного перетворення Гільберта, дає змогу на кожній робочій частоті f_i (генерованої генераторами G1...G3) визначити різницю дискретних фазових зсувів сигналів $\varphi_i^{b,c}[j]$ для кожної зі сторін b та c в межах інтервалу $(0, 2\pi)$ (рис. 2.1).

Оскільки сигнали $u_{i,1}$ та $u_{i,2}$ в реальних системах мають шумову складову, яка спотворює амплітуду сигналу, тому доцільно використовувати метод фільтрації шумової складової, аналогічного до методу статистичного опрацювання кутових даних на площині [28, 29]. Такий метод реалізує оператор усереднення на колі фазових даних CMD (Circular Mean Direction), який представляється наступними формулами:

$$\bar{\varphi}_i^b = \mathbf{CMD}(\varphi_i^b[j]) = \arctg \frac{S_i^b}{C_i^b} + \frac{\pi}{2} \{2 - (\text{sign} S_i^b)(1 + \text{sign} C_i^b)\}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, J} \quad (4.1)$$

$$C_i^b = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \cos \varphi_i^b[j], \quad S_i^b = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sin \varphi_i^b[j], i = \overline{1, k}, j = \overline{1, J} \quad (4.2)$$

Застосування оператора усереднення фазових даних на колі (CMD) дає змогу перетворити послідовності дискретних фазових зсувів сигналів $\varphi_i^{b,c}[j]$, отриманих після дискретного перетворення Гільберта, в одне усереднене значення фазового зсуву між сигналом $u_{i,1}$ та опорним сигналом $u_{i,2}$ для кожної координати точки (x_A, y_A) об'єкту контролю на кожній частоті f_i .

Отримані значення фазових зсувів $\varphi_1^{b,c}$, $\varphi_2^{b,c}$ та $\varphi_3^{b,c}$ потрапляють на вхід модуля визначення координат, де обчислюються поточні значення лишків g_i ЧСЗК згідно п.3.3.1. Виходячи зі значення лишків та інших вхідних даних – дискретного кроку d_0 та ортонормованих базисів B_i , визначають відстані b та c . На основі методу трилатерації, знання бази a та визначених відстаней b та c визначають координати точки $\hat{x}$, $\hat{y}$ положення датчика ВСНК.

Як було зазначено в третьому розділі причиною появи голкоподібних викидів значень відстаней b та c є некоректне відновлення лишків g_i ЧСЗК. Використання оператора усереднення на колі (CMD) звісно покращить результат, але цього замало для забезпечення коректної роботи системи координатної реєстрації в умовах дії шумів тим більше при низькому відношенні сигнал/шум.

Для удосконалення процесу визначення лишків g_i ЧСЗК необхідно скоригувати процес округлення лишків в залежності від значення дробової частини фазового зсуву. Сутність методу узгодження лишків по трьом шкалам за використання вимірів фазових зсувів на трьох частотах графічно представлена на рис.4.2.

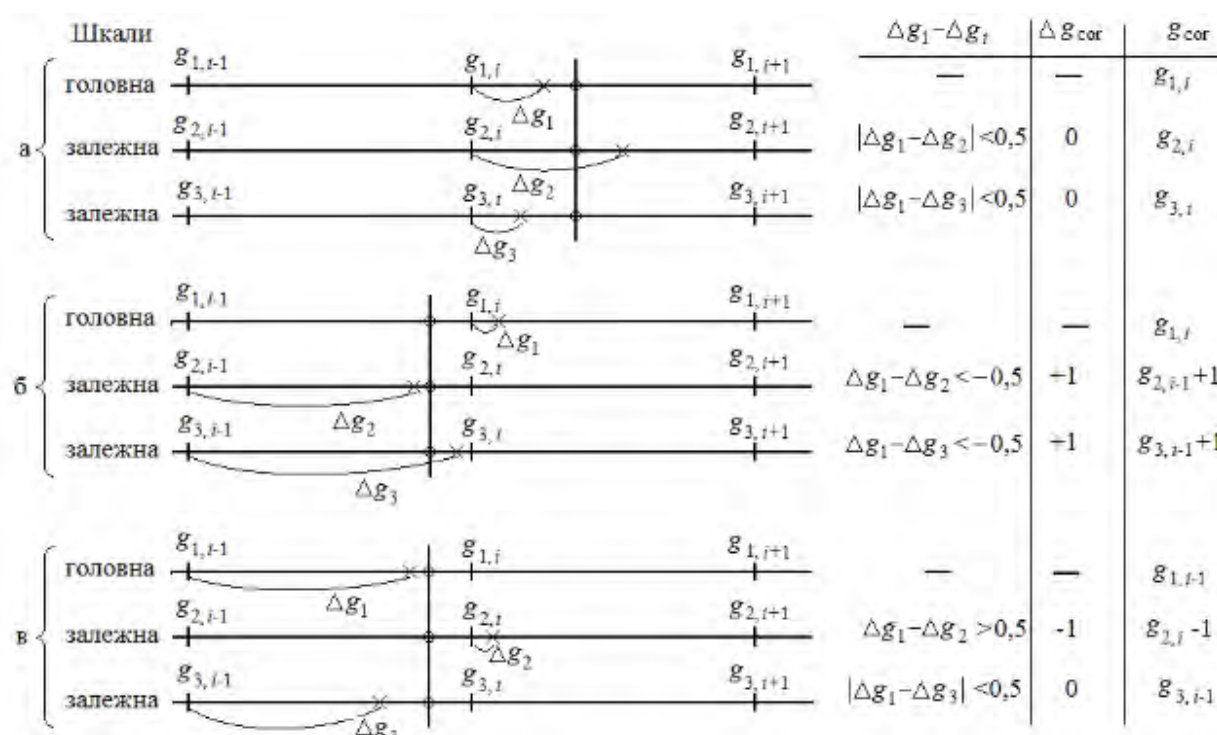


Рисунок.4.2. Узгодження лишків ЧСЗК для коригування грубих похибок визначення відстаней за результатами фазових вимірювань на трьох частотах

Процес узгодження лишків відбувається для даних, отриманих на двох частотах. Головною (веденою) вибирається найбільша частота (епюра а), що відповідає робочій частоті за найменшого значенню модуля m_i ЧСЗК. Розраховані лишки g_i на головній частоті не коригуються тобто вважаються не

спотвореними похибкою зумовленою дією шумів [29, 30]. На двох інших частотах (епюри б та в) отримані значення лишків коригуються згідно таблиці, наведеної на рис.4.2 за аналізом отриманої дробової частини лишків виду:

$$\Delta g_i(D) = \frac{\bar{\Phi}_i}{\Delta \varphi_i} - \left[\frac{\bar{\Phi}_i}{\Delta \varphi_i} \right]^+, i = \overline{1, n} \quad (4.3)$$

Кожна з епюр відповідає можливим варіантам обчислення лишків g_i ЧСЗК, так епюра «а» відповідає обчисленню лишків без впливу похибки зумовленої наявністю шумів, а епюри б та в відповідають можливим варіантам обчислення лишків за наявного впливу шумової складової сигналу. Також на рис.4.2 зазначені позначки на числовій осі з позначеними штрихами цілі числа g_{i-1}, g_i, g_{i+1} в вигляді кружечків та хрестиків на кожній зі шкал. Кружечки та хрестики відповідають істинним та спотвореним значенням лишків до їх округлення до цілого числа.

Значення параметра Δg_{cor} , наведеного в другому стовпці таблиці, вказує на напрям округлення лишків g_i . Тобто параметр Δg_{cor} може приймати три значення, а саме -1, 0 або +1, що відповідають: округленню в меншу сторону, без округлення та округлення в більшу сторону. Значення цього параметру розраховується згідно останнього стовпця таблиці та отриманої різниці між Δg_l та Δg_i за умови $i = \overline{2, n}$.

Використання коригованих лишків, отриманих згідно методу узгодження лишків ЧСЗК, дає змогу мінімізувати появу грубих помилок відновлення цілих чисел G^b та G^c лишками ЧСЗК за умови $\Delta \varphi_1 < 6\sigma_\varphi$, де σ_φ - середньоквадратична похибка виміру фазового зсуву.

Програмний код реалізації методу узгодження лишків наведений в додатку Д.

Удосконалена ультразвукова система двокоординатної реєстрації дає змогу визначати координати положення датчика ВСНК в умовах наявного низького відношення сигнал/шум з високою точністю. Отримані результати підтверджені проведеними модельними експериментами.

4.2. Моделювання процесу визначення координат на основі ЧСЗК та оцінка похибки визначення координат за наявності шумової складової сигналу

Моделювання відбувалось за наведеною структурно-логічною схемою, представленою на рис. 4.1 Для визначення координат використана схема з рис.2.1.

Процес моделювання системи координатної реєстрації в умовах дії шумів можна поділити на три етапи: підготовка вхідних даних, розрахунок координат та оцінювання завадозахищеності результату виміру координат в умовах наявності шуму.

На першому етапі моделювання були сформовані два косинусоїдні сигнали $u_{i,1}$ та $u_{i,2}$ з амплітудою в 1 В. Сигнал $u_{i,1}$ зашумлений шумом з гаусовим розподілом $\sigma_u = m$ ($m = (0.3, 0.4 \dots 1)$)В з нульовим математичним очікуванням. Другий сигнал $u_{i,2}$ – опорний (не спотворений дією шумів). З метою мінімізації впливу на результат виміру, координат та фазових зсувів, можливих відбиттів ультразвукових коливань від сторонніх предметів в околі зони контролю інтервал часу випромінювання сигналів не перевищував 10 періодів сигналів носія. Для т. А (рис.2.1) було задано масив координат розміром 1000x1000 точок, для кожної з яких були розраховані відстані b, c.

Використовуючи дискретне перетворення Гільберта, з наступним усередненням на колі оператором CMD, був сформований масив значень фазових зсувів φ_i на кожній з трьох частот f_i , отриманих для пар сигналів згідно заданих відстаней b_i та c_i , які отримані з сітки координат на поверхні об'єкта контролю з розміром комірки 1x1 мм

В досліді використані значення робочих частот f_i , кругових частот ω_i , ортонормованих базисів B_i та дискретів фазового зсуву $\Delta\varphi_i$ отримані раніше в п.3.3.1.

На другому етапі значення елементів масиву фазових зсувів $\varphi^{b,c}_i$ перетворюються в лишки g_i ЧСЗК, напрям округлення яких задається

методом узгодження лишків ЧСЗК. На основі узгоджених лишків ЧСЗК, ортонормованих базисів B_i та дискрету фазового зсуву $\Delta\varphi_i$ визначаються відстані b та c . Отримані значення відстаней вільні від спотворення шумом сигналів, отриманих на каналі випромінювач-приймач. Отримані відстані перераховуються в координати (x_A, y_A) положення датчика ВСНК.

На третьому етапі оцінюється завадостійкість системи координатної реєстрації, шляхом зміни значення $\sigma_u = m$ в діапазоні $m \in (0.3, 0.4 \dots 1)B$ та визначенні граничного значення відношення сигнал/шум (за гаусовою та прямокутною обвідною сигналу) за якого при відновленні значення фазового зсуву та координат не з'являються грубі помилки у вигляді голкоподібних викидів, тобто зберігається коректна робота системи координатної реєстрації в умовах дії шумів.

Програмний код моделювання наведений в додатку D.

Результати моделювання.

Для демонстрації ефективності використання удосконаленої числової системи залишкових класів, як засобу фільтрації шумової складової при вимірі повного фазового зсуву та координат, наведемо графіки порівняння результатів відновлення повного фазового зсуву сигналів, абсолютної похибки виміру повного фазового зсуву, та координат x_A та y_A (рис. 2.1) за використання удосконалення ЧСЗК та без нього.

На рисунку 4.3 показані графіки моделі сигналу $u_{i,1}$ амплітудою 1 В, який був згенерований випромінювачем ультразвукових коливань та зареєстрований приймачем, без впливу шумової складової (синім кольором) та за наявного відношенням сигнал/шум (відношення амплітуди сигналу до СКП шуму) = 2.5 за прямокутною обвідною сигналу (червоним кольором).

Зашумлений сигнал на рисунку 4.3 однозначно потребує подальшої фільтрації, оскільки сильно впливає на процес визначення лишків g_i числовою системою залишкових класів (значення лишків може відрізнятися на ± 1). Для цього доцільно використовувати метод узгодження лишків g_i (рис.4.2).

Підтвердження ефективності методу продемонстровано наступними графіками.

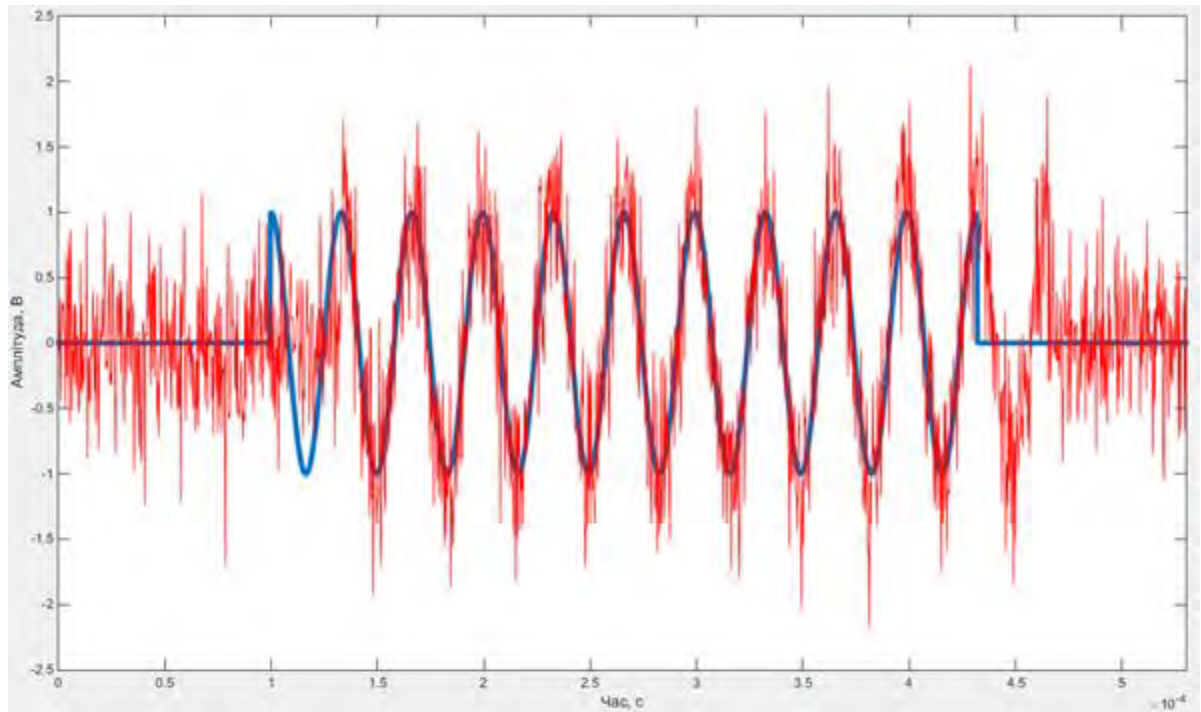
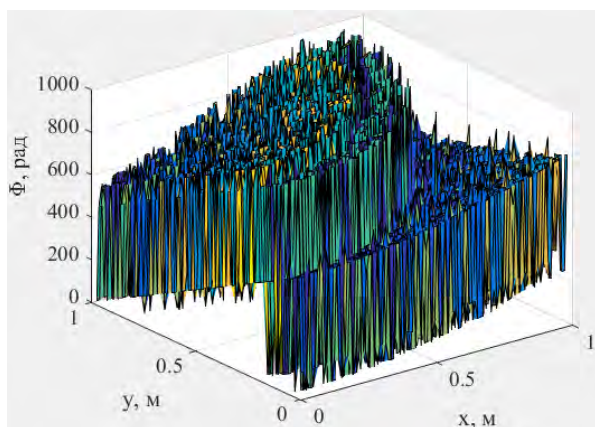


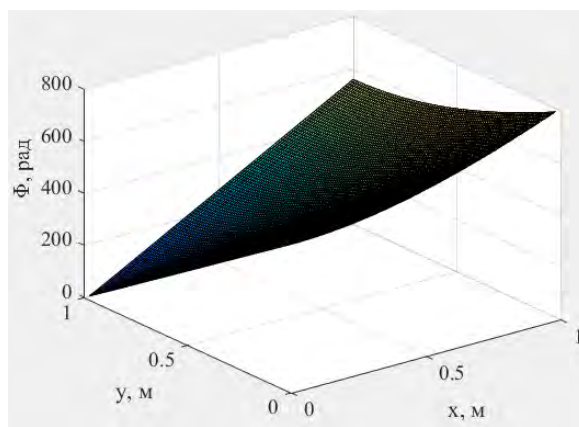
Рисунок 4.3. Графіки моделей прийнятого сигналу $u_{i,1}$ без шуму (синім) та за відношення сигнал/шум = 2.5 за прямокутною обвідною сигналу (червоним)

На рисунках 4.4 - 4.9 зображені графіки порівняння відновлених значень фазових зсувів, похибок визначення фаз, координат та похибок координат за відношення сигнал/шум = 2.5 (за прямокутною обвідною сигналу) без використання методу узгодження лишків ЧСЗК та з його використанням.

Як видно з рисунків 4.4 та 4.5 відновлений повний фазовий зсув Φ_i^b та Φ_i^c сторін b та c без використання удосконаленої системи залишкових класів (ЧСЗК) суттєво зашумлений у порівнянні з відновленим повним фазовим зсувом за використання удосконаленої ЧСЗК. Це підтверджує ефективність відновлення повного фазового зсуву ЧСЗК з використанням методу узгодження лишків для фільтрації шумової складової сигналу.

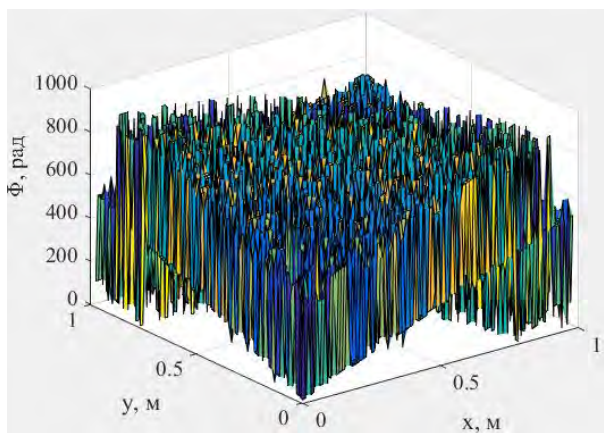


а

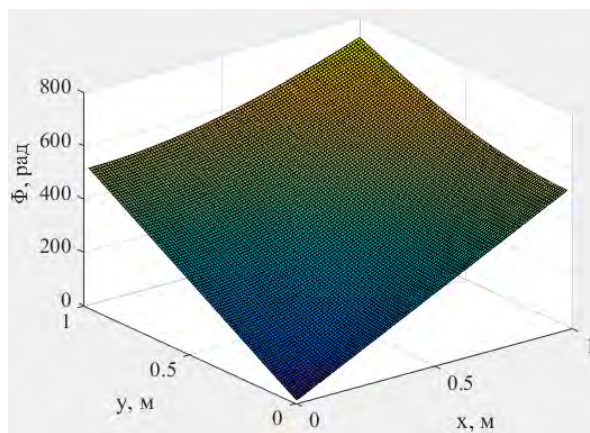


б

Рис. 4.4. 3D графіки відновленого повного фазового зсуву Φ_i^b для сторони b за відношення сигнал/шум = 2.5 без (а) та з використанням (б) методу узгодження лишків ЧСЗК

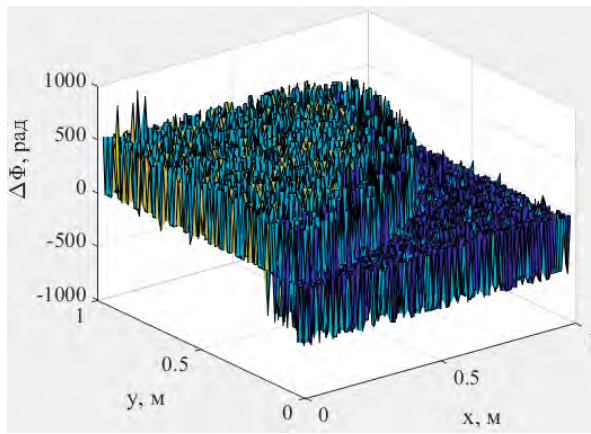


а

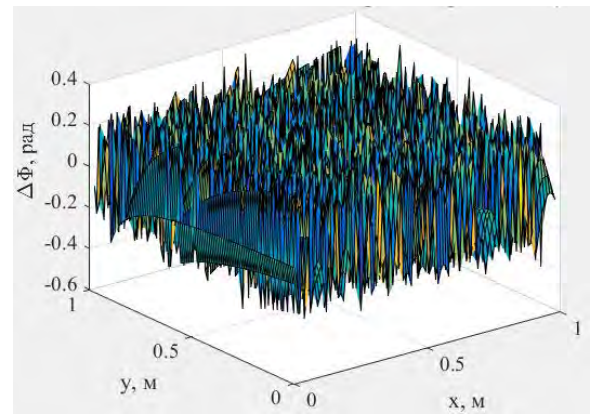


б

Рис.4.5. 3D графіки відновленого повного фазового зсуву Φ_i^c для сторони c за відношення сигнал/шум = 2.5 без (а) та з використанням (б) методу узгодження лишків ЧСЗК



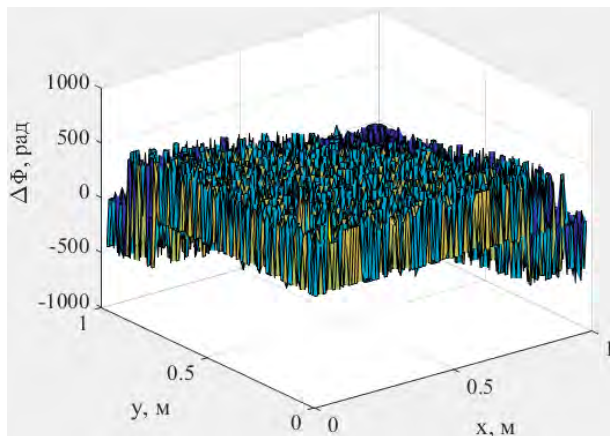
а



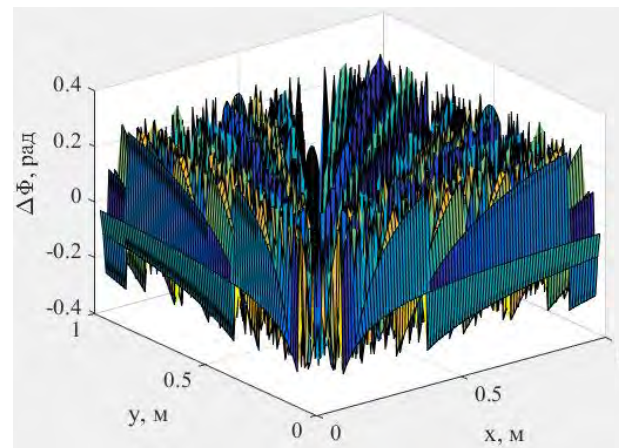
б

Рис. 4.6. 3D графіки абсолютної похибки відновлення фазового зсуву $\Delta\Phi_i^b$ для сторони *b* за відношення сигнал/шум не менше 2.5 без (а) та з використанням (б) методу узгодження лишків ЧСЗК

Рисунки 4.6 та 4.7 показують, що абсолютна похибка вимірювання повного фазового зсуву, за використання удосконаленої ЧСЗК (процесу узгодження лишків), знаходиться на рівні ± 0.3 рад, що відповідає 17° , а без її використання абсолютна похибка вимірювання повного фазового зсуву становить ± 500 рад для сторони *b* та *c* та є недопустимою при проведенні координатної реєстрації.

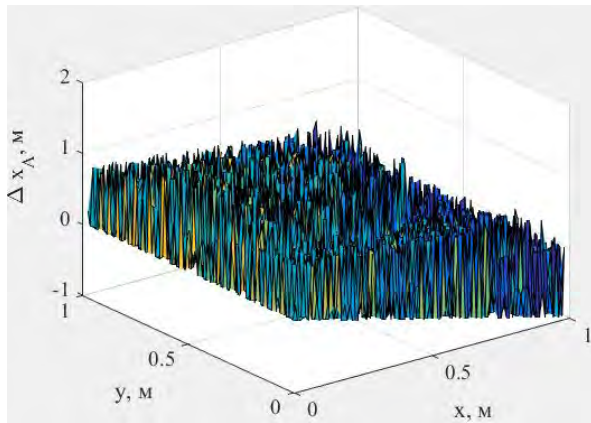


а

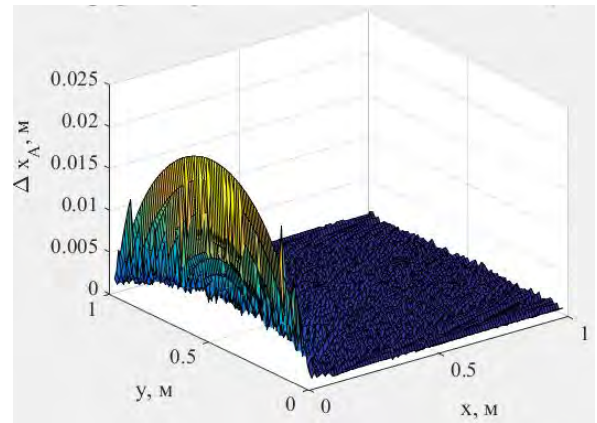


б

Рис.4.7. 3D графіки абсолютної похибки відновлення фазового зсуву $\Delta\Phi_i^c$ для сторони *c* за відношення сигнал/шум не менше 2.5 без (а) та з використанням (б) методу узгодження лишків ЧСЗК

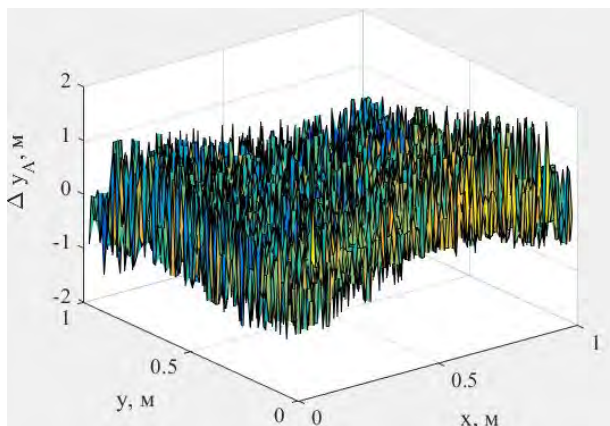


а

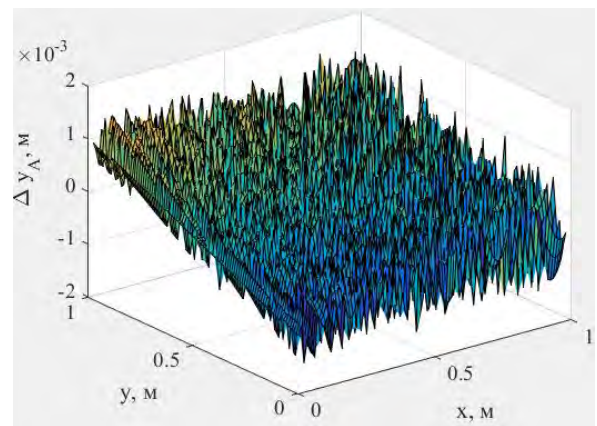


б

Рис.4.8. 3D графіки абсолютної похибки відновлення координати Δx_A за відношення сигнал/шум не менше 2.5 без (а) та з використанням (б) методу узгодження лишків ЧСЗК



а



б

Рис.4.9. 3D графіки абсолютної похибки відновлення координати Δy_A за відношення сигнал/шум не менше 2.5 без (а) та з використанням (б) методу узгодження лишків ЧСЗК

Проаналізувавши отримані графіки абсолютних похибок Δx_A та Δy_A можна визначити похибку оцінювання координат x_A та y_A за використання удосконаленого методу ЧСЗК та відношення сигнал/шум не менше 2.5. Таким чином, грубі похибки у визначення координат повністю усунуті, а максимальна абсолютна похибка $\Delta x_{A\max}$ у всій зоні контролю може сягати значень ± 1.4 мм, а для координати $\Delta y_{A\max} = \pm 2$ мм, що значно перевищує

результати отримані в попередньому розділі (без наявності шумової складової та методу узгодження лишків). Отримане значення максимальної похибки виміру координат x_A та y_A спостерігаються в околі бази a , тому цю область доцільно вважати мертвою зоною та врахувати її розмір під час реалізації системи координатної реєстрації.

Модельні дослідження показали, що за використання шуму з нормальним розподілом та інформаційного сигналу з прямокутною обвідною система двокоординатної реєстрації інформації здатна зберігати працездатність за наявності відношення сигнал/шум не менше 1.1, при цьому ймовірність появи грубих помилок (голкоподібних викидів) становить приблизно 10%.

Визначимо завадозахищеність системи координатної реєстрації за умови використання гаусової обвідної сигналу замість прямокутної обвідної сигналу.

На рисунку 4.10 показані графіки моделі сигналу $u_{i,1}$, який був згенерований випромінювачем ультразвукових коливань та зареєстрований приймачем, без впливу шумової складової (синім кольором) та за наявного відношення сигнал/шум = 2.5 за гаусовою обвідною сигналу (червоним кольором).

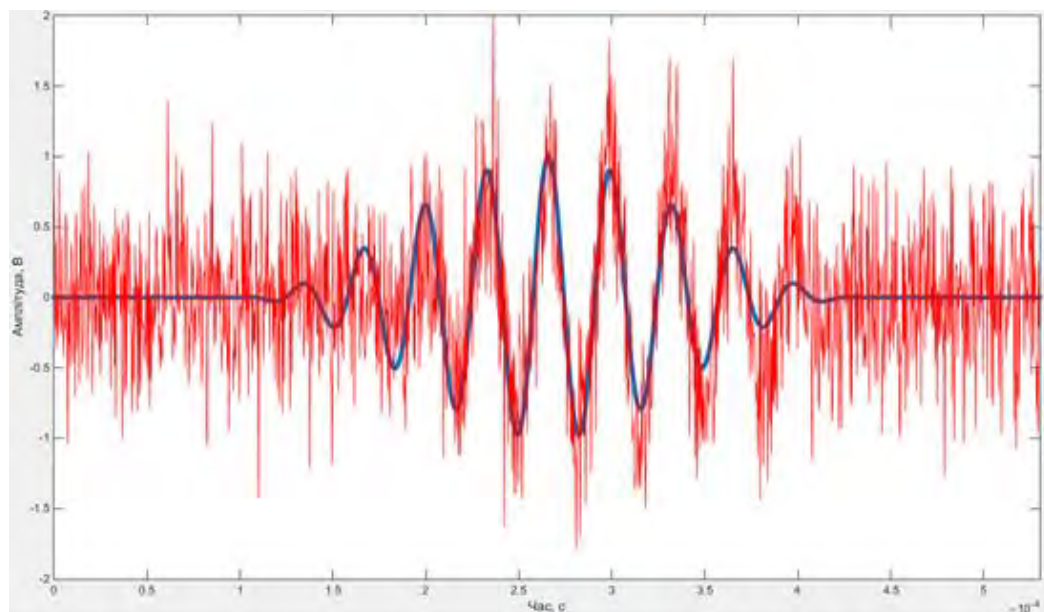


Рисунок 4.10. Графіки моделей прийнятого сигналу $u_{i,1}$ без шуму (синім) та за відношення сигнал/шум = 2.5 за гаусовою обвідною сигналу (червоним)

Модельні дослідження показали, що за використання шуму з нормальним розподіленням випадкової величини та гаусової обвідної сигналу система двокоординатної реєстрації інформації здатна зберігати працездатність за наявності відношення сигнал/шум не менше 2.5. при зменшенні цього значення при відновлення повного фазового зсуву та координат положення ВСНК з'являються голкоподібні викиди – грубі помилки. Для підтвердження цього наведемо наступні графіки.

На рис. 4.11 представлені графіки відновлення повної фази сигналу за відношення сигнал/шум = 2.5 (а) та при відношення сигнал/шум = 2 (б). Можна побачити, що за відношення сигнал/шум = 2 відновлена повна фаза сигналу має декілька голкоподібних викидів – грубих помилок, а сигнал з відношення сигнал/шум = 2.5 повністю відфільтрований від них, виходячи з цього можна підтвердити те, що відношення сигнал/шум не менше 2.5 є граничним за використання гаусової обвідної сигналу.

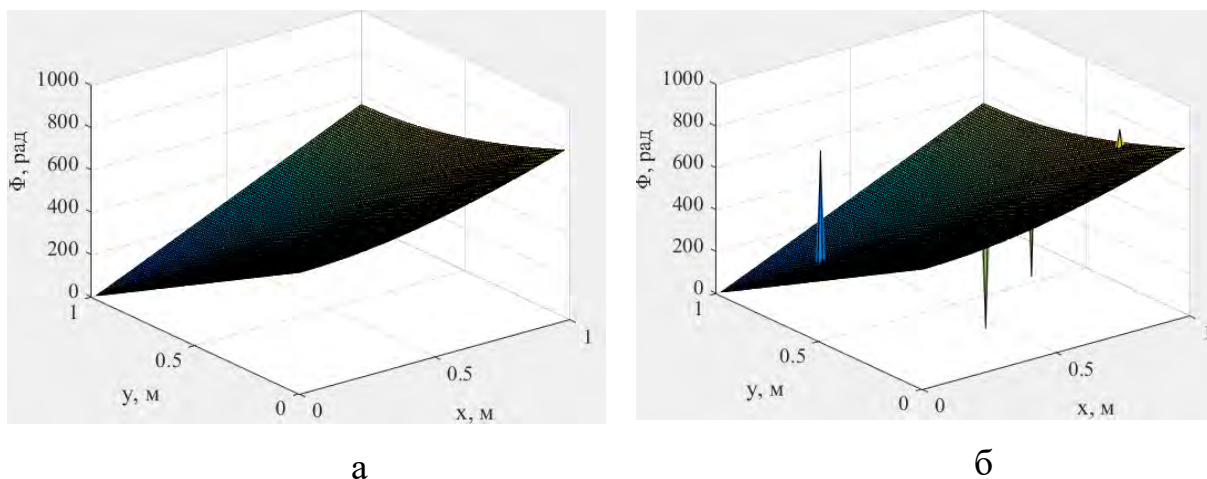


Рис.4.11. 3D графіки відновленого повного фазового зсуву Φ_i^b для сторони б за відношення сигнал/шум не менше 2.5 (а) та за відношення сигнал/шум не менше 2 (б)

Виходячи з результатів проведеного моделювання можна зробити висновок, що система координатної реєстрації з удосконаленою ЧСЗК дозволяє значно підвищити завадостійкість, що забезпечить можливість

вимірювання координат положення датчика ВСНК в умовах наявності низького відношення сигнал/шум.

4.3. Аналіз можливостей технічної реалізації запропонованої системи координатної реєстрації

4.3.1 Визначення основних характеристик базових елементів для реалізації акустичної підсистеми

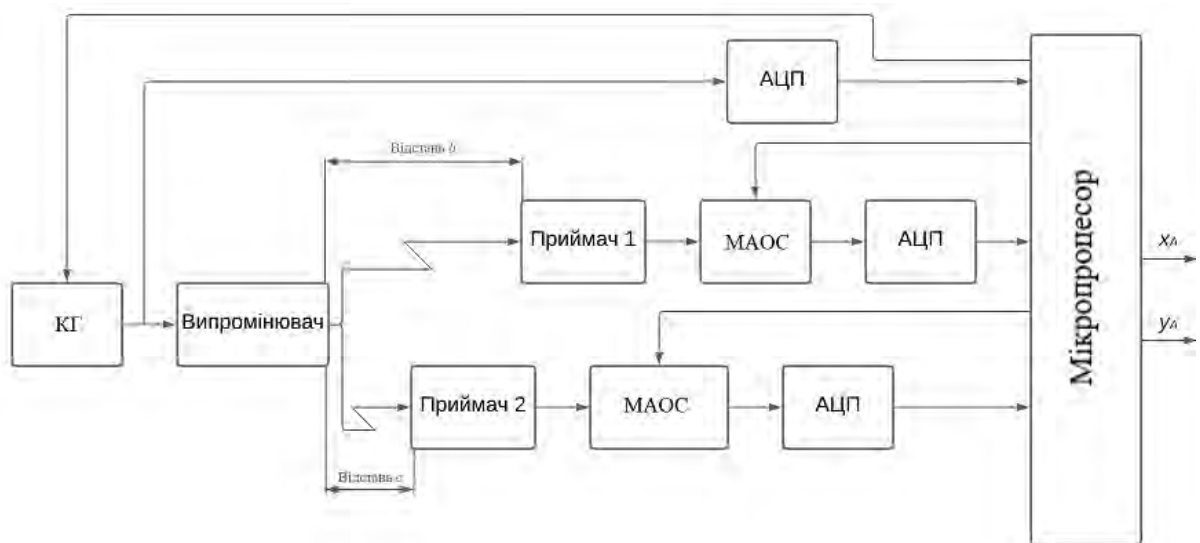


Рис.4.12. Структурна схема технічної реалізації системи двокоординатної реєстрації положення датчика ВСНК

На рис.4.12 наведена структурна схема технічної реалізації системи двокоординатної реєстрації, з керованого генератора (КГ), ультразвукового випромінювача конструктивно суміщеного з датчиком ВСНК, двох приймачів ультразвукових коливань (Приймач 1 та Приймач 2), двох модулів аналогової обробки сигналів, трьох аналогово-цифрових перетворювача (АЦП) та багатоканального мікропроцесора

Принцип дії полягає в наступному: Мікропроцесор задає частоту (до 40 кГц) керованого генератора синусоїдальних коливань, який генерує два сигнали. Перший (опорний) сигнал, поширюється дротом з наступним пропусканням через АЦП та перетворенням в цифровий код після чого обробляється мікропроцесором. Другий сигнал потрапляє в ультразвуковий

випромінювач, що випромінює отриманий сигнал по відстаням b і c , який реєструється приймачами 1 та 2 відповідно. Зареєстровані сигнали потрапляють в модуль аналогової обробки сигналів (МАОС), де фільтруються та підсилюються, після чого АЦП перетворює їх в цифровий код, отриманий цифровий код надходить на мікропроцесор.

В мікропроцесорі закладений алгоритм розрахунку координат багаточастотним фазовим методом на основі ЧСЗК, який полягає в визначенні фазового зсуву між опорним та зареєстрованим сигналом, на основі якого розраховуються відстані b і c . та визначаються координати (x_A та y_A) положення датчика ВСНК методом трилатерації.

На основі визначеної структурної схеми (рис.4.12) системи двокоординатної реєстрації визначимо основні характеристики для підбору базових елементів.

Випромінювач ультразвукових коливань бути реалізовані за наступними правилами:

Повинен випромінювати ультразвукові коливання частотою до 40 кГц та мати кругову діаграму напрямленості до 360^0 , за використання меншої діаграми напрямленості необхідно забезпечити наявність маркерів на датчику ВСНК для забезпечення правильного позиціювання;

Дальність випромінювання ультразвукових коливань повинна бути не менше ніж 1.3 м, з врахуванням мертвою зони приймачів ультразвукових коливань.

Приймачі ультразвукових коливань повинні реєструвати ультразвукових коливань частотою до 40 кГц та мати кругову діаграму напрямленості до 180^0 , за якої охоплюється весь об'єкт контролю та наявна найменша мертва зона приймачів ультразвукових коливань.

У випадку використання діаграми напрямленості менше 180^0 необхідно забезпечити, завдяки використанню крокових двигунів, щоб загальний кут поворот приймача для охоплення зони приймання становив 180^0 .

Модуль аналогової обробки сигналів може повинен забезпечувати фільтрацію та підсилення сигналу, він має в своєму складі фільтр низьких частот (ФНЧ) та керований підсилювач, який повинен мати керований коефіцієнт підсилення.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) повинен бути 12 бітним для забезпечення необхідної точності та мати частоту дискретизації не менше 60 кГц.

Мікропроцесор повинен бути багатоканальним, для забезпечення послідовного порівняння прийнятих сигналів з опорним, а також може містити в собі аналого-цифровий перетворювач та підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення.

4.3.2 Надання рекомендації по вибору конкретної моделі приймачів та випромінювачів ультразвукових коливань по визначених характеристикам

На практиці вибір базових елементів відрізняється від ідеальних згідно теоретичних виводів. Вибір елементної бази залежить не тільки від існування випромінювача чи приймача з тією чи іншою частотою, розмірами чи діаграмою напрямленості, а також від їх доступності та ціни.

Так, наприклад в вільному продажу відсутні приймачі ультразвукових коливань з круговою діаграмою напрямленості більше ніж 135^0 , тому реалізація системи координатної реєстрації за використання таких приймачів буде мати мертву зону, яку потрібно розрахувати перед побудовою пристрою.

На рисунку 4.12 представлена геометрична модель визначення мертвої зони приймачів ультразвукового сигналу в т.В та т.С встановлені приймачі ультразвукового сигналу з кругової діаграмою напрямленості в 135^0 . В т.А знаходиться випромінювач ультразвукових коливань, координати якого необхідно визначити. Також на графіку позначень a ($a = L = 1$ м) – база, b та c відстані від приймачів до т.А.

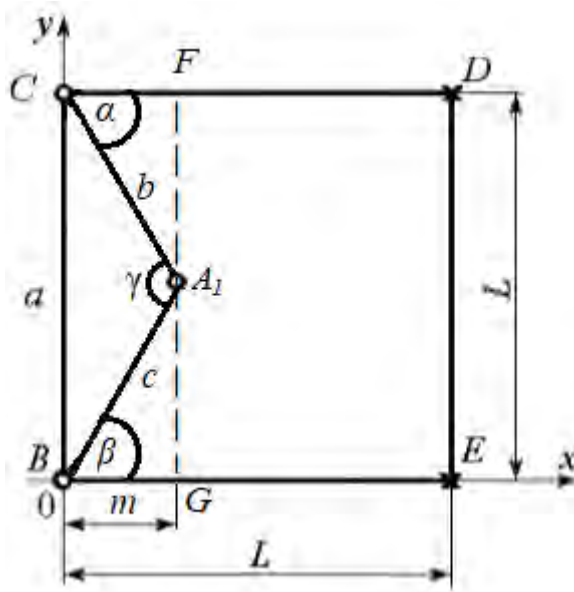


Рисунок 4.12. Геометрична модель визначення мертвої зони приймачів
ультразвукового сигналу

Так як обидва приймачі мають однакову кругову діаграму напрямленості в 135^0 тому кути α та β однакові та становлять 67.5^0 . Виходячи зі значень кутів α та β можна визначити кут γ , який становить 135^0 . За таких умов т.А стає найпроблемнішою, а відстань m відповідає довжині мертвої зони, яка розраховується за наступною формулою.

$$m = \sqrt{\frac{a^2 - a^2 \cdot \sin(\gamma)^2}{4 \cdot \sin(\gamma)^2}} = \sqrt{\frac{1000^2 - 1000^2 \cdot \sin(67.5^0)^2}{4 \cdot \sin(67.5^0)^2}} = 207.1 \text{ мм}.....(4.1)$$

Прямокутник BCFG відповідає площині мертвої зони, тобто області в якій не можливо вимірювати координати. Розмір прямокутника BCFG не повинен перевищувати розміру $1000 \times 207.1 \text{ мм}^2$, який необхідно врахувати при побудові системи координатної реєстрації.

Враховуючи вищесказане дальність генерування ультразвукових коливань випромінювачем повинно досягати не менше ніж 1.3 м при дослідженні об'єкта контролю розміром в 1 м ($L = 1 \text{ м}$).

Для реалізації системи координатної реєстрації можна використовувати такі моделі випромінювачів ультразвукового сигналу:

Ультразвуковий випромінювач US40KT-01. Він дозволяє генерувати ультразвуковий сигнал частотою до 40 кГц на відстань до 2 м, а також має кругову діаграму напрямленості в 360^0 , тому може бути використаний в системі координатної реєстрації інформації та в системах визначення відстаней до об'єктів, крім цього завдяки низькій ціні він може бути гарним вибором в бюджетних системах координатної реєстрації.

Для реалізації системи двокоординатної реєстрації можна використовувати такі приймачі ультразвукового сигналу:

- Ультразвуковий приймач-випромінювач 400EP14D. Дозволяє випромінювати/приймати ультразвукові коливання частотою до 40 кГц та має кругову діаграму напрямленості в 135^0 по горизонталі.
- Ультразвуковий приймач-випромінювач 400EP125. Дозволяє випромінювати/приймати ультразвукові коливання частотою до 40 кГц та має кругову діаграму напрямленості в 125^0 по горизонталі.

Обидва приймачі ультразвукових коливань будуть гарними парами до представленої моделі випромінювача ультразвукових коливань та можуть бути реалізовані в системах координатної реєстрації інформації.

Виходячи з визначених характеристик АЦП, рекомендованими моделями є 4 каналний MAX22531 зі швидкістю 20 кбіт/с на кожному каналі та 4 каналний високошвидкісний (1,65 мкс) AD7864, обидва запропоновані варіанти дозволяють проводити одночасне перетворення аналогового сигналу в цифровий код на кожному з каналів та мають частоту дискретизації не менше 60 кГц.

Модуль аналогової обробки сигналів може бути реалізований з фільтра низьких частот та з, підсилювача MC3403 завдяки наявності 4 операційних підсилювачів він дозволяє отримати високий коефіцієнт підсилення, значення якого можна змінювати наприклад, за допомогою потенціометрів керованих мікропроцесором.

Для реалізації системи двокоординатної реєстрації доцільно використовувати 12-бітний багатоканальний мікропроцесор марки ATtiny826 з вбудованим 12-бітним багатоканальним (15 каналів) АЦП зі швидкістю 375 кбіт/с, який здатний забезпечити частоту не менше 60 кГц, фільтром низьких частот (ФНЧ) та підсилювачем з програмованим коефіцієнтом підсилення (від 1 до 16). Застосування запропонованого мікропроцесора дасть змогу реалізувати систему координатної реєстрації без використання додаткових мікросхем.

Висновки до четвертого розділу.

Проведене у четвертому розділі дослідження дає змогу зробити наступні висновки.

1. Запропоновано метод удосконалення ЧСЗК метдом узгодження лишків g_i , який полягає в визначенні правил округлення значень лишків g_i ЧСЗК згідно аналізу дробової частини відношення фазового зсуву до дискрету фазового зсуву. Завдяки використанню цього методу, в результаті правильного округлення лишків ЧСЗК, усуваються грубі помилки відновлення повного фазового зсуву Φ_i , та визначення координат (x_A, y_A) за низького відношення сигнал/шум.

2. Модельні експерименти визначили, що використання системи двокоординатної реєстрації інформації з використанням удосконаленої, методом узгодження лишків, ЧСЗК дозволяє відновити повний фазовий зсув Φ_i , та визначити координати (x_A, y_A) положення датчика ВСНК без наявних грубих помилок (голкоподібних викидів) за наявності відношення сигнал/шум не менше 1.1 за використання прямокутної та не менше 2.5 за використання гаусової обвідної сигналу, за умови наявності шуму з нормальним розподілом випадкової величини.

3. Розроблено структуру апаратної частини засобу запропонованої багаточастотної фазової системи двокоординатної реєстрації інформації на

основі ЧСЗК, та надано рекомендації по вибору елементної бази для її реалізації. Запропоновано використати ультразвуковий випромінювач частотою до 40 кГц з круговою діаграмою напрямленості в 360^0 марки US40KT-01, приймач-випромінювач 400EP14D частотою до 40 кГц з круговою діаграмою напрямленості в 135^0 . Для опрацювання фазових даних та визначення координат положення датчика НК запропоновано використовувати мікропроцесор типу ATtiny826.

4. Розраховано площу мертвої зони приймача ультразвукових коливань з круговою діаграмою напрямленості в 135^0 для якого вона становить $1000 \times 207.1 \text{ мм}^2$, отримане значення площі мертвої зони необхідно враховувати при визначенні мінімальної допустимою відстані між випромінювачем та базою *a*.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Цей розділ присвячено реалізації першого етапу розроблення стартап-проєкту, а саме проведенню маркетингового аналізу з метою визначення можливості ринкового впровадження результатів роботи. Проведення маркетингового аналізу було виконано згідно алгоритму наведеного в [29] та складається з наступних етапів.

1. Опис ідеї проєкту;
2. Технологічний аудит ідеї проєкту;
3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап - проєкту;
4. Розроблення ринкової стратегії проєкту;
5. Розроблення маркетингової програми стартап - проєкту.

5.1. Опис ідеї проєкту

Для автоматизації систем, які мають на меті визначення положення (координат) різних об'єктів застосовують системи координатної реєстрації. Спектр використання систем координатної реєстрації інформації досить різноманітний визначення положення об'єктів в геодезичних задачах, проєктування роботизованих систем, визначення координат положення датчиків НК в засобах неруйнівного контролю тощо. Наприклад, за використання таких систем в засобах проведення неруйнівного контролю вони дозволяють не тільки усунути вплив суб'єктивної похибки на результат виміру, а також дають змогу будувати В- та С- скани, відслідковувати розвиток виявлених дефектів, та визначати координати з більшою точністю та достовірністю.

Можливі напрямки використання розробленого проєкту, зміст ідеї та вигоди для користувачів наведені в таблиці 5.1.

Згідно таблиці 5.1 головним напрямом використання автоматизованої системи – застосування в засобах неруйнівного контролю, тому головними

користувачами є підприємства спеціалізовані на проведенні неруйнівного контролю.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проєкту[29]

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Автоматизація системи неруйнівного контролю на основі використання системи координатної реєстрації інформації.	Засоби неруйнівного контролю	Автоматизована система забезпечує можливість побудови В- та С- сканів, та дозволяє визначати координати з більшою точністю та достовірністю.

Наступним кроком опису ідеї проєкту є аналіз техніко-економічних переваг ідеї проєкту порівняно із пропозиціями конкурентів.

Визначимо список з головних конкурентів, що вже впроваджені на ринок:

1. Keyence Corporation;
2. "ЭХО+";
3. Olympus.

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту [29].

<i>№ п/п</i>	<i>Техніко- економічні характери- стики ідеї</i>	<i>(потенційні) товари/концепції конкурентів</i>				<i>W (слабка сторона)</i>	<i>N (нейтральна сторона)</i>	<i>S (сильна сторона)</i>
		Мій проєкт	Keyence Corporatio n	"ЭХО+"	Olympus			

1.	Вартість	20000	30000	26000	27000			+
2.	Швидкість алгоритму розрахунку	140 ns	220ns	150ns	160ns		+	
3.	Точність визначення координат	± 0.5 мм	± 1 мм	± 1.2 мм	± 1 мм			+
4.	Кількість координат	2 (x, y)	3 (x, y, z)	3 (x, y, z)	3 (x, y, z)	+		
5.	Завадостій- кість	Відно- шення $c/\text{ш} \geq 1.1$	Відно- шення $c/\text{ш}$ ≥ 1.15	Відно- шення $c/\text{ш} \geq 1.2$	Відно- шення $c/\text{ш} \geq 1.2$			+

За результатами таблиці 5.2 можна зробити висновок, що в порівняння із головними конкурентами основною перевагою проєкту є вартість, завадозахищеність та точність визначення координат положення об'єктів, а основним недоліком є можливість вимірювати лише 2 координати. Отримані переваги та недоліки дають змогу сформуванню конкурентоспроможності проєкту.

5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

Наступним кроком алгоритму є проведення аудиту технології, яка дасть змогу реалізувати ідею проєкту. Для цього необхідно визначити за якими технологіями буде виготовлений товар, визначити в якому стані вони знаходяться (чи існують вони, завершені або знаходяться в розробці), а також визначити доступність цих технологій.

Проведений технологічний аудит, наведений в таблиці 5.3, дозволяє зробити висновок, що ідею проєкту можна реалізувати в повній мірі так як на ринку наявні необхідні для її реалізації технології.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту [29]

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступ- ність технологій</i>
1.	Автоматизація системи неруйнівного контролю на основі використання системи координатної реєстрації інформації.	Розробка програмного коду визначення координат датчика НК на основі фазових вимірів	Наявна	Доступна
2.		Замовлення приймачів та випромінювача ультразвукового сигналу	Приймачі та випромінювач доступні у дистриб'юторів та виробників	Недоступна
3.		Виготовлення друкованої плати	Доступні у виробників друкованих плат	Недоступна
4.		Замовлення мікропроцесора та іншого електричного обладнання	Мікропроцесори та електричне обладнання доступне у	Недоступна

			дистриб'юторів та виробників	
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: компоненти приладу, які недоступні до виготовлення, будуть закуповуватись у виробника або у дистриб'юторів даних товарів. Програмне забезпечення для продукту буде розроблене та інтегроване в мікропроцесорну техніку власноруч . Збірка, налаштування та монтаж компонентів на друковану плату здійснюється індивідуальна для кожного виробу.				

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В цьому підрозділ основне питання присвячується визначенню ринкових можливостей та ринкових загроз реалізації стартап-проекту, а також дозволяє визначити напрями розвитку проекту на основі стану ринкового середовища, потреб та пропозицій конкурентів.

Першим кроком є аналіз попиту на продукт тобто визначення наявності попиту, обсягу попиту та динаміку розвитку ринку.

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту [29]

<i>№ п/п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн	~ 5 млн
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція існуючих компаній
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Загальні технічні умови

6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%
----	---	-----

Дані аналізу попиту занесені в таблицю 5.4. Згідно аналізу результатів можна відмітити малу кількість конкурентів за високого показника обсягу продаж, що вказує на стабільний ринок. При цьому попит на дану продукцію зростає з кожним роком, що робить ринок привабливим для входження.

Наступним кроком є проведення аналізу потенційних груп клієнтів, а також складання орієнтованого переліку вимог до товару для кожної групи клієнтів (таблиця 5.5). Враховуючи вимоги до товару можуть бути змінені характеристики продукту для забезпечення потреб клієнтів тим самим продукт отримає свою клієнтську базу.

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту [29]

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1.	Збільшення точності та достовірності визначення координат положення датчика НК в умовах наявності низького ВСШ	Підприємства, що спеціалізуються на проведенні, ультразвукового та вихрострумового неруйнівного контролю, а також виробники автоматизованих	Може бути у складі як стаціонарної так і мобільної системи НК. Конфігурування пристрою під конкретний виріб	Адаптивність; Надійність; Висока точність визначення координат положення датчика НК; зберігання працездатності за низького

		засобів НК		відношення с/ш.
--	--	------------	--	--------------------

Згідно результатів таблиці 5.5, можна зробити висновок, що потенційними клієнтами можуть стати підприємства, які використовують засоби НК для проведення ультразвукового та вихрострумowego НК, а також фірми, які розробляють засоби автоматизованого НК. Головними вимогами до продукту можна вважати високу точність визначення координат, а також зберігання працездатності в умовах низького відношення сигнал/шум.

З метою забезпечення більш успішного виходу продукції на ринок збуту з'являється необхідність визначення можливих загроз, а також їх способів уникнення або вирішення ще на початковому етапі стартап-проєкту (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6. Фактори загроз [29]

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Конкуренція	Поява нових конкурентів з меншими цінами на продукцію	Збільшення конкурентоспроможності товару; Змінити конкурентну стратегію.
2.	Відсутність попиту	Відсутність потреби купувати даний продукт	Визначення потреб клієнтів за допомогою опитувань та прийняти міри для забезпечення їхніх вимог.
3.	Клієнтська база	Так як ринок неруйнівно-го контролю в Україні досить малий тому розширення клієнтської бази під сумнівом	Проведення семінарів, тренінгів, виставок тощо, з метою залучення клієнтів; Перехід на західні ринки

			неруйнівного контролю.
4.	Зміни в стандартизації	Зміни в ДСТУ	Модернізація продукту згідно змін в ДСТУ.
5.	Вартість досліджень	Висока вартість проведення нових досліджень	Додаткові витрати на проведення дослідження
6.	Якість	Не задоволення потреб клієнтів	Збільшення якості з метою покращення конкурентноспроможності продукту

Проаналізувавши дані з таблиці 5.6, можна зробити висновок, що головними можливими загрозами є наявність конкуренції. Поява нових конкурентів зумовлює необхідність в зміні конкурентної стратегії або в проведенні нових досліджень, що дозволить збільшити конкурентну спроможність продукту.

Крім факторів загроз також необхідно провести аналіз потенційних можливостей, які сприяють ринковому впровадженню проекту та надають проекту право на конкуренцію серед інших гравців ринку. (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7. Фактори можливостей [29]

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Економічність	Низька ціна товару в порівнянні з цінами конкурентів	Створення жорсткої конкуренції на ринку
2.	Збільшення попиту	Збільшення зацікавлених клієнтів в покупці даної продукції	Можливість отримання як вітчизняних так і іноземних інвестицій
3.	Новизна	Залучення нових	Оголошення

	запропонованої технології	технологій у процес виробництва підвищує його ефективність та ККД	отриманої новизни головною перевагою продукції, з метою залучення нових клієнтів новизною.
4.	Сервісне обслуговування	Потреба в щорічному обслуговуванні проданого товару	Проведення безоплатного обслуговування продукції з метою залучення нових клієнтів.
5.	Інвестиції	Залучення як вітчизняних так і іноземних інвестицій	Збільшення витрат на дослідження та маркетинг.

Проаналізувавши дані з таблиці 5.7 можна визначити, що основними сприятливими можливостями є збільшення попиту, економічність, а також новизна продукції. Збільшення попиту може призвести до залучення інвесторів, які дозволять вивести стартап-проект на новий рівень, а економічність забезпечить конкурентоспроможності даної продукції.

Наступним кроком є проведення аналізу пропозиції, який полягає в визначення загальних рис конкуренції на ринку (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [29]

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентно спроможною)</i>
1. Тип конкуренції - олігополія	В галузі домінують декілька підприємств	Забезпечення якісної продукції, проведення

		правильної цінової політики та забезпечення якісного щорічного обслуговування товару.
2. Рівень конкурентної боротьби міжнародна	Конкуренція фірм на міжнародному рівні	Вихід на міжнародний ринок
3. Галузевою ознака - внутрішньогалузева	Товар призначений для використання в одній галузі	Проведення рекламних компаній з метою залучення нових клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів. - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Забезпечення відповідності товару вимогам користувачів
5. Характер конкурентних переваг - нецінова	Товар в основному характеризується технічними властивостями	Покращення технічних характеристик приладу зі зберіганням вартості продукції
6. Інтенсивністю - марочна	Конкуренти пропонують подібні продукти	Створення товарного знаку, проведення рекламних компаній.

По отриманих даних з таблиці 5.8 можна зробити висновок про наявність олігопольного ринку, тому процес впровадження в нього новостворених підприємств значно потребує великих інвестицій. Конкуренція між підприємствами є міжнародною та внутрішньогалузевою.

Використовуючи модель 5 сил М. Портера можна провести більш детальний аналіз конкуренції в галузі (таблиця 5.9).

Таблиця 5.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером [29]

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	Keyence Corporation; "ЭХО+"; Olympus.	Eagle Wings Enterprises	DigiKey PCBWay Mouser	Підприємства, які проводять неруйнівний контроль та розробляють засоби НК	Ручні системи координатної реєстрації .
Висновки :	Наявна досить сильна конкуренція. Мають великий досвід продаж в межах країни та налагоджені канали збуту.	Є можливості виходу на ринок, Є потужний конкурент зі світовим визнанням та багатим досвідом роботи в галузі НК.	Постачальники можуть диктувати ціну на свої товари та послуги.	Клієнти встановлюють ціновий діапазон продукції, а також вимоги до функціонування приладу.	Використання замінників призведе до зниження технічних характеристик засобів НК, тому вплив на попит не значний.

За результатами аналізу (таблиця 5.9) можна зробити висновок, що не зважаючи на сильну конкуренцію товар може зайняти своє місце на ринку неруйнівного контролю. До основними перевагами продукту відноситься економічність, тобто низька ціна та собівартість, а також високе значення основних технічних характеристик (похибки визначення координат, завадостійкість), які дозволять продукту стати хорошим засобом удосконалення автоматизованих систем НК.

Далі за результатами проведеного аналізу конкуренції (таблиця 5.9) враховуючі характеристики ідеї (таблиця 5.2), а також вимог клієнтів (споживачів) до товару (таблиця 5.5) та факторів маркетингового середовища (таблиці 5.6 та 5.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності [29]

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспро- можності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1.	Вартість	Низька ціна за високої якості. Низька собівартість одиниці продукції
2.	Технічні характеристики	Точність та висока завадостійкість дозволить використання продукту в багатьох системах НК
3.	Новизна приладу	Нова технологія дозволить зацікавити клієнтів та зробити проєкт більш гнучким в промисловості
4.	Якість продукту	Висока якість продукції дозволить забезпечити довготривалу експлуатацію
5.	Сервісне обслуговування	Проведення щорічного безоплатного сервісного обслуговування

За визначеними факторами конкурентоспроможності, згідно даних таблиці 5.10, проводиться аналіз слабких та сильних сторін стартап-проєкту, дані якого занесені в таблицю 5.11.

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін
«Системи координатної реєстрації положення датчиків НК» [29]

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у по-рівнянні з "ЭХО+"						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Вартість	16					+		
2.	Технічні характеристики	19						+	
3.	Новизна приладу	10				+			
4.	Якість продукту	16					+		
5.	Сервісне обслуговування	12			+				

Згідно результатів аналізу сильних та слабких сторін стартап-проєкту (таблиця 5.11) можна зробити висновок, що за факторами конкурентоспроможності продукт має переваги по трьом з п'яти пунктів: по вартості, то технічним характеристикам, а також по якості, тому проєкт може стати конкурентоспроможним на ринку приладів неруйнівного контролю. На жаль сервісне обслуговування відстає від конкурента, тому покращення сервісного обслуговування дозволить перегнати конкурента по всіх пунктах.

Завершальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту є проведення SWOT – аналізу, полягає в визначенні матриці аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей впровадження стартап-проєкту. SWOT – аналіз представляють в вигляді квадрата розділеного на чотири квадранта в кожній з яких розглянутий кожен елемент SWOT (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту [29]

Сильні сторони: - Адаптивність; - Низька ціна; - Високі технічні характеристики; - Висока якість продукції. - Наявність щорічного безоплатного обслуговування	Слабкі сторони: - Продукт новий, тому ще не зарекомендував себе на ринку; - Збільшення конкуренції на ринку; - Поява нових технологій.
Можливості: - Збільшення обсягу продажів; - залучення нових клієнтів; - залучення у сферу товарів та послуг неруйнівного контролю; - Покращення технічних характеристик приладу;	Загрози: - Наявність у конкурентів продукції більшої якості за меншої вартості; - Відсутність клієнтської бази; - Політико-економічний стан в країні; - Зниження доходів потенційних споживачів.

На основі SWOT – аналізу, наведеного в таблиці 5.12, було розроблено альтернативи ринкової поведінки з метою виведення стартап-проекту на ринок неруйнівного контролю, а також було визначено орієнтовний час ринкової реалізації продукту з врахуванням можливості появи на ринку потенційних товарів конкурентів. На основі визначених строків та ймовірності отримання ресурсів проводиться аналіз визначених альтернатив. Отримані результати занесені в таблицю 5.13.

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту [29]

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Покращення технічних характеристик пристрою	Середня	1.5 роки
2.	Покращення якості продукції	Висока	8 місяці

Проаналізувавши дані таблиці 5.13 можна обрати альтернативу, яка має найбільшу ймовірність отримання ресурсів за менший проміжок часу. Такою альтернативою є покращення якості продукції, яка має високу ймовірність отримання ресурсів та реалізується всього за 8 місяців.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту

Першим кроком розробки ринкової стратегії проєкту є стратегія охоплення ринку, а саме опис цільових груп потенційних споживачів.

Результати опису цільових груп потенційних споживачів занесені в таблицю 5.14.

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів [29]

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтен- сність конкурен ції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Компанії, які проводять неруйнівний контролю	Готові	Середній попит	Висока	Складна
2	Компанії, які виробляють засоби НК	Готові	Високий попит	Висока	Середня
Які цільові групи обрано: компанії, які проводять неруйнівний контролю, а також компанії, які виробляють засоби НК. Так як проєкт націлений на одну цільову групу (сегменти) тому використовується стратегія диференційованого маркетингу.					

За результатами аналізу потенційних груп (таблиці 5.14), було обрано дві цільові групи, а саме: компанії, які проводять неруйнівний контроль, а також компанії, які виробляють засоби НК. Також була визначена стратегія охоплення ринку, а саме стратегія диференційованого маркетингу.

Для забезпечення роботи в вибраних сегментах необхідно сформувані базову стратегію розвитку (таблиця 5.15).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку [29]

<i>Обрана альтернатива розвитку проєкту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо жні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
Концентрація на потребах цільового сегменту ринку.	Стратегія диференційованого маркетингу	Використання новітніх винаходів для покращення технічних характеристик товару, та якості, а також адаптація до вимог ринку	Стратегія диференціації

Проаналізувавши таблицю 5.15 можна зробити висновок, що через наявність сильних конкурентів на ринку доцільно базовою стратегією розвитку вибрати стратегію диференціації, використання якої дозволить підвищити рентабельність, перешкодити приходу на ринок нових конкурентів, а також завдяки забезпеченню відмінних властивостей товару дозволить завоювати прихильність споживачів. Для покращення основних властивостей доцільно використовувати новітні винаходи в даній сфері.

Наступним кроком слід визначитись із базовою стратегією конкурентної поведінки (таблиця 5.16).

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [29]

<i>Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
Ні	Компанія буде шукати нових споживачів, а також забирати існуючих у конкурентів	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

Проаналізувавши таблицю 5.16 можна зробити висновок, що проєкт не є першопрохідцем, але завдяки високій якості, низькій ціні та собівартості товар має суттєві переваги над продуктами конкурентів. Так як проєкт націлений на два сегменти, та є вузькоспеціалізованим, тому доцільною стратегією конкурентної поведінки вибрати стратегію заняття конкурентної ніші.

Виходячи з обраної базової стратегії, стратегії конкурентної поведінки та основних вимог споживачів сегменту до постачальника, яка формується на основі вимог клієнтів, необхідно визначити стратегію позиціонування (таблиця 5.17).

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування [31]

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудитор ії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентно- спроможні позиції власного стартап- проєкту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)</i>
1	Технічні характер истики	Стратегія диференціації	Система з високою точністю визначення координат, а також високою завадостійкістю	Високоточна, завадостійка.
2	Низька ціна	Стратегія диференціації	Дешева система координатної реєстрації	Доступний засіб автоматизації пристроїв НК
3	Висока якість	Стратегія диференціації	Високоякісна координатної реєстрації	Високоякісний засіб

Висновок: так як проєкт націлений на два сектори, при цьому головним є властивості продукції тому доцільно реалізувати стартап-проєкт за стратегією диференціації, що дозволить реалізувати його основну мету, а саме підвищення основних технічних властивостей призначених для визначення координат положення датчика НК з більшою точністю та достовірністю.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Розробка маркетингової програми стартап-проекту починається з визначення основних переваг концепції товару, для цього необхідно підсумувати отримані результати конкурентоспроможності товару (таблиця 5.18).

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [31]

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами</i>
1	Необхідність підвищення точності визначення координат	Відносно дешева методика досліджень, яка дозволить підвищити точність визначення координат на основі фазового методу	Висока точність та достовірність визначення координат, висока завадостійкість, а також висока якість продукції
2	Необхідність підвищення завадостійкості системи	Надійна технологія, яка дозволить забезпечити працездатність приладу за меншого ВСШ	
3	Необхідність підвищення якості виробництва товарів	Надійна технологія, яка дозволить підвищити якість товару	

За результатами таблиці 5.18 можна зробити висновок, що до переваг проекту відноситься висока точність та достовірність визначення координат, висока якість та завадостійкість.

Після визначення основних переваг концепції товару, розробляється трирівнева маркетингова модель товару, під час якої уточнюється ідея

продукту, визначаються його фізичні складові, а також визначаються особливості процесу його надання (таблиця 5.19).

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару [31]

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>
I. Товар за задумом	Ультразвукова система координатної реєстрації інформації на основі багаточастотного фазового методу призначена для автоматизації засобів неруйнівного контролю.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	1) Ультразвукова система координатної реєстрації
	2) Висока завадостійкість ($BCI \geq 1.1$)
	3) Низька похибка визначення координат (± 0.5 мм);
	Якість: нормативи, параметри тестування, табличні дані
III. Товар із підкріпленням	Пакування: Товар запакований в картонну коробку з вказаною назвою, торговельною маркою та наведеними технічними характеристиками.
	Марка: AutonomCoord RCS_U3
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: товар захищений патентом при цьому має закрите програмне забезпечення.	

Згідно даних таблиці 5.19 можна зробити висновок, що розроблена продукція має захист від копіювання за допомогою патенту, а також закритим програмним забезпеченням для запобігання копіювання програмного коду.

Наступним кроком є визначення цінових меж згідно яких потрібно встановлювати ціни на товар. Для цього необхідно проаналізувати ціни на

товари-аналоги, а також визначити рівні доходів цільових груп споживачів (таблиця 5.20).

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни [31]

<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
30000 грн	26000 грн	Середній	15 000 – 35 000 грн

Для реалізації стартап-проекту було обрано середню цінову категорію, так як висока вартість товару не залучить нових клієнтів.

Наступним кроком є формування системи збуту (таблиця 5.21). Для цього необхідно визначити яким чином буде збуватись товар (власними силами або через посередників) та визначити глибину каналу збуту, в разі використання посередників необхідно визначити вид посередництва.

Таблиця 5.21. Формування системи збуту [31]

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Покупка випромінювачів, приймачів, а також іншого електричного обладнання проводиться окремо. Оптовий та роздрібний продаж.	Доставка, налагоджування та сервісне обслуговування	Нульового рівня	Власна система збуту за допомогою торгівлі через інтернет магазини

За результатами таблиці 5.21 можна зробити висновок, що збут продукції відбувається власними силами, крім цього завдяки нульовій глибині

каналу виробник буде продавати товар безпосередньо кінцевому споживачу (без посередників). Виробник займається доставкою, налагодженням, а також сервісним обслуговуванням товару.

Наступним етапом маркетингової програми стартап-проекту є розробка концепції маркетингових комунікацій (таблиця 5.22), що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів.

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій [31]

<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
Необхідність в системах координатної реєстрації інформації як для ручних так і для автоматизованих засобів НК за оптимальної ціни	Інтернет; Фахові журнали; Виставки; Соціальні мережі;	Висока точність визначення координат; Висока завадостійкість Висока якість за низької ціни.	Показати інформацію про даний продукт клієнтам, та вказати на його переваги в порівнянні з конкурентами	Реклама функціоналу продукту та його основних характеристик

Комунікації між клієнтом та виробником дозволить, завдяки проведенню рекламних кампаній, збільшити клієнтську базу, а також попит на товарну продукцію.

Наступним кроком є визначення маркетингового бюджету стартап-проєкту (таблиця 5.23), який дозволить визначити витрати компанії на сферу маркетингу протягом часу відведеного на аналіз поведінки споживачів та запровадження дій на збільшення кількості клієнтів компанії.

Таблиця 5.23. Визначення маркетингового бюджету стартап-проєкту [31]

<i>Складова бюджету</i>	<i>Загальна характеристика (що включає дана складова маркетингового бюджету)</i>	<i>Приблизний обсяг витрат, грн</i>
Витрати на маркетингові дослідження	Аналіз ринку, аналіз конкурентів та конкурентоспроможності стартапу та визначення потенціалу стартапу.	8 тис. доларів
Канали просування (уточніть які саме: соціальні мережі і т. ін.)	Профільні події та традиційні канали просування.	15 тис доларів
Канали продажу	Інтернет-магазини	10 тис доларів.

Проаналізувавши дані таблиці 5.30 можна зробити висновок, що в витрати на просування стартап-проєкту, а саме рекламні кампанії, друк інформації в журналах, поширення в соц. мережах та проведення профільних заходів становлять 15 тис. доларів. Продукт стартап-проєкту буде збуватись через інтернет магазини. Загальні витрати націлені на збільшення кількості споживачів становить – 33 тис. доларів.

Далі сформуємо бізнес-модель стартап-проєкту (таблиця 5.24).

Таблиця 5.24. Бізнес модель стартап-проєкту [32]

Ключові партнери Компанії, які виробляють ультразвукові приймачі та випромінювачі, мікропроцесорну техніку та служби доставки готових засобів.	Ключові види діяльності: Розробка ультразвукових систем координатної реєстрації для автоматизації систем НК. Продаж розроблених систем. Ключові ресурси: Інтелектуальні, фінансові та людські ресурси. Кількість персоналу – 20 осіб. Для реалізації бізнес - плану необхідно фінансування у розмірі 50 тис. доларів.	Ціннісна пропозиція: Застосування продукту дозволить провести автоматизацію ручних засобів НК та дозволить збільшити точність визначення положення дефектів.	Взаємовідносини з клієнтами: Клієнти отримують готову продукцію. Необхідно організовувати сервісне обслуговування, знижки на свята, проводити соц. опитування. Канали збуту Продаж через інтернет магазини.	Споживчі сегменти: Компанії, які займаються проведенням НК та виробництвом засобів неруйнівого контролю
Структура витрат: Постійні: заробітна плата співробітників 200000 грн. Змінні: витрати на ресурси: 50000 грн; транспортування: 10000 грн.		Потоки доходів: Продаж готових систем та їхнє обслуговування: за місяць продають: 12 одиниць товару (360 тис.грн/місяць) ; дохід: 2 тис. грн за обслуговування.		

На останньому етапі маркетингової програми складемо короткий план маркетингу (таблиця 5.25).

Таблиця 5.25. Короткий план маркетингу [31]

<i>№ n/n</i>	<i>Назва розділу</i>	<i>Елементи наповнення розділу (в дану колонку слід записати результат)</i>
1.	Цілі і завдання на найближчий рік	Вхід на ринок, переманювання клієнтів конкурентів, та просування продукції за допомогою профільних подій та традиційних каналів просування.
2.	Місія та цінності стартапу	Продаж ультразвукових систем координатної реєстрації з високою точністю визначення координат за низькою ціною Цінності: висока точність визначення координат, висока завадостійкість, а також низька ціна.
3.	Цільова аудиторія	Малі та середні підприємства, які спеціалізуються на проведенні або розробці засобів НК
4.	Аналіз ситуації	Ультразвукова система координатної реєстрації призначена для визначення координат положення датчика НК як самостійна система, та і як засіб автоматизації ручного методу проведення НК. До переваг відносять високу точність визначення координат ± 0.5 мм, зберігання працездатності за ВСШ ≥ 1.1 та низька ціна. Ціна одного товару 20 тис. грн. Наявні знижки на свята, бонуси постійним клієнтам.

		Спосіб просування по традиційним каналам та профільним подіям. Основним каналом поширення є інтернет-магазини. На ринку наявні три великих конкуренти Keyence Corporation, "ЭХО+" та Olympus . Конкуренти займаються продажем обладнання НК в тому числі як автоматизованими системами НК так і їх ручними аналогами, при цьому похибка визначення координат менша ніж в даного проєкту. Завдяки сильним сторонам стартапу можна досягти динамічного зростання стартапу та отримання великого доходу. Прогнозована кількість продажів становить 144 одиниці на рік та складає прибуток 1 млн 440 тис грн. в рік
5.	Ціни і стратегія позиціонування	Позиція на основі порівняння виготовленої продукції з товарами конкурентів та підвищення основних технічних властивостей засобу
6.	План просування	Профільні події та традиційні канали
7.	Маркетингові активи	Виставки та реклама
8.	Конверсійна стратегія	Проведення якісної рекламної кампанії та забезпечення високої якості товару за низької ціни

9.	Спільні підприємства та партнерство	Компанії, які виробляють компоненти такі як випромінювачі, приймачі ультразвукових сигналів та мікропроцесорну техніку, а також підприємства, які займаються друком плат.
10.	План збільшення продажів	Залучення іноземних інвесторів, відкриття нових каналів збуту
11.	План щодо залучення рефералів	Надання знижок на свята, проведення акцій та надання бонусів постійним клієнтам
12.	Фінансові прогнози	Обсяг виробництва становить 144 одиниці в рік, вартість одиниці товару 20 тис. грн. Витрати на сировину становлять 50000 грн в місяць, заробітна плата 200000 грн в місяць, транспортування 10000 грн в місяць, дохід стартапу становить 1 млн 440 тис грн. в рік

Висновки до п'ятого розділу

Проведений у п'ятому розділі маркетинговий аналіз стартап-проекту дає змогу зробити наступні висновки.

1. Першим кроком був визначений зміст ідеї стартап-проекту, а саме «автоматизація системи неруйнівного контролю на основі використання системи координатної реєстрації інформації» та визначений основний напрям застосування – засоби неруйнівного контролю. Крім цього були визначені техніко-економічні переваги проекту, а саме низька вартість, висока завадозахищеність, та висока точність визначення координат.

2. Наступним етапом був проведений технологічний аудит ідеї проекту згідно якого було визначено, що потрібні для реалізації проекту

електричні компоненти, мікропроцесорна техніка, а також друковані плати неможливо виготовити власноруч, а тільки закупити у виробників або дистриб'юторів. Так як на ринку наявні необхідні для реалізації ідеї технології тому вона є реалізованою в повній мірі.

3. Далі був проведений аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту який дозволив визначити, що на ринку наявна мала кількість конкурентів за високого обсягу продаж, крім цього попит на продукцію зростає з кожним роком та вибраний ринок є рентабельним, тому наявна можливість ринкової комерціалізації проекту. Так як ринок є олігопольним, тому процес впровадження в нього новостворених підприємств потребує великих інвестицій, тому можна вважати головною загрозою – конкурентів. Проведений аналіз підтвердив конкурентоспроможність проекту на ринку приладів неруйнівного контролю.

4. Потенційними групами клієнтів (сегментів) було обрано дві цільові групи, а саме: компанії, які проводять неруйнівний контроль, а також компанії, які виробляють засоби НК. Так як проєкт націлений на два сегменти, а сегменти є вузьконапрямленими, основними перевагами є технічні властивості проєкту, тому стратегією охоплення ринку була вибрана стратегія диференційованого маркетингу, стратегією конкурентної поведінки прийнята стратегія заняття конкурентної ніші, а базовою стратегією розвитку прийнята стратегія диференціації. Також була визначена альтернативна стратегія, яка полягає в покращенні якості та технічних характеристик приладу з метою залучення клієнтської бази.

5. На основі отриманих результатів була розроблена бізнес модель стартап-проекту та був складений короткий опис маркетингу. Проаналізувавши отримані результати, а саме кількості та характеру конкурентів, підтвердженої конкурентоспроможності проекту, основних переваг та недоліків, вибраних сегментів ринку та вимог клієнтів, можна стверджувати про можливість реалізації стартап-проекту.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача розроблення безконтактного ультразвукового завадостійкого методу двокоординатної реєстрації просторового положення первинного перетворювача на поверхні виробу при проведенні вихрострумowego неруйнівного контролю, яка полягає у вивченні, удосконаленні та розробленні ультразвукової багаточастотної фазової системи координатної реєстрації положення датчика ВСНК на основі ЧСЗК.

Основні висновки та результати:

1. Проведено порівняльний аналіз сучасних засобів визначення просторових координат первинних перетворювачів в задачах НК та реалізованих методів реєстрації координат, способів вирішення задачі неоднозначності виміру фазового зсуву багаточастотним фазовим методом, визначена структура, основні властивості та обмеження фазового методу, а також досліджена можливість автоматизації різних методів та засобів НК за рахунок реєстрації положення датчиків.

2. Розроблено та проаналізовано новий ультразвуковий фазовий метод реєстрації двокоординатного положення датчиків ВСНК, який полягає у визначенні двокоординатного положення датчика ВСНК методом трилатерації, для цього розраховуються відстані між приймачами та випромінювачем багаточастотним фазовим методом на основі ЧСЗК. Розроблений метод дає змогу визначати координати положення датчика з похибкою ± 0.5 мм, що цілком достатньо для його використання у вихрострумовій дефектоскопії.

3. Удосконалено метод ЧСЗК з метою забезпечення достовірного визначення координат за низького відношення сигнал/шум, для цього був розроблений метод узгодження лишків, який полягає у встановленні певних правил округлення лишків, що дає змогу коректно відновити значення фазового зсуву за умови малого відношення сигнал/шум. Використання

запропонованого методу дає змогу достовірно відновити фазовий зсув за низького відношення сигнал/шум не менше 1.1 за прямокутною обвідною та не менше 2.5 за гаусовою обвідною сигналу.

4. Розроблена методика калібрування ультразвукової системи двокоординатної реєстрації інформації по швидкості звуку, яка полягає в додатковому визначенні швидкості поширення акустичного сигналу в навколишньому середовищі згідно отриманих значень фазових зсувів вкладених на відомій відстані. Застосування методики калібрування дає змогу зменшити додаткову похибку визначення координат датчика ВСНК в умовах варіації метеопараметрів до 0,1%.

5. Розроблена методика визначення розмірів мертвих зон з метою пошуку областей в яких неможливо точно розрізнити дві суміжні координати. Для пошуку яких, виходячи зі значення дискрету фазових вимірів, була встановлена гранична похибка в 17° (~ 0.3 рад). Результати пошуку дали змогу визначити, що при застосуванні системи двокоординатної реєстрації наявна мертва зона на початку вимірювальних відстаней площею в 1000×80 мм².

6. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення, яке дозволило реалізувати запропоновані методи та методики двокоординатної реєстрації координат положення датчика ВСНК, програмні коди яких наведені у додатках.

7. Розроблено структуру апаратної частини засобу запропонованої багаточастотної фазової системи двокоординатної реєстрації інформації на основі ЧСЗК, та надано рекомендації по вибору елементної бази для її реалізації. Запропоновано використати ультразвуковий випромінювач частотою до 40 кГц з круговою діаграмою напрямленості в 360° марки US40KT-01, приймач-випромінювач 400EP14D частотою до 40 кГц з круговою діаграмою напрямленості в 135° . Для опрацювання фазових даних та визначення координат положення датчика НК запропоновано використовувати мікропроцесор типу ATtiny826.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О.В. Дергунов, Ю.В. Куц. Методи реєстрації координат в дефектоскопії, Системи обробки інформації, 2014, випуск 5 (121), с.31-35.
- [2]. Albert S. Birks. Nondestructive Testing Handbook. Second edition. / Albert S. Birks, Robert E. Green. –ASNDT 1991. – Edition. Vol. 7. –P. 451.
- [3] Орнатский Е. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / Е. П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1976.
- [4] Маєвський С.М. Координатна реєстрація в дефектоскопії / С.М. Маєвський, К.М. Серий. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2011. – 116с
- [5] Guoliang Ye, Ben Neal , Alex Boot , Vassilios Kappatos , Cem Selcuk, Tat-Hean Gan. Development of an ultrasonic NDT system for automated insitu inspection of wind turbine blades, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France, p.826-833.
- [6] Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: навч. посіб. /С.М.Маєвський; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.– 288 с. ВСТАВИВ 10.05.23.
- [7] Серий К. М. Системи дистанційного визначення просторового положення вимірювального перетворювача дефектоскопу у процесі контролю/ С.М. Маєвський, К.М. Серий // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – Приладобудування. – 2003. – № 25. – С. 58-63.
- [8] Серий К. М. Аналіз точності дистанційного визначення координат перетворювача дефектоскопу акустичним методом / К. М. Серий // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Приладобудування. – 2008. – № 36. – С. 45-49.
- [9] Бабак В.П. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія/ В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С Єременко та ін.// К.: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2015. – 512 с.

[10] Intelligent automated eddy current system for monitoring the aircraft structure condition / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, A. Protasov, V. Petryk, A. Alexiev // 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/SAIC57818.2022.9922968.

[11] Маєвський С. М. Безконтактна система визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопу / С. М. Маєвський, К. М. Серий // Технічна діагностика та неруйнівний контроль – К.: НАН України, ІЕЗ ім. Є. О. Патона. – 2012. – № 4. – С. 20 – 23.

[12] Automated eddy current system for express monitoring of objects / I. Lysenko, Y. Kuts, A. Protasov, V. Petryk, A. Alexiev // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2022. – Volume 5, Issue 5. – 269-276 pp. ISSN: 2603-4018, eISSN: 2603-4646.

[13] Роботизована система неруйнівного вихрострумовеого контролю виробів зі складною геометрією / [В. В. Долиненко, Ю. В. Куц, Є. В. Шаповалов та ін.]. // Автоматичне зварювання, № 5-6 (764), травень-червень 2017. – С. 60-67.

[14] Перспективи застосування фазових характеристик сигналу в автоматизованій вихрострумівій дефектоскопії / [М. О. Редька, Ю. В. Куц, Є. В. Шаповалов та ін.]. // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2022. – №1. – С. 45–53.

[15] Кинкулькин И.Е. Фазовый метод определения координат/ И.Е. Кинкулькин, В.Д.Рубцов, М.А. Фабрик. //М.: Сов.радио, 1979. – 280 с.

[16] Малько, В. П. Вимірювання кумулятивних фазових зсувів в задачах визначення відстаней / В. П. Малько // XV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 14-15 червня 2022 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 194-197. – Бібліогр.: 5 назв.

[17] Шануров Г.А. Спутниковая геодезия. Учебное пособие для студентов обучающихся по направлениям: «геодезия и дистанционное

зондирование», «прикладная геодезия», «землеустройство и кадастр», «картография и геоинформатика» / Г. А. Шануров. М.: МИИГАиК, 2015, 80 с.

[18] Товбас С. К. Оптико-электронные методы измерений : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-56 02 01 «Геодезия» / С. К. Товбас. – Новополюцк: ПГУ, 2012. – 156 с

[19] Лобачев В.М. Радиоэлектронная геодезия / В.М. Лобачев. // М.: Недра, 1980. – 327 с.

[20] Куц Ю.В. Вимірювання кумулятивних фазових зсувів // Ю. Куц. – Технічна електродинаміка (Kuts Yu. V. Vymsryuvannya kumukyatyvnych phazovych zsuviv. – Technichna elektrodynamika). – 2001. – №5. – С/С. 67–72.

[21] Куц Ю. В. Застосування модулярної арифметики у багатошкільних фазових вимірюваннях / Ю. В. Куц. // Метрологія та прилади. – 2017. – №5. – С.98–105.

[22] Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумowego контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумовой контролі / Ю. В. Куц, В. М. Учанін, Ю. Ю. Лисенко, О. Е. Левченко. // Технічна діагностика та неруйнівний контроль.. – 2021. – №3. – С. 7–13.

[23] Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумowego контролю. Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації / [Ю. В. Куц, В. М. Учанін, Ю. Ю. Лисенко та ін.]. // Технічна діагностика та неруйнівний контроль.. – 2021. – №4. – С. 11–18.

[24] Бабак В.П., Куц Ю.В. Метод однозначного визначення великих фазових зсувів сигналів // Вісн. НАУ. – 2003. – №1. – С. 3 – 8.

[25] Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И. Я. Акушский, Д. Юдицкий // М.: Сов. радио. – 1968. – 440 с.

[26] Малько, В. П. Моделювання процесу відновлення повної фази сигналу при двокоординатній реєстрації інформації в системах автоматизованого неруйнівного контролю / В. П. Малько // XVIII

Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 06-07 грудня 2022 р. - К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2022. – 254 с.

[27] Куц Ю. В. Спеціальні розділи математики: Курс лекцій. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології» / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48823>.

[28] Babak, V.P. Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Y.V., Myslovych, M.V., Scherbak, L.M., Zaporozhets, A.O. Models and Measures in Measurements and Monitoring / Springer International Publishing, 2021. - 266 p.

[29] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.

[30] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.

[31] Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

[32] Гавриш, О. А. Розробка стартап-проектів. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,88 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 188 с. – Назва з екрана.

ДОДАТКИ

Додаток А

Програмний код розрахунку ортонормованих базисів B_i ЧСЗК

Програма надається за зверненням до розробників

Додаток Б

Програмний код процесу визначення похибки вимірювання координат за використання багаточастотного фазового методу з використанням ЧСЗК в системах двокоординатної реєстрації інформації за відсутності шумів.

Програма надається за зверненням до розробників

Додаток В

Програмний код визначення розмірів мертвих зон в задачах визначення координат положення датчика ВСНК.

Програма надається за зверненням до розробників

Додаток Г

Програмний код калібрування ультразвукової системи координатної
реєстрації по швидкості поширення ультразвукового сигналу

Програма надається за зверненням до розробників

Додаток Д

Програмний код процесу визначення координат на основі ЧСЗК та оцінки похибки визначення координат за наявності шумової складової сигналу

Програма надається за зверненням до розробників