

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЛЕВЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ЕДУАРДОВИЧ

УДК 62-5:621.7:621.317.3

ДИСЕРТАЦІЯ
АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ
ХІМІЧНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТРИЧНИХ
ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.Е. Левченко

Науковий керівник Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Левченко О. Е. Автоматизоване керування технологічним процесом хімічного фрезерування з використанням матричних вихрострумів перетворювачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Дисертація присвячена розробленню та дослідженню системи автоматизованого керування технологічним процесом хімічного фрезерування з використанням матричних вихрострумів перетворювачів.

Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується зростанням його інтенсивності разом з підвищенням вимог щодо якості продукції, раціонального використання матеріальних ресурсів та енергоефективності, зниженням собівартості продукції, а також використанням нових конструкційних матеріалів та технологій їх виготовлення, розширенням динамічних діапазонів технологічних змінних. Все це актуалізує процеси прискорення розвитку та удосконалення методів та засобів автоматизації виробничих технологічних процесів, пошуку більш досконалих технічних рішень для підтримання та оптимізації певних технологічних режимів.

Успішне розв'язання актуальних питань автоматизації керування виробничими технологічними процесами потребує інтеграції новітніх досягнень в різних галузях знань – теорії автоматичного керування, інформаційно-вимірювальних технологій, комп'ютерної інженерії, технологій неруйнівного контролю та ін. Однією з відповідальних складових автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСКТП) є засоби, що включаються у зворотній ланцюг системи автоматичного керування (САК) і здійснюють оцінювання регульованої величини, визначення її відхилення від заданого значення і формують сигнали керування на регулюючий орган.

В даній роботі розроблено двоконтурну САК яка інтегрується в АСКТП хімічного фрезерування (ХФ) виробів з алюмінієвих сплавів. Для підтримки в певних межах швидкості процесу травлення застосовано контур керування температурою травника. Для визначення часу травлення застосовано другий контур керування, який забезпечує зупинку процесу травлення за результатами вимірювання поточних значень товщини виробу. В цьому контурі безконтактне визначення товщини виробу в процесі хімічного травлення відбувається на основі використання засобів вихрострумowego контролю (ВСК).

В роботі набула подальшого розвитку концепція інтеграції засобів ВСК у САК процесом ХФ. Зокрема розглянуто використання технології ВСК, особливість якої полягає у використанні вихрострумових матриць (ВСМ), що дає змогу контролювати процес травлення на значних поверхнях виробів, підвищити ефективність обробки, оптимізувати використання хімічних реагентів та енергії і в сукупності забезпечити високий рівень якості готової продукції.

Розглянуто переваги технології ВСК для використання у якості методологічної основи в АСКТП ХФ. До їх числа належать:

- можливість перетворення низки неелектричних параметрів об'єктів керування в електричні сигнали, що необхідно для використання в САК;
- відсутність механічного контакту з об'єктом керування, що важливо при обробці тонкостінних виробів для запобігання їх деформації;
- забезпечення вільного доступу травника до всієї поверхні виробу;
- можливість роботи чутливих елементів в широкому динамічному діапазоні зміни технологічних параметрів (температури, концентрації розчинів, швидкості їх руху при перемішуванні тощо);
- можливість перейти до керування технологічним параметром за результатами контролю товщини виробу, що змінюється в процесі травлення.

Зазначено, що потенціал ВСК для використання в АСКТП ХФ до кінця не розкритий і не достатньо висвітлений у наукових публікаціях. Одним з перспективних напрямів створення засобів ВСК для АСКТП ХФ ґрунтується на використанні вихрострумових перетворювачів матричного типу. Основною

перевагою застосування ВСМ є підвищення продуктивності та надійності контролю. Це досягається завдяки: скороченню часу аналізу об'єктів; оптимізації опрацювання інформаційних сигналів, що забезпечує високу чутливість і роздільну здатність визначення технологічних параметрів; адаптивної зміни параметрів сигналів збудження вихрових струмів для завдання необхідних режимів збору первинної вимірювальної інформації; застосуванню сучасних алгоритмів опрацювання даних, що дає змогу реалізувати одночасний контроль на значних ділянках поверхні виробів.

Інформаційними параметри сигналів ВСМ при гармонічному збудженні є їх амплітуда, фазовий зсув відносно сигналу збудження. У засобах ВСК ці параметри зазвичай представляються на комплексній площині у виді годографів. Орієнтація на побудову та аналіз годографів сигналів ВСК створює певні труднощі для автоматизації процесу ВСК і його використання в системах керування технологічними процесами. Крім того інформаційні параметри сигналів ВСК часто виявляються чутливими до різних зовнішніх впливів, зокрема до шумів. Це обмежує можливості їх безпосереднього використання для формування керувальних впливів в АСКТП ХФ і обумовлює необхідність застосування методів статистичного опрацювання параметрів сигналів ВСМ.

Таким чином, існує актуальна задача розроблення нових автоматизованих методів та засобів ВСК з матричними перетворювачами і створення на їх основі САК які застосовуються в АСКТП ХФ.

Проведений попередній аналіз сигналів, які формуються у ВСМ під час взаємодії змінного електромагнітного поля з електропровідними об'єктами керування, дав змогу виявити невикористаний ресурс ВСК для застосування в АСКТП ХФ. В роботі проаналізовано останні публікації з питань автоматизації ВСК у промисловості, розроблено багатовимірну математичну модель сигналів ВСМ, яка включає можливість застосування дискретного перетворення Гільберта для комплексного аналізу сигналів.

В роботі розглянуто структурно-логічну схему формування та опрацювання сигналів ВСМ. З'ясовано, що використання дискретного перетворення Гільберта в

засобах ВСК у складі САК процесом ХФ дає змогу отримувати значні обсяги інформації про об'єкти керування, синхронно обчислювати амплітудну та фазову характеристики сигналів ВСМ і на цій основі розширити можливості формування керувальних впливів. Розроблена методологія опрацювання сигналів ВСМ дає можливість отримувати вибірки обвідної і фази сигналів ВСМ значних обсягів, що створює передумови для більш широкого використання статистичних методів їх опрацювання.

Для підвищення ефективності аналізу сигналів ВСМ було запропоновано додатково застосовувати в моделі сигналів індикаторну функцію. Це дозволяє досліджувати сигнальні поля, сформовані в процесі ХФ на значних ділянках поверхні виробу, з оцінюванням їх просторово-часових характеристик.

Дискретне перетворення Гільберта покладене в основу розробленої методики моделювання, опрацювання і аналізу інформативних параметрів сигналів ВСМ. Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропоновану методику опрацювання даних, дає змогу визначати і оцінювати взаємозв'язки між характеристиками сигналу та керованими параметрами, які складно чи неможливо апріорі визначити в аналітичній формі.

Розглянуто особливості технології прототипування для створення і модернізації засобів ВСК у складі САК процесом ХФ. В цілому ця технологія передбачає створення функціонуючої фізичної моделі продукту, яка є достатньо детальною, щоб продемонструвати його роботу, але не надто складною, щоб вимагати багато часу та ресурсів для її створення та налаштування. В роботі на базі програмно-апаратної платформи Red Pitaya розроблено прототип системи ВСК для використання в контурі визначення часу травлення САК процесом ХФ. Запропоновано архітектуру програмного забезпечення системи, яка включає в себе ряд алгоритмів для опрацювання та аналізу даних. Для використання в прототипі САК процесом ХФ розроблено та досліджено вихрострумний перетворювач матричного типу з чутливими елементами у формі плоскої спіральної котушки, виготовлений за технологією друкованих плат. Проведені експериментальні дослідження з вихрострумовими датчиками матричного типу

підтвердили високу продуктивність та ефективність технології ВСК на основі ВСМ та доцільність їх використання в АСКТП ХФ. Ефективність ВСМ порівняно з традиційними вихрострумовими перетворювачами запропоновано оцінювати за допомогою коефіцієнта ефективності, який враховує зменшення часу контролю, збільшення вірогідності та чутливості контролю.

В роботі також запропонована методика та алгоритм опрацювання сигналів ВСМ, які включають нормалізацію комплексних коефіцієнтів передачі каналів ВСМ, що дає змогу збільшити чутливість до зміни товщини виробу.

В рамках наукового дослідження було створено прототип системи ВСК з використанням ВСМ. Прототип реалізує запропоновану методику опрацювання та інтерпретації даних, отриманих з ВСМ. Експериментальні випробування технології ВСК з використанням ВСМ на зразках з різними типами дефектів підтвердили її ефективність у контексті вихрострумової дефектоскопії.

Обґрунтовано перспективи використання нейромережових технологій, зокрема згорткових нейронних мереж, для синтезу САК, процес керування в якій базуються на технології ВСК. Використання штучних нейромереж за відсутності прямих зв'язків між характеристиками об'єкта керування та параметрами сигналів ВСМ може значно підвищити ефективність АСКТП.

Ключові слова: система керування, хімічне фрезерування, вихрострумові перетворювачі, вихрострумова матриця, неруйнівний контроль, вихрострумовий контроль, вихрові струми, статистичні характеристики, обробка сигналів, нейронні мережі.

ABSTRACT

Levchenko O. E. Automated control of the technological process for chemical milling using eddy current array probes.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 151 "Automation and computer-integrated technologies." - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the development of a regulator based on eddy current testing methods with eddy current array probes, focused on the use in automated process control systems (APCS).

The modern stage of industrial production development is described by an increase in its intensity combined with higher requirements for product quality, rational use of material resources and energy efficiency, lower production costs, as well as the use of new construction materials and technologies for their manufacture, and the expansion of dynamic ranges of technological parameters. These factors accelerate the development and enhancement of methods and tools for automating production processes, and the development of more advanced technical solutions to maintain and optimize certain technological conditions.

To successfully resolve actual issues of automation of industrial technological processes requires the integration of the latest achievements in various fields of knowledge, such as automatic control theory, information and measurement technologies, computer engineering, non-destructive testing technologies, etc. One of the most important components of automated process control systems (APCS) is the tools that are included in the control system's feedback loop and evaluate the regulated value, determine its deviation from the set value and generate control signals to the regulatory unit.

In this paper, a two-circuit automatic control system for chemical milling (CM) of aluminium alloy products was developed. To maintain the etching process speed within certain limits, a pickle temperature control loop is used. To determine the pickling time, a second control loop is used to stop the pickling process based on the results of

measuring the current thickness of the product. In this loop, the non-contact determination of the product thickness in the chemical pickling process is based on the use of ECT.

In this paper, the concept of integrating ECA tools into the APSC is further developed. In particular, we consider the use of ECA technology, the characteristic feature of which is the use of eddy current arrays, which makes it possible to control the etching process on large surfaces of products, increase processing efficiency, optimise the use of chemicals and energy, and, in general, ensure a high level of quality of finished products.

Eddy current testing technology has a range of advantages for use as a methodological basis in chemical milling APCS. These include

- the ability to convert a number of non-electrical parameters of control objects into electrical signals suitable for use in the control system;
- absence of mechanical contact with the control object, which is important when processing thin-walled products to prevent deformation;
- provide the pickler with free access to the entire surface of the product;
- the ability to operate sensitive elements in a wide dynamic range of changes in technological parameters (temperature, concentration of solutions, speed of their movement during mixing, etc;)
- the ability to control a technological parameter by measuring the output parameter of the control object, namely its thickness, which changes during the etching process.

However, the potential of ECT for use in APCS has not been fully revealed and is not sufficiently described in scientific publications.

One of the perspective directions of creating ECT devices is based on the use of eddy current array probes. The main advantage of using eddy current array (ECA) probes to create APCS regulators and, in general, for use in ECT is to increase testing performance and the ability to analyze control and testing objects in more detail. This is achieved due to: reducing the time for testing objects; optimization of information signals processing, which provides high sensitivity and high resolution of determination

of technological parameters; adaptive change of parameters of eddy current excitation signals to set the required modes of primary measurement data collection; application of modern data processing algorithms, which makes it possible to implement simultaneous testing on large areas of the surface of the controlled object.

The information parameters of the ECA signals under harmonic excitation are their amplitude, phase shift relative to the excitation signal, and frequency. In ECT tools, these parameters are usually represented on the complex plane in the form of hodographs. The focus on the construction and analysis of hodographs of ECT signals creates certain difficulties for the automation of the ECT process and its use in process control systems. In addition, the information parameters of ECT signals are often sensitive to various external influences, including noise. This limits the possibilities of their direct use for the formation of control influences in the APCS control system and necessitates the use of methods of statistical processing of the parameters of the ECA signals. Therefore, there is an actual task of developing new automated methods and tools of ECT with ECA probes to create APCS on their base.

Thus, there is an important task of developing new automated techniques and tools for ECT with eddy current arrays and creating an automatic control systems.

A preliminary analysis of the signals generated in ECA probes during the interaction between an alternating electromagnetic field and electrically conductive objects made it possible to identify an unused resource of ECT for use in automated process control systems. The work analyzes the latest publications on the automation of ETC in industry, considers the concept of including automated ECT subsystems in the automated process control system, and develops a multidimensional mathematical model of ECA signals, which includes the possibility of using the discrete Hilbert transform (DHT) for complex signal analysis in static and dynamic modes of operation.

The paper considers the structural and logical diagram of the forming and processing of ECA signals. It has been found that the use of DHT in automated control systems based on ECT makes it possible to obtain larger quantities of information about control objects in digital form, to synchronously calculate the amplitude and phase

characteristics of the ECT signal and, on this basis, to expand the possibilities of forming input signals for control devices.

The features of the prototyping technology for the development and updating of ECT tools as part of process regulators are considered. In general, this technology implies the creation of a functioning physical model of the product that is detailed enough to demonstrate how the product works, but not too complex to require a lot of time and resources to create and set up. In this work, a prototype of an automated ECT system for use in the automatic control system of the chemical milling was developed on the basis of the Red Pitaya hardware and software platform. This system makes it possible to effectively respond to material heterogeneities and generate process control signals. The architecture of the system software is proposed, which includes a number of algorithms for data processing and analysis. An ECA probe with sensor element in the form of a flat spiral coil, manufactured using printed circuit board technology, was developed for use in the prototype automated ECT system. This design ensures high sensitivity and reliability of detecting material structure inhomogeneities.

The paper also suggests a methodology and algorithm for processing ECA signals, which includes the normalization of the complex transfer coefficients of ECA channels, which makes it possible to increase the sensitivity to various technological parameters of controlled object in APCS.

Experimental studies with ECA probes have confirmed the high performance and efficiency of the ECT technology based on ECA and the viability of their use in APCS. The effectiveness of ECA in comparison with traditional eddy current probes has been proposed to be evaluated using the efficiency coefficient, which takes into account the reduction of testing time, increase in testing reliability and sensitivity.

As part of the research, a prototype of the ECT system using ECA was created. The prototype implements the proposed methodology for processing and interpreting the data obtained from the ECA probes. Experimental tests of the ECT technology using the ECA on samples with various types of defects confirmed its effectiveness in the context of eddy current flaw detection.

The paper also proposes a methodology and algorithm for processing the ECA signals, which include the normalization of the complex transmission coefficients of the ECA channels, which makes it possible to increase the sensitivity to changes in the thickness of the product.

Prospects for the use of neural network technologies, in particular convolutional neural networks, for the synthesis of automatic control systems, the control process in which is based on the ECT technology, are substantiated. The use of artificial neural networks in the absence of direct links between the characteristics of the control object and the parameters of the ECA signals can significantly increase the efficiency of the APCS.

Keywords: control system, chemical milling, eddy current transducers, eddy current array probes, non-destructive testing, eddy current testing, eddy currents, statistical characteristics, signal processing, neural networks.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Редька М.О., Куц Ю.В., Левченко О.Е., Близнюк О.Д. Метод виявлення сигналів вихрострумової дефектоскопії малої обчислювальної ресурсоемності // Технічна діагностика та неруйнівний контроль, – №2 (2020), 22–25. (ISSN: друковане - 0235-3474, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 151, індексується в Google Scholar). Здобувачем проведено моделювання процесу виявлення сигналів ВСК за їх фазою.
2. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю., Левченко О.Е. Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумовому контролі // Технічна діагностика та неруйнівний контроль, – №3 (2021), 7–13. (ISSN: друковане - 0235-3474, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 151, індексується в Google Scholar) Здобувачем проаналізовано формування сигналів ВСП та їх опрацювання за допомогою дискретного перетворення Гільберта.
3. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю., Петрик В.Ф., Левченко О.Е., Богдан Г.А. Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації // Технічна діагностика та неруйнівний контроль, – №3 (2021), 7–13. (ISSN: друковане - 0235-3474, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 151, індексується в Google Scholar). Здобувачем проаналізовано отримані з фази сигналів вторинних інформаційних ознак та їх використання для опрацювання даних ВСК.
4. Zhong Mei, Yurii Kuts, Orest Kochan, Iuliia Lysenko, Oleksandr Levchenko, Halyna Vlakh-Vyhrynovska. Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing // Measurement science review, 22, (2022), No 1, 32-43. (ISSN: електронне – 1335-8871, країна: Словацька Республіка, індексується в Scopus, Impact Factor[^] 1,985, Qufritile: Q3). Здобувачем проаналізовано отримані з

фази сигналів статистики та їх використання у вихрострумовому контролі.
DOI: <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004> ().

5. Левченко О.Е. Використання платформи Red Pitaya в технології прототипування автоматизованих систем вихрострумового контролю // Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ, Вип. 66(2), (2023), с. 43-51. (ISSN: друковане - 0201-744X; 0321-2211, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 151, індексується в BASE, OpenAIRE, WorldCat, Index Copernicus, Google Scholar).

Наукові праці апробаційного характеру

1. Куц Ю.В., Лисенко Ю.Ю., Левченко О.Е., Редька М.О. Виразення невизначеності вимірювань фазового зсуву сигналів // 17-й Міжнародний науково-технічний семінар “Невизначеність вимірювань: наукові, прикладні, нормативні та методичні аспекти” (УМ-2020). Збірник тез. –Созополь (Болгарія)-Харків (Україна). – **7 -8 вересня. 2020.**– С.28-29. *Здобувачем проаналізовано використання кругових статистик в опрацюванні результатів фазових вимірювань.*

2. Левченко О.Е. Використання матричних вихрострумових перетворювачів площинного типу у системах автоматизованого неруйнівного контролю // XX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник матеріалів конференції. – Київ, Україна. – **18 - 19 травня 2021.** – С.129.

3. Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Левченко О.Е. Імпульсний вихрострумовий контроль із застосуванням багатоелементних перетворювачів // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник матеріалів конференції. – Київ, Україна. – **17 - 18 травня 2022.** – С.207-209. *Здобувачем проведені вимірювальні експерименти з отримання сигналів ВСП.*

4. Lysenko I., Kuts Y., Mirchev Y., Levchenko O. Analysis of normative documentation on the use of array eddy current probes // XXII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник матеріалів конференції. – Київ, Україна. – **16 - 17 травня 2023.** – С.267-269.

Здобувачем проаналізовано стандарти в частині використання гнучких ВСМ для аналізу об'єктів складної форми.

5. Левченко О.Е., Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В. Застосування платформи Red Pitaya в автоматизованих системах вихрострумowego неруйнівного контролю // XXII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник матеріалів конференції. – Київ, Україна. – **16 - 17 травня 2023**. – С.270. *Здобувачем проаналізовано особливості застосування платформи Red Pitaya у ВСК.*

6. Lysenko I., Kuts Y., Mirchev Y., Levchenko O. Reviewing challenges in the application of eddy current arrays and their impact on NDT efficiency // 16-та Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІПРК-2023)». – Київ, Україна. – **23-24 травня 2023**. – С. 91-92. *Здобувачем проаналізовано чинники, що впливають на чутливість та роздільну здатність ВСМ.*

7. Іу. Lysenko, Y. Mirchev, Y. Kuts, O. Levchenko, V. Uchanin. Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 2. – 84-88 pp. *Здобувач брав участь у проведенні експериментів та обробленні отриманих експериментальних даних.*

8. O. Levchenko, Y. Kuts, A. Aleksiev, Іу. Lysenko. Using the Red Pitaya platform in automated eddy current testing // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 4. – 194-201 pp. *Здобувачем запропоновано технологію вихрострумowego контролю на основі платформи Red Pitaya.*

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	1
ABSTRACT	6
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	11
ЗМІСТ	14
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	18
СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ХІМІЧНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ ВСК З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ АСКТП ХФ	28
1.1. Технологія хімічного фрезерування виробів як об’єкт автоматизованого керування	28
1.2. Аналіз особливостей ВСК для використання в АСКТП	33
1.3. Аналіз робіт в області автоматизації ВСК.....	34
1.4 Аналіз ВСМ як датчиків в АСКТП	43
1.5. Використання технології прототипування для створення засобів ВСК на основі матричних перетворювачів	50
1.6. Постановка завдання створення та дослідження САК процесу ХФ на основі матричної технології ВСК.....	56
Висновки до розділу 1	60
Список використаних джерел до розділу 1	61
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАСАД АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ В ЗАСОБАХ ВСК З МАТРИЧНИМИ ВИХРОСТРУМОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ АСКТП ХФ	67

2.1. Концепція використання технології ВСК в АСКТП ХФ	67
2.2. Формування інформаційних сигналів ВСП в ланцюгах зворотного зв'язку САК процесу ХФ.....	72
2.3. Моделі інформаційних сигналів ВСМ	75
2.3.1. Модель ідеальних сигналів ВСМ	75
2.3.2. Модель реальних сигналів ВСМ	78
2.4. Застосування дискретного перетворення Гільберта в аналізі сигналів ВСМ	79
2.4.1. Особливості оброблення сигналів ВСМ в САК процесу ХФ	80
2.4.2. Зміст та завдання формування та опрацювання сигналів ВСК за допомогою ДПГ	83
2.5. Методологія отримання вторинних інформаційних ознак з фазової характеристики сигналів ВСМ	87
2.5.1. Методології отримання ФХС ВСМ	87
2.5.2. Методологія отримання вторинних інформаційних ознак з дискретної ФХС ВСМ	90
Висновки до розділу 2	94
Список використаних джерел до розділу 2	95
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБУ ВСК З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ САК ПРОЦЕСУ ХФ	99
3.1. Особливості використання засобу ВСК в САК процесу ХФ	99
3.2. Розроблення засобу ВСК для САК процесу ХФ.....	103
3.2.1 Апаратна частина засобу ВСК	103
3.2.2 Архітектура програмного забезпечення.....	106
3.3. Розроблення конструкції вихрострумowego перетворювача матричного типу	114
Висновки до розділу 3	120

Список використаних джерел до розділу 3	121
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВСК З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В САК ПРОЦЕСУ ХФ	124
4.1 Методика нормалізації каналів засобів ВСМ в САК ХФ	124
4.2. Автоматизована система нормалізації вимірювальних каналів ВСМ з використанням фільтра Гільберта	129
4.3. Автоматизована система нормалізації каналів ВСМ з використанням синхронних детекторів	132
4.4. Оцінювання невизначеності результату вимірювання товщини виробу та ефективності використання ВСМ в АСКТП ХФ	133
4.5. Перспективи використання нейромережових технологій у засобах ВСК для САК процесу ХФ.....	139
Висновки до розділу 4	143
Список використаних джерел до розділу 4	144
РОЗДІЛ 5. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ХІМІЧНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ З МАТРИЧНИМ ВИХРОСТРУМОВИМ ДАТЧИКОМ ТОВЩИНИ ОБРОБЛЮВАНОГО ВИРОБУ	147
5.1 Аналіз задачі керування процесом хімічного фрезерування виробів з алюмінієвих сплавів.....	147
5.2. Завдання дослідження.....	149
5.3. Розроблення контурів САК процесу ХФ алюмінієвих виробів.....	151
5.3.1. Контур визначення інтервалу часу експозиції деталі в травнику	156
5.3.2. Контур керування температурою травника.....	160
Висновки до розділу 5	164
Список використаних джерел до розділу 5	165
ВИСНОВКИ.....	166

Додаток А. Акт впровадження від ТОВ «Луцький ремонтний завод «Мотор»	169
Додаток Б. Акт впровадження в навчальний процес НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»	170
Додаток В. Код програмного забезпечення засобу ВСК.....	171

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВСК – вихрострумний контроль;

ВСМ – вихрострумова матриця;

ДПГ – дискретне перетворення Гільберта;

НК – неруйнівний контроль;

ОК – об’єкт керування (контролю);

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп’ютер;

ПРКП – підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення;

САК – система автоматичного керування;

ТОК – технологічний об’єкт керування;

ТП – технологічний процес;

ФХС – фазова характеристика сигналу;

ХФ – хімічне фрезерування;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ЧПК – числове програмне керування;

ШНМ – штучні нейронні мережі;

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $A(t)$ – амплітудна характеристика сигналу;
 $\Phi(t)$ – фазова характеристика сигналу;
 $F(t)$ – частотна характеристика сигналу;
 f – частота;
 $f(t)$ – частотна характеристика сигналу;
 t – час (поточний час);
 T – період сигналу;
 T_d – період дискретизації;
 T_c – час спостереження;
 $U(t)$ – амплітуда сигналу;
 $u_0(t)$ – напруга холостого ходу;
 $u_{\text{вн}}(t)$ – внесена напруга;
 $u_{\text{ш}}(t)$ – напруга шуму;
 $u_{\text{к}}(t)$ – сигнал компенсації;
 F_d – частота дискретизації;
 I_0 – амплітудне значення струму;
 $\mathbf{p}_d$ – вектор параметрів та характеристик дефекту;
 $\mathbf{p}_{\text{ок}}$ – вектор параметрів та характеристик ОК;
 H_d – дискретний оператор Гільберта;
 L – оператор розгортання;
 $\varphi_{\text{вн}}$ – початкова фаза внесеної напруги;
 φ_d – початкова фаза від дефекту;

ВСТУП

Металеві конструкційні матеріали продовжують відігравати важливу роль у багатьох галузях промислового виробництва, забезпечуючи відповідність вимогам високої питомої міцності, жаростійкості, зносостійкості, корозійної стійкості і т.п. Розвиток технологічних процесів обробки таких матеріалів включає не тільки удосконалення традиційних методів обробки таких як прокатування, пресування, різання, волочіння тощо, але й впровадження у виробництво новітніх технологій обробки таких як хімічна, електрохімічна, електроерозійна, лазерна, електрофізична і т.і. [1-5].

Під час таких технологічних процесів зміна стану електропровідних матеріалів та виробів, яка виконуються за дії мінімальних механічних зусиль, проявляється не тільки у зміні їх геометрії, включаючи отримування поверхонь складної геометрії, отворів фасонного профілю, але й у зміні структури матеріалу та його електрофізичних характеристик, якості поверхні тощо. Зазначені вище процеси обробки матеріалів та виробів є складними технологічними об'єктами керування, оскільки технологічні параметри опосередковано пов'язані з параметрами і характеристиками керувальних об'єктів, а їх вимірювання, необхідне для організації зворотного зв'язку в системах автоматичного керування, повинно відбуватись безконтактно. Це створює певні труднощі для ефективного керування інноваційними технологічними процесами виготовлення та обробки виробів з металів та сплавів. Проте існує принципіальна можливість визначення механічних та фізико-хімічних параметрів електропровідних матеріалів та виробів через їх безконтактне оцінювання методами і засобами вихрострумowego контролю (ВСК) [6]. Новітні досягнення у галузі неруйнівного ВСК відкривають нові можливості для його застосування в системах керування технологічними процесами обробки електропровідних матеріалів і виробів.

Актуальність теми.

Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСКТП), з метою формування регулюючих дій для керування режимами технологічних процесів, реалізують функції вимірювання, аналізу, підсилення сигналів,

порівняння та формування заданих рівнів технологічних параметрів [7–9]. Вони працюють з різноманітними параметрами технологічних процесів керування та керувальними параметрами, які часто мають неелектричний характер і потребують перетворення в електричні сигнали для формування керувальних впливів в АСКТП. Існує принципіальна можливість використання методів та засобів ВСК в структурі АСКТП для сприйняття різноманітних технологічних параметрів та характеристик об'єктів керування і перетворення їх в електричні сигнали. У цьому контексті ВСК набуває особливої значимості для керування технологічними процесами з електропровідними керувальними об'єктами, оскільки він дає змогу оцінювати широкий спектр параметрів – від геометричних розмірів електропровідних об'єктів до електрофізичних характеристик матеріалів та виявлення структурних дефектів та їх класифікації.

Один з перспективних напрямів розвитку ВСК пов'язаний зі створенням та використанням вихрострумових матриць (ВСМ), що у поєднанні з автоматизацією процесів ВСК, відкриває нові перспективи для підвищення ефективності АСКТП, в тому числі і для керування технологічним процесом хімічного фрезерування. Завдяки своїм унікальним можливостям, ВСМ дають змогу охоплювати контролем більші ділянки поверхні виробів, отримувати більші обсяги інформації в одиницю часу про товщину виробів під час травлення, що може слугувати основою для підвищення ефективності процесу хімічного фрезерування. Використання технології матричного ВСК в АСКТП має інноваційний характер і може надати таким системам нових якостей

Автоматизація ВСК із застосуванням ВСМ і використання його можливостей у АСКТП є актуальним завданням автоматизації процесу керування технологічними процесами виготовлення виробів з електропровідних матеріалів. Основними напрямками інтеграції ВСК у АСКТП є: розроблення спеціалізованих автоматичних засобів ВСК, впровадження ВСМ як датчиків керувальних параметрів, інтеграція з системами штучного інтелекту для аналізу даних; розроблення алгоритмів автоматичного виявлення та класифікації неоднорідностей в керувальних об'єктах; вдосконалення інтерфейсів користувача.

Значний внесок у розвиток теорії та практики автоматизованого вихрострумового неруйнівного контролю зробили відомі вітчизняні та закордонні вчені: Бучма І.М., Гальченко В.Я., Карпаш О.М., Кісіль І.С., Луценко Г.Г., Маєвський С.М., Себко В.П., Сучков Г.М., Тетерко А.Я., Тюпа І.В., Учанін В.М., Хандецький В.С., Шаповалов Є.В., M.J. Johnson, M. L. Burrows, R. A. Morris, S. B. Chan та інші. Роботи цих авторів не передбачали використання ВСК в системах керування виробничими технологічними процесами, і були спрямований на застосування методів і засобів ВСК для контролю виробів на етапах поствиробництва та експлуатації. На жаль, дотепер питанням використання автоматизованих систем ВСК в АСКТП приділялося недостатньо уваги.

В розвиток теорії автоматичного керування технологічними процесами останнім часом зробили значний внесок вітчизняні та закордонні науковці Безвесільна О.М., Кондратенко Ю.П., Кунцевич В.М., Лукінюк М. В., Чікрій А.А., Young Joo Son, Zachary C. Pope, Jovan Pantelic, Rosh Roy, Ritesh Sugandhi та інші, але в їх працях також не розглянуто питання використання методів і засобів ВСК в АСКТП.

На сьогодні ВСК, що використовує гармонічні сигнали для збудження вихрових струмів в керувальних об'єктах, демонструє високу надійність. Основні характеристики та параметри виробів визначаються через такі параметри сигналів трансформаторного вихрострумового перетворювача як амплітуда та фазовий зсув (або комплексний опір для параметричних перетворювачів). Сучасні технології ВСК включають різні підходи і методи опрацювання сигналів вихрострумових перетворювачів – спектральний аналіз, методи цифрової обробки сигналів, методи статистичного опрацювання експериментальних даних та інші передові технології опрацювання сигналів. Це дає змогу підвищити інформативність ВСК, зменшити вплив зовнішніх факторів.

При проведенні вихрострумового аналізу та інтерпретації отриманих даних існує ряд чинників, які впливають на точність формування керувальних впливів в САК. Серед цих чинників слід відзначити зазор між вихрострумовим датчиком та виробом, флуктуації електромагнітних характеристик матеріалу, аномалії

поверхневої структури матеріалу виробу, присутність екзогенних і техногенних завад і деякі інші. Крім того технологічний процес хімічного фрезерування може супроводжуватись дією ряду чинників, які мають випадковий характер. З метою забезпечення високої точності формування оцінки товщини керувального об'єкту та визначеного на її основі керувального впливу необхідно застосовувати передові методи та методики опрацювання та аналізу сигналів ВСК в САК хімічного фрезерування.

Сьогодні прогрес та вдосконалення методів та засобів ВСК визначається зростанням потреб у контролі та управлінні технологічними процесами, складністю виробів, високими вимогами до інформативності та достовірності отриманих даних. Ці тенденції призвели до розроблення багатoelementних вихрострумових перетворювачів – ВСК, потенційні можливості яких суттєво перевищують можливості одноelementних перетворювачів та систем, що базуються на них.

Незважаючи на значні теоретичні досягнення у сфері ВСК, теорія ВСК для неруйнівного контролю в контексті керування технологічними процесами потребує більш детального визначення та розвитку. До цього часу не було розроблено завершених математичних моделей сигналів ВСК, які б дозволяли ефективно аналізувати та визначати їх параметри, використовувати в комп'ютерних експериментах з сигналами ВСК. Це протиріччя між високими інформаційними можливостями ВСК та обмеженими можливостями традиційних методів та сенсорів у відображенні комплексного стану електропровідних керувальних об'єктів в технологічних процесах їх виготовлення та обробки ставить перед дослідниками завдання розроблення більш досконалих та адаптованих підходів до використання методів та засобів ВСК в АСКТП.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає основним напрямам діяльності Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і мала безпосередній зв'язок з проєктами, що виконувались на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю та кафедрі автоматизації та систем неруйнівного

контролю, та виконувалась в рамках договору про співпрацю між КПІ ім. Ігоря Сікорського (м. Київ) та Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів). Автор був співвиконавцем ініціативного проєкту “Дослідження вихрострумowego методу неруйнівного контролю з використанням імпульсного збудження перетворювача ”, Державний реєстраційний номер: 0116U004742, 2018 р.

Мета і задачі дослідження. Метою є підвищення ефективності процесу хімічного фрезерування за рахунок включення в АСКТП ХФ засобів вимірювання товщини виробів на основі технології вихрострумowego контролю з перетворювачами матричного типу. Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити **наступні задачі:**

1. Проаналізувати процес хімічного фрезерування як об'єкту автоматизації та дати формалізований опис процесу визначення товщини виробу на основі використання вихрострумowego методу контролю.
2. Запропонувати структуру САК процесу ХФ, в якій якість цього технологічного процесу забезпечується за рахунок підтримання заданої температури травника та зупинки процесу травлення при досягненні необхідної товщини керувального об'єкту
3. Проаналізувати сучасні тенденції розвитку вихрострумowego контролю і на цій основі обґрунтувати використання технології матричного ВСК в АСКТП ХФ
4. Запропонувати нові вторинні інформативні ознаки, які отримуються з фазової характеристики сигналів ВСМ для використання в САК процесу ХФ.
5. Розробити модель сигналів ВСМ з неперервним гармонічним збудженням необхідну для коректного формування керувальних впливів в САК процесу ХФ.
6. Розробити методичне та алгоритмічно-програмне забезпечення підтримки роботи вихрострумowego засобу визначення товщини керувального об'єкту у САК процесу ХФ.
7. Розробити і провести натурні та модельні дослідження засобу ВСК з ВСМ.

Об'єктом дослідження є процес хімічного фрезерування.

Предметом дослідження є система автоматизованого керування процесом хімічного фрезерування з використанням технології матричного вихрострумowego контролю в контурі визначення товщини виробу.

В роботі застосовано такі **методи дослідження**:

- методи математичного аналізу;
- методи теорії вимірювань;
- методи математичного аналізу;
- методи теорії ймовірності та математичної статистики;
- методи комп'ютерного моделювання та опрацювання експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано багатовимірну модель сигналів вихрострумової матриці при гармонічному збудженні її елементів, що враховує неідентичності характеристик перетворювачів матриці і надає можливість обґрунтувати необхідність виконання операцій нормалізації сигналів в каналах опрацювання для забезпечення автоматичного керування процесом хімічного фрезерування.

2. Набуло подальшого розвитку використання вихрострумowego контролю з перетворювачами матричного типу, що включає моделі інформаційних сигналів вихрострумової матриці, метод їх опрацювання за допомогою дискретного перетворення Гільберта для автоматизації процесу керування хімічним фрезеруванням, що призводить до підвищення його ефективності завдяки скороченню часу та збільшенню швидкості травлення.

3. Набуло подальшого розвитку використання вторинних інформативних ознак сигналів вихрострумової матриці у вигляді векторів кругових статистик, які отримані із дискретної фазової характеристики цих сигналів, що дає змогу підвищити ефективність процесу хімічного фрезерування за рахунок збільшення точності визначення товщини виробів в автоматичному режимі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

1. Запропоновано формалізований опис процедури визначення товщини об'єкту керування в процесі ХФ на основі вихрострумowego методу з перетворювачами екранного типу, що дало змогу коректно використати технологію матричного ВСК в САК процесу ХФ.

2. Розроблено двоконтурну САК процесу ХФ, що включає контур керування температурою травника в заданих межах та контур керування із засобом ВСК, який реалізує зворотний зв'язок в системі через прецизійне вимірювання товщини виробу для автоматичної зупинки процесу хімічного фрезерування при досягненні необхідної товщини, що в сукупності забезпечує високу якість та повторюваність цього технологічного процесу.

3. В роботі розроблено складові методичного та алгоритмічно-програмного забезпечення підтримки роботи вихрострумowego засобу визначення товщини керувального об'єкту, а саме:

- методику та алгоритмічно-програмне забезпечення, яке реалізує метод аналізу сигналів ВСМ за допомогою дискретного перетворення Гільберта, що дає змогу формувати вибірки характеристик сигналів значних обсягів та визначати вторинні інформативні ознаки сигналів ВСМ;
- два варіанта структурно-логічних схем автоматизованих систем нормування каналів ВСМ на основі використання фільтра Гільберта та синхронних детекторів, які забезпечують вирівнювання амплітуднофазових характеристик каналів ВСМ, що дає змогу підвищити точність формування керувальних сигналів в АСКТП ХФ;
- методику та алгоритмічне забезпечення, яке дає змогу виконати операції нормалізації комплексних коефіцієнтів передачі вимірювальних каналів засобу ВСК з ВСМ, і на цій основі підвищити точність визначення товщини керувального об'єкту в процесі хімічного фрезерування.

4. Розроблено та досліджено апаратні складові засобу ВСК з ВСМ, а саме:

- прототип чотириелементного ВСМ, що складається з чотирьох параметричних накладних ВСП і може бути використаний для

формування керувальних впливів, за якими відбувається зупинка процесу травлення;

- прототип засобу ВСК на платформі Red Pitaya що реалізує методологію опрацювання даних за допомогою ДПГ для аналізу характеристик сигналів ВСМ, відслідковуючи динаміку зміни їх амплітудно-фазових характеристик.

Особистий внесок здобувача. Мета роботи, постановка завдань досліджень та аналіз результатів досліджень виконувалися спільно з науковим керівником.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, що викладено в дисертації, були представлені автором та обговорені на 4 фахових конференціях.

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковані в 13 наукових працях (2 одноосібні), у тому числі: 7 (1 одноосібна) статей в провідних вітчизняних та закордонних фахових журналах (1 у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus) та 6 (1 одноосібна) доповідей і тез конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел (126 бібліографічних посилань) і 3 додатків. Повний обсяг роботи становить 190 сторінок, в тому числі 46 ілюстрації, 9 таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ХІМІЧНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ ВСК З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ АСТКТП ХФ

1.1. Технологія хімічного фрезерування виробів як об'єкт автоматизованого керування

Технологія хімічного фрезерування оснований на контрольованому хімічному розчиненні металів та інших матеріалів у розчинах кислот або лугів. Значення хімічного фрезерування у сучасній промисловості неможливо переоцінити. Ця технологія забезпечує виробництво деталей складної конфігурації з високою точністю, що є критично важливим у таких галузях, як виготовлення компонентів авіаційних двигунів, космічних апаратів та точної електроніки [10]. На поверхню заготовки може бути нанесена захисна плівка. На тих ділянках заготовки, де необхідно провести процес травлення, вказана захисна плівка видаляється. Після цього заготовка поміщається у травильний розчин, який взаємодіє з металом на відкритих ділянках, розчиняючи його (рис. 1.1). Така технологія дає змогу отримувати деталі з високим ступенем точності та складності форм, що є недосяжним при використанні традиційних механічних методів обробки. У процесі обробки знімання матеріалу може здійснюватися з усієї поверхні заготовки або з її обмеженої ділянки, на різні глибини або на всю товщину деталі (наскрізне фрезерування).

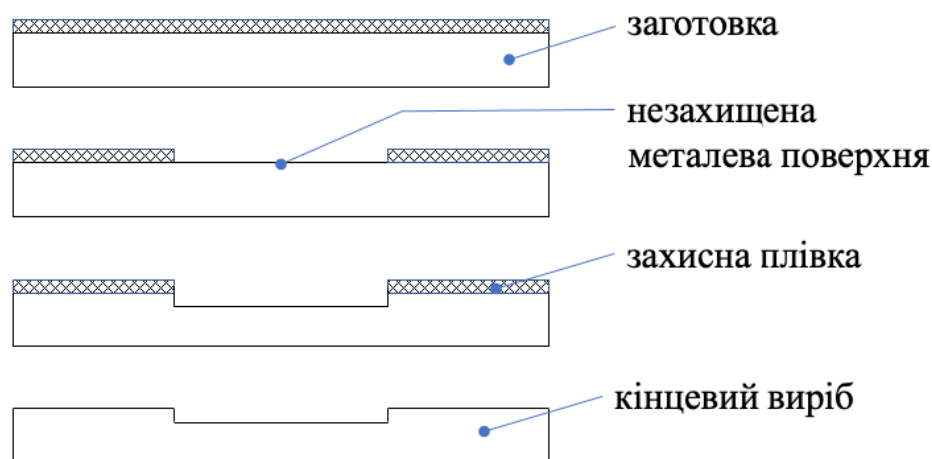


Рис. 1.1. Ілюстрація процесу хімічного фрезерування на різних стадіях

Розвиток технології хімічного фрезерування має глибокі історичні корені, що сягають середини XX століття, коли вперше були виявлені потенційні можливості застосування хімічних процесів у металообробці. З того часу ця технологія пройшла значний шлях еволюції: від первинних експериментальних методик до високоефективних та точно контрольованих процесів, що використовуються сьогодні [11]. Цей прогрес був забезпечений завдяки розвитку хімічної науки, матеріалознавства та автоматизації, що разом відкрили нові горизонти в точності та якості обробки матеріалів.

Хімічне фрезерування охоплює такі основні етапи: підготовку поверхні заготовки; нанесення захисної плівки; хімічне травлення; видалення захисного шару і контроль якості кінцевого виробу (рис. 1.2).

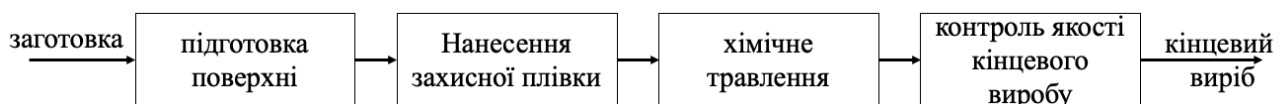


Рис. 1.2. Основні етапи хімічного фрезерування

Цей вид обробки особливо ефективний при роботі з тонкостінними деталями у випадку, коли немає можливості надійно їх затиснути для механічної обробки. Серед інших переваг і особливостей хімічного фрезерування слід відзначити наступні:

- висока продуктивність і якість обробки об'єктів виробництва;
- висока точність обробки;
- вироби після хімічного фрезерування не вимагають додаткових механічних операцій;
- можливість видалення тонкого шару металу на кривих поверхнях;
- відсутність механічного впливу, що виключає деформацію тонкостінних об'єктів виробництва;
- короткий цикл підготовки виробництва;
- безвідходність виробництва за рахунок регенерації продуктів процесу травлення;

- не потребує високої кваліфікації робітників.

Певними обмеженням щодо використання процесу ХФ є:

- обмеження глибини травлення внаслідок підтравлення бокових поверхонь;
- неможливість виготовлення гострих та прямих кутів;
- хімічне фрезерування ефективне не для всіх типів матеріалів;
- хімічне фрезерування менш ефективне для дуже товстих матеріалів;
- хімічні реагенти, які використовуються в процесі травлення, можуть бути токсичними або шкідливими для навколишнього середовища та обслуговуючого персоналу.

Об'єктами виробництва в цьому технологічному процесі найчастіше виступають вироби з алюмінієвих і титанових сплавів, міді, вуглецевих та нержавіючих сталей.

Сам процес травлення може бути реалізований у різні способи: зануренням у спокійний розчин травника (рис. 1.3); зануренням у переміщуваний розчин травника; розпиленням розчину травника; струменевим травленням.

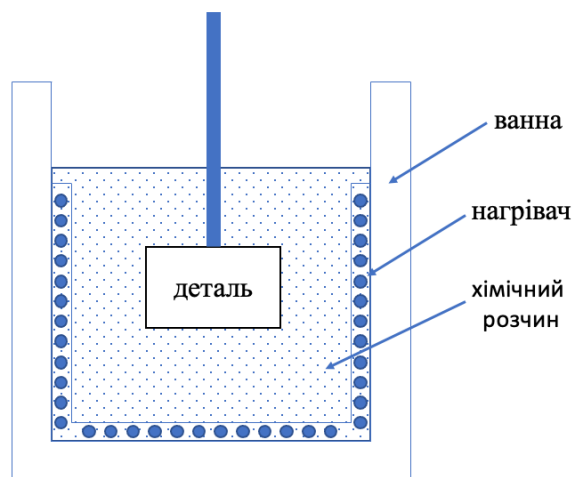


Рис. 1.3. Хімічне фрезерування, що реалізується шляхом занурення деталі у спокійний розчин травника

Підтримувати сталий процес ХФ в певних межах можна за рахунок керування температурою травника. На рис. 1.4 представлена узагальнена система автоматизованого керування температурою розчину у процесі хімічного

травлення. В цій системі технологічний об'єкт керування (ТОК) представляє собою процес хімічного травлення. Для вимірювання температури використовується датчик температури (Д), розміщений безпосередньо у ванні із розчином. Цей датчик забезпечує постійний контроль температури (y_v), передаючи дані до системи керування.

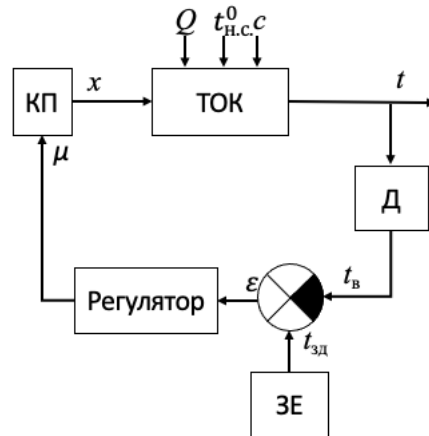


Рис. 1.4. Узагальнена система автоматизованого керування температурою розчину травника

Завдання бажаної температури здійснюється за допомогою задаючого елемента (ЗЕ), який дає змогу встановити необхідні рівень цього параметра $u_{зд}$. Елемент порівняння аналізує різницю між заданою та виміряною температурою, виявляючи таким чином "сигнал помилки" (ε). Регулятор, отримавши сигнал помилки, формує відповідний керувальний вплив (μ). Цей вплив може бути використаний для активації системи нагрівання або охолодження, що входять до складу керувального пристрою (КП). Таким чином, керувальний пристрій реагує на сигнали від регулятора, забезпечуючи підтримку температури на заданому рівні.

Швидкість травлення визначається багатьма чинниками і зазвичай складає $\pm (0,025 - 0,1)$ мм/хв., шорсткість поверхні (R_z) - 40 – 10.

Найчастіше контроль якості відбувається на фінальній стадії технологічного процесу хімічного фрезерування шляхом візуального огляду і контролю окремих розмірів.

У разі, якби швидкість травлення v була би сталою величиною, товщину шару витравленого металу Δh можна було точно визначати за часом травлення Δt

$$\Delta h = v \cdot \Delta t. \quad (1.1)$$

Проте технологічний процес хімічного фрезерування (ТП ХФ) чутливий до порушень режимів його перебігу і до ряду факторів, які важко піддаються контролю та врахуванню [12]. Тому досягнення бажаної глибини травлення за заздалегідь розрахованим інтервалом часу травлення не завжди дає змогу досягнути необхідних показників точності.

Врахувати вплив на швидкість травлення, отже і на товщину витравленого шару, крім температури й інших різнорідних параметрів вкрай важко. Більш плідною ідеєю є керування зупинкою процесу ХФ безпосередньо за кінцевим параметром виробу – його товщиною. Проте задача вимірювання товщини виробів в процесі ХФ обтяжена додатковими вимогами: по-перше, вимірювання повинно виконуватись без механічного контакту перетворювачів з виробом, по-друге, процес первинного перетворення необхідно виконувати в агресивному середовищі, по-третє, необхідно забезпечити високу чутливість (здатність контролювати товщину виробу з абсолютною похибкою в декілька одиниць – десятків мікрон). В роботі [13] було обґрунтовано можливість розв'язання цієї задачі методами вихрострумowego неруйнівного контролю. Зокрема для контролю виробів з алюмінієвих сплавів в процесі ХФ в діапазоні товщин від 0,5 до 7 мм запропоновано використовувати вихрострумові перетворювачі (ВСП) екранного типу. Встановлено, що фазовий зсув сигналів між котушками таких перетворювачів лінійно залежить від товщини ОК. Однак такі перетворювачі з однією парою котушок (збуджуюча і вимірювальна) не дають змоги контролювати товщину виробів в процесі ХФ на значних ділянках поверхні. Крім того використання вихрострумowych засобів контролю в автоматизованій системі керування процесом хімічного травлення не було розглянуто. Значно більші можливості для використання в таких системах надають вихрострумові матричні перетворювачі.

1.2. Аналіз особливостей ВСК для використання в АСКТП

В цілому методи неруйнівного контролю (НК) полягають у проведенні оцінювання параметрів та характеристик окремих об'єктів загального виробничого комплексу, в ході якого не порушується придатність об'єктів до подальшої експлуатації [14-17].

На сьогодні швидкий розвиток методів та засобів ВСК [3, 4] вказує на їх здатність відповідати сучасним вимогам не тільки організації та проведення НК готової продукції в автоматичному режимі, але й автоматизації цілої низки виробничих технологічних процесів.

Загальний принцип застосування методів ВСК базується на збудженні в електропровідному середовищі вихрових струмів та аналізі параметрів породженого ними електромагнітного поля [16,17, 31-33]. Відповідно, ключовим обмеженням щодо застосування методів ВСК є наступне: керувальним об'єктом може бути виріб з електропровідних матеріалів, який змінює свої характеристики і параметри, що визначають його стан, під дією зовнішніх факторів.

Значні переваги у автоматизації ВСК відкрились у зв'язку з появою вихрострумових матриць (ВСМ) та розвитком багатоканальних засобів ВСК. На основі набору результатів вимірювання керованих параметрів формується поле їх значень, яке може бути використано для керування технологічним процесом.

Викладене вище дає підстави зробити висновок про відповідність технології матричного ВСК сучасним тенденціям розвитку НК і вимогам щодо можливості їх використання в АСКТП ХФ, а саме:

- кожне окреме вимірювання включає в себе зчитування даних з набору датчиків, що дає змогу або зменшити загальний час отримання необхідних даних зі всієї площі ОК кратно збільшенню кількості елементів матриці, або, у випадку фіксованого часу отримання даних – кратно збільшити обсяг даних вимірювань;
- застосування ВСМ дає змогу за рахунок усереднення або використання більш складних статистичних алгоритмів аналізу зменшити

похибки вимірювання параметрів керувального об'єкту, в тому числі і товщини виробу, і на цій основі підвищити точність їх оцінювання;

- застосування матричних ВСП не вимагає попередньої підготовки чи очищення ОК і може ефективно проводитися через захисний шар (лаку, фарби та інших неструмопровідних матеріалів);
- широкий інструментарій автоматизації при застосуванні систем ВСК із перетворювачами матричного типу може бути включений у загальну систему автоматизованого керування виробничими технологічними процесами з електропровідними виробами;
- отримання наборів даних результатів дослідження у цифровій формі з подальшим опрацюванням засобами цифрового аналізу та представленням у вигляді, що є найбільш зручним для формування керувальних впливів в САК процесу ХФ.

Зазначені особливості ВСК цілком відповідають вимогам до сучасного безупинного виробництва з високим рівнем контролю якості продукції. Інфраструктура такого виробництва може бути ефективно і з мінімальною затримкою реорганізована відповідно до актуальних інновацій та масштабована у випадку зростання попиту на продукцію.

З метою більш повного висвітлення можливостей ВСК для використання в АСКТП розглянемо основні тенденції автоматизації цього виду контролю.

1.3. Аналіз робіт в області автоматизації ВСК

Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується значним зростанням обсягів продукції, її складнішою структурою, а також зростанням частки виробів, які експлуатуються у складних умовах з підвищеним ризиком негативного впливу на людей і навколишнє середовище у разі їхньої поломки. Один із напрямів зменшення цих ризиків є збільшення обсягів операцій неруйнівного контролю виробів як на етапі виробництва, так і на етапах експлуатації та відновлювального ремонту виробів. В свою чергу задовольнити вимоги щодо збільшення обсягів НК та підвищення якості контролю не можливо

без часткової або повної автоматизації операцій контролю [17]. Ці виклики сприяли підвищенню інтересу фахівців у галузі ВСК до питань автоматизації ВСК.

В роботі [17] наведено ряд прикладів автоматизації процесу ВСК, зокрема представлено вихрострумову систему виявлення та ідентифікації дефектів на внутрішній і зовнішній поверхнях труб (діаметром 102 мм) печей вторинного риформінгу. До складу системи входять: чотири ВСП подвійного диференціювання, сканувального пристрою з блоком керування та індустріального комп'ютера. Система забезпечує 4-канальний двосторонній контроль труб під час експлуатації і забезпечує автоматичне розділення дефектів на декілька класів по глибині їх залягання відносно поверхні труби. З цією метою кожен вихрострумний канал обробляє сигнал від відповідного ВСП на двох частотах: виявлення дефектів на внутрішній поверхні труби відбувається на частоті 1,4 кГц, а на зовнішній – на частотах 1,4 кГц та 5 кГц. Система надає можливість візуалізувати всі знайдені дефекти на внутрішніх та зовнішніх поверхнях труби. Програмне забезпечення системи дає змогу зберігати і документувати отримані результати контролю. Рух сканувальної конструкції забезпечується пневматичними пристроями, що сприяє зменшенню індустріальних завад, які впливають на ВСП.

В цій же роботі [18] представлено опис автоматизованої системи комплексного контролю залізничних осей, в якій ультразвуковий контроль доповнено вихрострумовим контролем. Це дало змогу охоплювати контролем все тіло залізничної осі і виявляти дефекти матеріалу осі не тільки на значній глибині, але й на його поверхні і у підповерхневих шарах. Через складну форму і велику зону контролю система ВСК здійснює контроль паралельно 32 окремими каналами зі своїми ВСП мультидиференціального типу. Сканувальний пристрій забезпечує обертання залізничної осі навколо власної осі та позиціонування блоків ВСП над її поверхнею. Перевірка робочого стану системи та її калібрування здійснюється за допомогою спеціальної контрольної осі, в яку інтегровано вставку зі штучними дефектами.

Інша розробка – автоматизована система ВСК прокату з алюмінієвих сплавів, спроектована в інституті Фраунгофера (Саарбрюкен, Німеччина). Система розроблена для контролю алюмінієвого прокату товщиною від 2,5 до 14 мм зі швидкістю до 50 м/хв при температурі 90°C. Використання в системі мультидиференціальних ВСП дало змогу одночасно задовільнити дві суперечливі вимоги: отримати високу роздільну здатність і високу чутливість до локальних дефектів, завдяки чому кількість ВСП було зменшено до 64. Крім блоків ВСП до складу системи входять мультиплексори для комутації ВСП, вихрострумний блок для оброблення сигналів ВСП, персональний комп'ютер для керування системою через канал Ethernet, датчик шляху та пристрій маркування виявлених дефектів.

В статті [19] автори подали опис роботизованої системи ВСК виробів зі складною геометрією поверхні. Ця система включає такі основні блоки: робот-маніпулятор для сканування поверхні ОК вихрострумовим перетворювачем; координатний стіл з кількома ступенями свободи, на якому розташовується ОК; автоматизована станція з набором перетворювачів різних типів; блок відеосенсорів, який виконує ідентифікацію геометричної моделі ОК; персональний комп'ютер; електронний блок керування і оброблення сигналів. Автори підкреслили, що інтеграція можливостей ВСК та роботів-маніпуляторів в одній системі дало змогу підвищити продуктивність та вірогідність контролю і розширити його функціональні можливості для широкої номенклатури матеріалів і виробів за рахунок виключення з процесу контролю суб'єктивного людського фактору та оптимізації використання можливостей інформаційно-вимірювальних технологій.

Джерело [20] подає інформацію про зручний засіб ВСК типу ViCTor 2.2D, призначений для автоматизованої перевірки ротаційно-симетричних компонентів таких як підшипники, поршневі пальці, гільзи циліндрів тощо. Зазначено, що методи ВСК ідеально підходять для автоматизації процесу перевірки цих компонентів з урахуванням таких особливостей як безконтактність та висока швидкість перевірки. Цей засіб контролю має надзвичайно дружній

користувальницький інтерфейс, а завдяки доступній широкій геометрії ВСП забезпечує максимальну гнучкість для кожного окремого застосування. Даний засіб ВСК призначений для широкого використання у таких галузях, як аерокосмічна індустрія, транспорт, металообробка, промислове виробництво та інше.

В роботі [21] наведено дані про вихроструміву систему SMARTSCAN Aircraft Wheel Inspection System, розроблену для перевірки опорних і носових коліс авіаційної техніки від різних виробників. Система складається з наступних компонентів: робочий стіл із піддоном для розміщення коліс; механізм захоплення втулки колеса; механізм для підняття та опускання коліс; механізм обертання коліс; механізм для переміщення ВСП в горизонтальній і вертикальній площинах; підставка для дефектоскопу Eddycon CL; панель керування системою. Модель забезпечує повністю автоматизований цикл перевірки із зупинкою при виявленні дефектів, збереження результатів перевірки та створення бази даних.

Автоматизована система вихрострумівого контролю EDC RAIL 5065 призначена для перевірки залізничних рейок на етапі виробництва [22]. Система виявляє поверхневі дефекти, такі як тріщини на головках рейок, переходи радіусу головки та боки. Система EDC RAIL 5065 має модульну структуру, обладнання якої може бути встановлене як самостійна одиниця або інтегроване в систему НК підприємства. Цю систему можна адаптувати до контролю рейок з різноманітними геометричними профілями, використовуючи ВСМ. Структура системи забезпечує стабільний зазор між вихрострумовим перетворювачем та поверхнею рейки протягом усього процесу контролю.

Система автоматизованого контролю від компанії TecScan [23] представляє комплексне рішення для контролю підшипників. Дана система здійснює контроль доріжки кулькових та роликових підшипників, а також внутрішніх жолобів. Процес сканування здійснюється автоматизовано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення TecView™ ЕС, яке дає змогу керувати рухом сканера, налаштовувати параметри сигналів збудження, збору і аналізу даних. Процедура опрацювання сигналів дозволяє візуалізувати отриману інформацію у вигляді

треків або С-сканів та формувати звіти проведеної процедури контролю.

Також компанія TecScan випускає автоматизовану систему вихрострумового контролю деталей двигунів літальних апаратів, зокрема дисків вентиляторів та компресорів [24,25]. Процес сканування виконується за допомогою обертального столу, на якому розміщується диск, тоді як ВСП переміщується у тривимірному просторі, забезпечуючи постійний зазор та перпендикулярність до поверхні диску. Система реєструє інформативні сигнали із відповідними координатами сканування для аналізу С-сканів та генерації звіту за результатами контролю.

Автоматизована система контролю поверхні довгих брусів та труб у металургійній галузі від компанії Olympus представлена в [26]. Сканування поверхні здійснюється за допомогою ВСМ які адаптовані до геометрії ОК. Програмне забезпечення дає змогу виконувати моніторинг у реальному часі, надаючи користувачу детальну інформацію про стан критичних компонентів системи контролю а також сповіщення про виявлення відхилень параметрів контролю які виходять за межі допустимих значень.

Серед інших робіт, присвячених питанням автоматизації ВСК варто відзначити роботу [27], в якій представлено автоматизовану вихрострумову систему на основі ВСМ для контролю гарячого дроту та перевірки трубок парогенераторів і конденсаторів. У статті [28], описано технологію ВСК на основі ВСМ яка була застосована для виявлення та визначення розмірів дефектів типу “фретинг” та ерозії теплообмінної труби. Для верифікації цієї технології всі виявлені дефекти були додатково перевірені за допомогою ультразвукового контролю. Результати дослідження засвідчили, що ймовірність виявлення дефектів за допомогою розглянутої системи ВСК становила 84,6%.

В статті [29] досліджується інтеграція ВСК у технологічний процес автоматизованого контролю просторової орієнтації волокон у виробництві деталей із вуглецево-волокнистих композитних матеріалів. В технологічному процесі використовується нагрівач для підготовки поверхні матеріалу, забезпечуючи оптимальну температуру для адгезії до поверхні, а також відрізний

механізм який має відрізати волокно на задану довжину для формування потрібної структури. ВСП розташовується в околі системи автоматизованого укладання волокон для моніторингу якості розміщення волокон у реальному часі. Це дає змогу виявляти дефекти структури волокон такі як неправильна орієнтація волокна, прогалини чи перекриття відразу після їх формування, сприяючи своєчасному виправленню дефектів і виключити для дефектної заготовки наступну енергозатратну технологічну операцію її нагрівання до високої температури і вчасно повернути заготовку на переробку.

Виконаний аналіз робіт дав змогу узагальнити тенденції розвитку технологій автоматизованого ВСК. Ґрунтуючись на цьому аналізі на рис. 1.5 подано систематизацію автоматизованих систем ВСК за різними ознаками.



Рис. 1.5. Систематизація автоматизованих систем ВСК

За місцем у виробничому процесі виділено системи, що інтегровані в процес виробництва і здатні виробляти керувальні впливи, і автономні системи, призначені для контролю готової продукції чи напівфабрикатів.

Автономні системи ВСК функціонують незалежно від основного виробничого процесу. Зазвичай вони встановлюються в окремих місцях для періодичного контролю якості або діагностики. Вони можуть бути мобільними та здатними пересуватися між різними частинами виробництва.

Інтегровані в процес виробництва системи ВСК вбудовані безпосередньо у АСКТП. Вони автоматично моніторять якість продукції на різних етапах виробництва без зупинки процесу. Зазвичай вони здатні надавати відгук у реальному часі, що дає змогу оперативно виправляти виявлені проблеми.

За кількістю чутливих елементів можна виділити одноелементні, багатоелементні та матричні ВСП. Використання ВСК в автоматизованих системах контролю має певні переваги:

- охоплення більшої площі контролю за одне вимірювання;
- зменшення часу технологічної операції контролю;
- збільшення обсягу вимірювальної інформації;
- спрощення механічних сканерів;
- перевірка ОК зі складним профілем поверхні;
- отримання С-сканів в режимі реального часу.

За видом вихідних сигналів можна виділити системи ВСК з *аналоговими і дискретними сигналами*. Перші можуть бути використані для керування, позиціонування робочих інструментів або параметрів технологічного процесу, таких як температура або висота електрода над виробом під час зварювання, а також для формування діагностичних ознак, які використовуються для класифікації дефектів чи визначення їх розмірів. Дискретні (часто бінарні) сигнали засвідчують певні факти, наприклад, відхилення певних параметрів виробу від встановлених норм, перевищення бракувального рівня, формування сигналу для маркування дефектів тощо.

Нарешті, за призначенням автоматизовані системи ВСК поділяються на:

- системи керування параметрами технологічного процесу;
- системи виявлення зношення технологічного обладнання (наприклад, калібрів у проволоченому стані);
- системи сортування виробів за їх певними параметрами;
- системи дефектоскопії;

- системи оцінювання характеристик *виробів та матеріалів* (наприклад, електропровідності матеріалу після хіміко-термічних операцій, товщини виробу після хімічного фрезерування тощо).

Зупинимось більш детально на автоматизованих системах ВСК, які інтегруються у виробничий процес і використовуються для керування технологічними параметрами. В цьому випадку вони забезпечують автоматизований збір вимірювальної інформації у вигляді сигналів ВСП, їх первинне оброблення, а також розрахунок та видачу інформації оператору чи керувальних впливів безпосередньо на технологічне обладнання згідно з прийнятими критеріями керування.

Концепція включення автоматизованих систем ВСК в АСКТП представлена на рис. 1.6.

Розглянемо деякі можливі варіанти використання ВСК в автоматизованих системах керування технологічними процесами.

Електрозварювання металів. В процесі зварювання можна використовувати ВСК для контролю зазору між зварюваними деталями або перевірки якості зварних швів у реальному часі (у разі, якщо окалина не утворюється і не перешкоджає руху ВСП).

Нанесення захисних діелектричних покриттів. ВСК може бути використаний для моніторингу товщини захисних покриттів на металевих деталях. Якщо товщина покриття виходить за межі заданих параметрів, можна оперативно скоригувати параметри процесу покриття.

Лиття металу. Під час процесу лиття можна використовувати ВСК для виявлення включень, порожнин або тріщин у виробах. Виявлення таких дефектів дає змогу оперативно змінювати параметри лиття для покращення якості виробів.

Прокат листового металу. Якщо автоматизована система ВСК виявляє дефект (неоднорідності, вихід товщини листа за встановлені межі тощо), виробляється і надсилається сигнал (або повідомлення) керування параметрами процесу прокату.

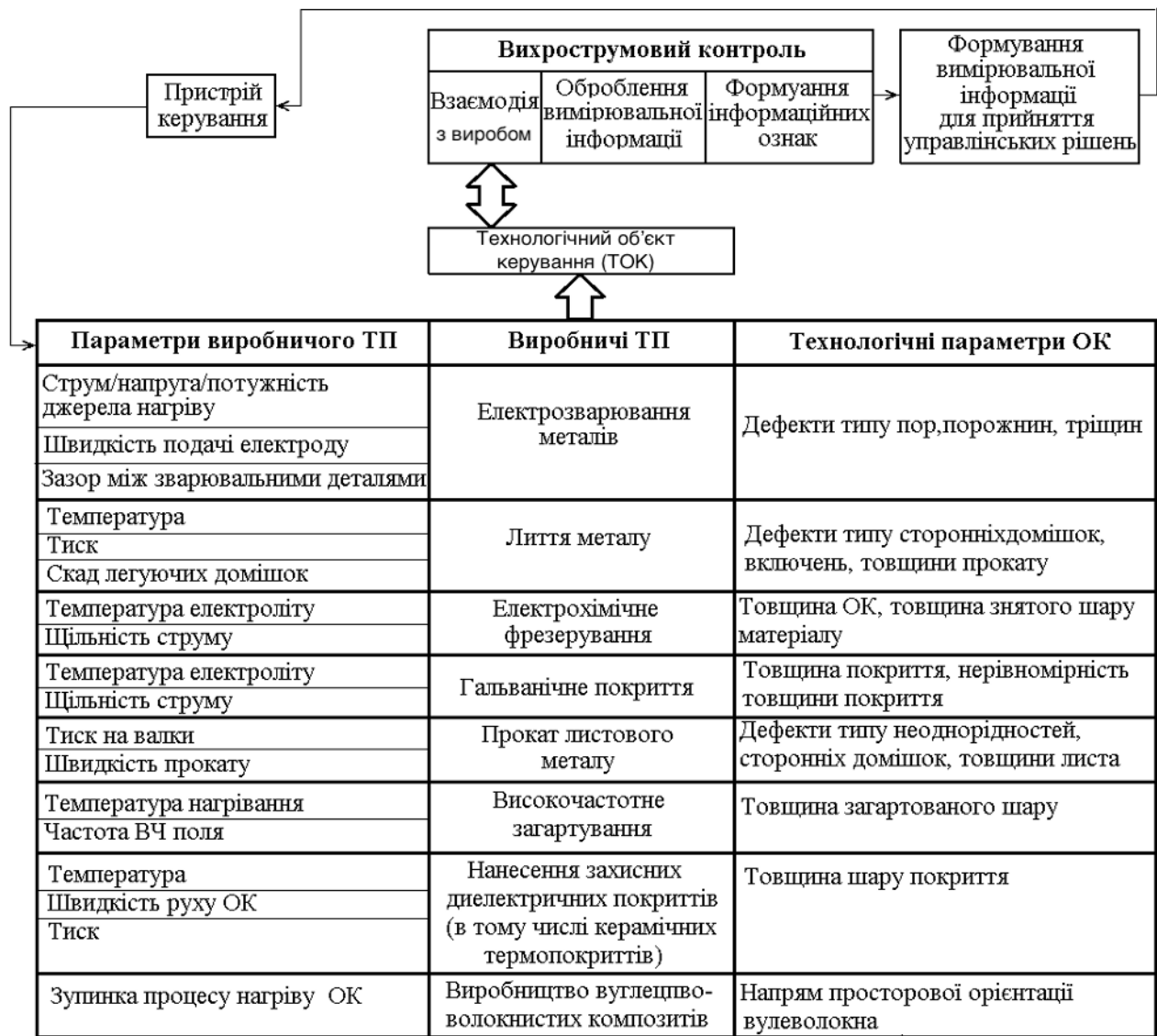


Рис. 1.6. Графічне представлення концепції включення автоматизованих систем ВСК у АСКТП

Високочастотне загартування. Автоматизований ВСК використовується для моніторингу глибини загартування та виявлення дефектів в реальному часі. Якщо система виявляє невідповідність або дефекти, сигнал розбіжності надсилається до системи автоматичного керування, яка може автоматично змінювати параметри процесу загартування, до прикладу, температуру нагрівання або частоту високочастотного поля.

Гальванічне покриття. Автоматизований ВСК використовується для контролю у реальному часі якості покриття листового металу іншим металом більш стійким до дії різних шкідливих факторів. У разі виявлення зон з

неоднорідним покриттям, сигнал розбіжності надсилається до системи автоматичного керування температурою електроліту чи щільності струму. Подібні керувальні впливи реалізуються і в системі *хімічного фрезерування*.

Взаємодія електропровідних виробів з первинними вимірювальними перетворювачами – ВСП та ВСМ, відбувається через електромагнітне поле, що не вимагає механічного контакту перетворювачів з виробом, що важливо для реалізації контролю в технологічному потоці в умовах руху останнього відносно перетворювача. У значній частині практичних застосувань ВСК технологічні процеси мають значну інерційність, що не вимагає розв’язання завдань швидкого реагування і зміни технологічних параметрів.

Виконаний аналіз тенденцій розвитку автоматизованих систем ВСК дав змогу сформулювати наступні загальні висновки:

- 1) автоматизація процесу ВСК в сукупності з використанням матричних перетворювачів дає змогу розширити функціональні можливості ВСК та підвищити його ефективність за рахунок скорочення часу контролю та отримання більших обсягів інформації за одиницю часу;
- 2) існує можливість використання методів та засобів ВСК при створенні ефективних САК з метою отримання інформації про вимірювану величину;
- 3) різноманіття технологічних процесів та режимів їх реалізації, стрімкий розвиток інформаційно-вимірювальних технологій обумовлює необхідність скорочення часу розроблення нових засобів АСКТП.

1.4 Аналіз ВСМ як датчиків в АСКТП

Для ефективного застосування ВСК в АСКТП потрібно врахувати багато аспектів: від вибору відповідного перетворювача до обґрунтування моделі інформаційних сигналів і ефективного алгоритму їх опрацювання. Одним з відповідальних елементів засобів ВСК в АСКТП, який значною мірою визначає їх характеристики, є вихрострумний перетворювач (ВСП). Цілісна класифікацію ВСП наведена у працях вітчизняних вчених [30, 31]. Метою побудови класифікації є підготовка методологічного обґрунтування вибору найбільш

ефективних ВСП відповідно до конкретного завдання дослідження фізичних властивостей і геометрії виробів.

Перша класифікаційна ознака ВСП характеризує особливості взаємної організації систем збудження та реєстрації електромагнітного поля. Відповідно до неї перетворювачі поділяються на дві групи:

1. Параметричні ВСП, для яких обмотка збудження виконує роль і обмотки системи реєстрації. Зазначений клас перетворювачів характеризується простотою конструкції і, відповідно, компактністю та нижчим кошторисом. Їх недоліком є високий рівень похибки, що виникає внаслідок нестабільності параметрів обмотки, що впливають на проведення вимірювань чи контролю та підвищена чутливість до зміни температури навколишнього середовища.

2. Трансформаторні ВСП, у схемі яких застосовуються окремі елементи (підсистеми) для збудження та реєстрації електромагнітного поля. Зазначена група характеризується більшою складністю, що впливає на їх компактність та кошторис, але завдяки стабільності процесу вимірювання є можливість отримати більш точні результати контролю.

Наступною класифікаційною ознакою є взаємне розташування ВСП та виробу. В залежності від цього розглядають такі типи перетворювачів:

- накладні ВСП, що призначені для аналізу локальної області виробу;
- прохідні ВСП, на основі яких здійснюється діагностика лінійно-видовжених виробів таких як прутки, труби, дріт тощо;
- комбіновані ВСП, які уявляють собою сполучення накладних і прохідних катушок.

Актуальною класифікаційною ознакою є спосіб реєстрації сигналів перетворювача на основі якого здійснюється контроль чи вимірювання певних параметрів виробів. За цією ознакою розрізняють:

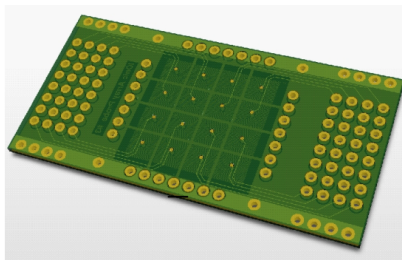
- абсолютні ВСП, які орієнтовані на аналіз абсолютних сигналів, отриманих від однієї обмотки ВСП;

– диференційні ВСП, які використовуються для аналізу різниці значень абсолютних сигналів, отриманих для двох локальних ділянок виробу за допомогою двох (чи більше) обмоток ВСП.

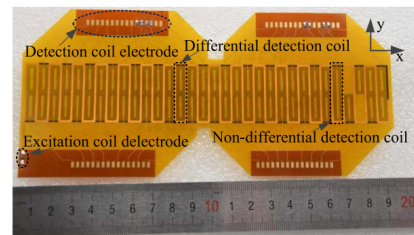
Нарешті, в залежності від типу організації процедури контролю/вимірювання виробу всі ВСП поділяються на такі дві групи:

- вихрострумові зонди з механічним скануванням поверхні виробу згідно заданої траєкторії;
- багатоелементні ВСП.

Дослідники вказують на значні переваги останніх, зокрема можливість зменшення часу дослідження, збільшення обсягів отримуваної інформації за одиницю часу, збільшення роздільної здатності та проведення машинного аналізу результатів контролю з подальшим їх представленням у зручній формі [23]. Приклади багатоелементних ВСП наведено на рис. 1.7.



а)



б)

Рис. 1.7. Матричні ВСП: а – на основі друкованих плат, б – на гнучкій основі.

Детальний огляд та аналіз нормативної бази, що стосується вихрострумових матричних перетворювачів, представлено в роботі [32].

Ключовим фактором для класифікації будь-якої частини апаратно-програмних засобів є розуміння та визначення сучасних підходів, які використовуються в області ВСК. Стосовно ВСК це передбачає не лише аналіз конструктивних особливостей самих ВСП, але і аналіз складових елементів, зокрема, сенсорів електромагнітного поля.

Раніше сенсором, зазвичай, була котушка. Однак, у контексті сучасних підходів та тенденцій, первинними вимірювальними перетворювачами можуть

виступати різноманітні елементи, виходячи зі специфіки поставленого завдання. Це розширює можливості ВСК за рахунок використання у ВСМ наступних елементів:

- магніторезистивних та ферозондових магнітометрів для малих амплітуд магнітного поля [33, 34];
- датчиків Холла [33, 35, 36], що характеризуються простою конструкцією, для яких значення вихідної напруги прямопропорційне нормальній складовій напруженості сумарного магнітного поля;
- високочутливих датчиків на основі гігантського магніторезистивного (Giant-Magnetoresistive, GMR) ефекту [37-39];
- спин-залежних датчиків [39, 40] на основі тунельного ефекту (Spin-Dependent Tunneling, SDT);
- надпровідних квантових інтерферометрів [41-42] (Superconducting Quantum Interference Devices, SQUID).

На сьогодні в області технологій ВСК найбільш ефективним вважається застосування саме GMR-датчиків [16, 17, 37-39] завдяки високій чутливості до неоднорідності магнітного поля, що викликано дефектами структури матеріалу ОК. Структура GMR-датчиків представляє собою чергування феромагнітних та немагнітних струмопровідних шарів нанометрового діапазону. GMR ефект спостерігається у вигляді значної зміни електричного опору залежно від того, чи намагніченість сусідніх феромагнітних шарів є паралельною чи антипаралельною. При паралельному вирівнюванні електричний опір є відносно низьким, а при антипаралельному – високим.

В сучасних фахових публікаціях за тематикою вихрострумової дефектоскопії струмопровідних матеріалів у якості альтернативи GMR-датчикам розглядаються SDT-датчики [16, 17, 39, 40]. SDT-датчики використовують квантовий ефект "тунелювання" електронів через тонкий шар оксиду алюмінію завтовшки $d_{\text{Al}_2\text{O}_3} \in 1..2 \text{ нм}$, що розташовується між двома шарами феромагнетиків. Напрямок і величина намагнічування між відповідними

магнітними шарами впливає на опір, який пропорційний зовнішньому магнітному полю, що реєструється датчиком. ВСК методи на основі SDT-датчиків дають змогу ефективно визначати мікророзмірні дефекти у струмопровідних матеріалах для глибини їх розташування під поверхнею ОК до $h_e^{max} \sim 5$ мм за частоти електромагнітного поля ~ 500 Гц.

Максимально чутливим датчиком магнітного поля, що здатний проводити контроль у широкому діапазоні глибин в матеріалі виробу є надпровідний квантовий інтерферометр, на основі якого реалізуються найбільш складні завдання у галузі ВСК [41, 42]. Основа роботи SQUID-датчика (SQUID, superconducting quantum interference device – надпровідний квантовий інтерферометр) ґрунтується на феномені суперпровідності, коли матеріал може проводити електричний струм без опору за дуже низьких температур. Датчик складається з двох суперпровідників розділені тонким шаром непровідного матеріалу (бар'єром Джозефсона). В цьому датчику виникає квантове "тунелювання" пар електронів (куперівські пара) через цей бар'єр. Такий процес створює малий струм, який називається струмом Джозефсона. Вплив зовнішнього магнітного поля на SQUID-датчик призводить до зміни фази куперівських пар в кожному з двох суперпровідників. Ця зміна фази взаємодіє зі струмом Джозефсона, тому датчик може вимірювати дуже слабкі магнітні поля, реєструючи незначні зміни цього струму. Така чутливість до магнітних полів дозволяє SQUID-датчику виявляти невеликі аномалії або дефекти в матеріалі, які можуть бути непомітними при використанні інших методів контролю. Недоліками зазначеного підходу є значна вартість апаратури відповідного класу, збільшення загальної ваги та габаритних параметрів пристрою, а також необхідність застосування окремого комплексу охолодження, що може бути виправдано тільки у разі реалізації унікальних вимірювань та технологічних процесів.

Поява технології ВСК із перетворювачами матричного типу значно розширила функціональність засобів ВСК. Ця технологія надала можливість

побудувати високоефективні системи ВСК на основі котушок індуктивності, датчиків Холла та GMR-датчиків [43-46].

Сучасні пристрої ВСК на основі матричних перетворювачів ефективно застосовуються у задачах виявлення тріщин, пористості, включень неструмопровідних сполук, усадки матеріалу при аналізі суцільних та порожнистих структур [16, 17]. Відповідними методами виявляється наявність тріщин, що виникають внаслідок корозії, якщо об'єкт знаходиться під тиском. Визначення на основі методів ВСК таких технологічних параметрів як електропровідність та магнітна проникність дає змогу оцінити твердість, однорідність матеріалу, якість термічної обробки, наявність внутрішніх напружень, розвуглецювання, дифузію окремих складових, склад сплаву, наявність сторонніх домішок, тощо. Ще одна область застосування ВСК – визначення товщини неструмопровідних покриттів металевих об'єктів – ізоляційних шарів кабелів, неелектропровідних фарб як захисних покриттів конструкційних елементів, анодного покриття на поверхнях на основі алюмінієвого сплаву та ін.

За допомогою комплексу датчиків, які охоплюють виріб, відбувається діагностика порожнистих об'єктів, наприклад, організовується високошвидкісна діагностика труб з метою виявлення міжзернистої корозії на внутрішній поверхні труби [16, 17].

Застосування засобів ВСК із перетворювачами матричного типу значно розширює функціонал методів ВСК (рис. 1.8).

Згідно технології ВСК з матричними перетворювачами при проведенні вихрострумової діагностики найчастіше використовується множина сенсорів на основі електромагнітних котушок, що групуються у ряд чи кілька рядів у одному вузлі ВСК – матричному ВСП. На сьогоднішній день похибки, пов'язані з інтерференцією сигналів від окремих датчиків, які призводять до зменшення роздільної здатності ВСК-дефектоскопу, ефективно компенсуються через застосування процедури мультиплексування, що полягає у активації та деактивації певних груп ВСП в матриці відповідно заданому програмному

алгоритму, що виконується автоматично без участі оператора і виключає взаємний вплив окремих активованих котушок одна на одну.

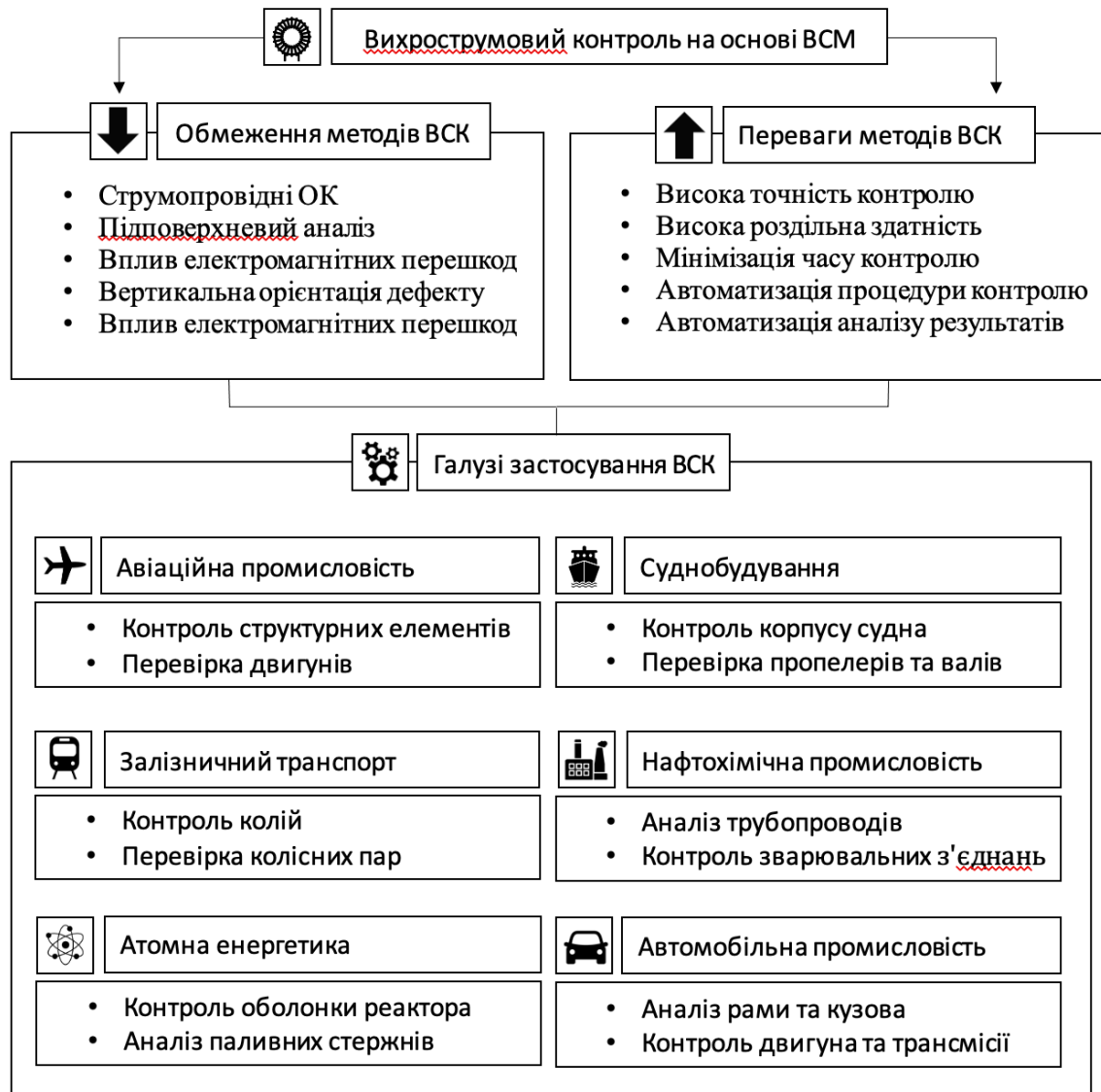


Рис. 1.8. Можливості застосування методів ВСК на основі ВСМ в різних галузях економіки країни

У порівнянні з одноканальними засобами ВСК системи на основі ВСМ характеризуються наступним рядом переваг:

- скорочення часу проведення контролю за рахунок охоплення набором датчиків великої площі ОК;
- збільшення точності контролю за рахунок одночасного проведення серії експериментів, що обробляються статистичними методами при збереженні

роздільної здатності методу ВСК і компенсації взаємного впливу датчиків шляхом застосування процедури мультиплексування;

- ефективний контроль ОК зі складним профілем за рахунок гнучких або спеціалізованих ВСК-зондів, що адаптуються до форми поверхні елементів та конструкцій;
- спрощення аналізу отриманих результатів діагностування за рахунок переведення масиву вхідних даних у цифровий формат.

Таким чином, використання ВСМ розширює функціональні можливості як ВСК в цілому та їх можливості для застосування в АСКТП.

1.5. Використання технології прототипування для створення засобів ВСК на основі матричних перетворювачів

Технологія прототипування є важливою частиною процесу розроблення нового продукту або технології в різних галузях діяльності людини. До початку багатосерійного виробництва прототипування є основним методом, який дає змогу визначити та уточнити основні функції продукту, оцінити його відповідність заданим вимогам, виявити потенційні проблеми та знайти способи їх вирішення [47]. Різноманіття технологічних процесів, режимів їх реалізації та технологічних параметрів, які потребують контролю та регулювання дають підстави зробити висновок про доцільність використання технології прототипування для створення нових і модифікації існуючих САК.

Прототипування – це процес створення функціонуючої фізичної моделі продукту, яка є достатньо детальною, щоб продемонструвати, як працює продукт, але не надто складною, щоб вимагати багато часу та ресурсів для її створення та налаштування. Це дає змогу проводити експерименти та тестування, необхідні для вирішення проблем проєктування і вносити необхідні зміни до кінцевого продукту до етапу його серійного виробництва.

Прототипування є перспективною технологією і для області створення нових засобів автоматизованого ВСК, які включаються у різні технологічні процеси. Розробники можуть швидко та ефективно впроваджувати запропоновані

концепції отримання та оброблення вимірювальних сигналів, архітектурні і технологічні рішення засобів ВСК. Крім того, ця технологія дає змогу проводити повне тестування прототипів нових засобів в умовах, максимально наближених до реальних, щоб визначити їх ефективність і відповідність встановленим вимогам, забезпечити більш повну відповідність запитам споживачів.

Тим не менш, технологія прототипування ще не набула належного поширення у галузі НК в цілому та у ВСК зокрема [48]. Це особливо актуально для прототипування засобів ВСК, для яких такі складові, як властивості матеріалу, параметри електромагнітного поля, а також особливості опрацювання та аналізу отриманих даних, мають вирішальне значення.

Прототипування – це ітеративний процес, який складається із певних етапів: створення прототипу, тестування, аналізу результатів, внесення коректив і повторення процесу до досягнення бажаних результатів. Крім того, прототипування має бути орієнтоване на користувача, тому важливо отримати від користувачів вихрострумових засобів контролю коментарі [49].

Планування, проєктування, створення, тестування, аналіз результатів і коригування є основними етапами прототипування [50]. Кожен із цих етапів має свої особливості, які вимагають ретельного вивчення. Це означає, що прототипування є частиною загального процесу розроблення нового продукту, а не окремим процесом. Тому воно повинно відповідати загальним цілям і завданням процесу створення нового засобу ВСК.

Прототипування є важливою частиною процесу розроблення нових засобів як для автоматизованого ВСК в цілому, так і у випадку створення САК на основі ВСК зокрема. Це не тільки дає можливість розробити новий продукт, але й провести його повне тестування ще до початку виробництва, що дає змогу виявити та вирішити потенційні проблеми і створити кінцевий продукт високої якості.

Процес планування прототипу починається з визначення основних вимог які висуваються до засобів автоматизованого ВСК. Основними вимогами, які необхідно визначити на цьому етапі, є: частотний діапазон сигналів, швидкість

вимірювань, вірогідність виявлення дефектів, похибка вимірювання параметрів і характеристик матеріалів і виробів, універсальність (можливість працювати з різними типами матеріалів та перетворювачів) та інші.

Після визначення основних вимог до засобу розробляється його конструктивна схема. Вона повинна включати як апаратну, так і програмну частини. В свою чергу апаратна частина включає вибір електронної елементної бази, перетворювачів, джерел живлення, корпусу і іншого обладнання. До питань програмної частини належить вибір мови програмування, розроблення алгоритмів опрацювання інформаційних сигналів, створення інтерфейсу користувача і т.і.

На сьогодні існує широкий вибір апаратно програмних платформ для створення нових засобів вимірювання і контролю. Програмно-апаратна платформа для прототипування автоматизованих систем ВСК має задовольняти наступним вимогам [50]:

- прототип системи повинен забезпечити високу вірогідність і надійність дистанційного контролю геометричних розмірів виробу та характеристик його матеріалу;
- прототип повинен мати можливість адаптації до різних матеріалів, середовищ та геометрії виробу;
- інтерфейс користувача має бути зручним і інтуїтивно зрозумілим, надавати можливість проводити керування процесом збору та аналізу даних, оперативно переналаштовувати режими керування, а також переглядати і аналізувати результати;
- прототип системи має враховувати існуючі обмеження на розмір апаратури, швидкість опрацювання даних, енергоспоживання та відповідати стандартам безпеки;
- прототип повинен бути сумісним із різними датчиками, вимірювальними пристроями та платформами;
- прототип має бути сумісний з існуючими системами виробництва та контролю якості, що дасть змогу швидко інтегрувати його в технологічний процес без значних змін в інфраструктурі виробництва;

- прототип системи повинен мати високу швидкість роботи та забезпечувати мінімальні затримки між зміною технологічних параметрів та їх відображенням на інтерфейсі;
- прототип системи чи пристрою має бути виконаний за модульним принципом, що спрощує налаштування та оновлення їх окремих компонентів;
- система повинна мати здатність до масштабування, щоб задовольняти потреби різних виробництв, завдань контролю та керування технологічними процесами.

По завершенні процесу проектування прототипу засобу автоматизованого ВСК, розробники переходять до етапу його створення та тестування. На цьому етапі важливо не тільки виготовити функціональний прототип, але і перевірити його на відповідність встановленим на попередньому етапі вимогам.

Процес створення прототипу включає виготовлення апаратної частини за допомогою спеціалізованого обладнання, програмування мікроконтролерів, інтеграцію програмного забезпечення. Специфічні технології та методики залежать від конкретних вимог до пристрою та можуть включати широкий діапазон інструментів та технологій від традиційного виготовлення плат до використання 3D-друку для створення корпусу приладу.

Після того, як прототип буде створено, він повинен бути протестований. Такі випробування дають змогу перевірити не тільки відповідність прототипу технічним характеристикам, але і зручність його використання, надійність, довговічність та інші фактори, які впливають на ефективність використання засобу автоматизованого ВСК. Також може бути проведене тестування на відповідність стандартам та нормам безпеки. На цьому етапі до випробувань можуть залучатись замовники та майбутні користувачі продукції з метою як найточніше задовольнити їх вимоги.

Оцінка результатів тестування дає можливість перевірити ефективність нового обладнання, а також визначити, чи відповідає воно заданим вимогам. Якщо прототип не відповідає всім вимогам або має значні недоліки, необхідно внести відповідні зміни в проєкті та повторити процес створення прототипу.

Після експериментального тестування прототипу автоматизованого засобу ВСК, інженери аналізують отримані результати, щоб з'ясувати, чи відповідає прототип заданим вимогам, та визначити, які зміни необхідно внести для покращення його роботи.

Аналіз результатів є важливим кроком у процесі розроблення нового засобу ВСК, оскільки він дає змогу визначити, які функції прототипу реалізуються ефективно, а які потребують удосконалення. На основі такого аналізу розробники вносять корективи в дизайн або функціональність прототипу включаючи зміни як в апаратній частині пристрою, такі і в програмному забезпеченні.

Після внесення змін, прототип повторно тестується для перевірки ефективності внесених коректив. Цей цикл "аналіз – корегування – тестування" продовжується до тих пір, поки не буде досягнуто бажаного рівня ефективності та відповідності прототипу заданим вимогам. Основною метою цього етапу є впевненість в тому, що новий пристрій не тільки відповідає всім технічним вимогам, але й максимально відповідає потребам користувачів. Завдяки детальному аналізу результатів тестування та своєчасному внесенню коректив, забезпечується висока ефективність та надійність нового засобу ВСК.

Технологія прототипування є потужним інструментом розроблення і вдосконалення автоматизованих засобів ВСК. Вона дає змогу швидко перетворити теоретичні ідеї в функціональні пристрої, які можуть бути протестовані в реальних умовах. Основні характеристики платформ які можуть бути використані для створення засобів вимірювань і контролю та використані в САК наведено у табл. 1.1.

Серед розробників прототипів користуються великою популярністю такі платформи, як Arduino, Raspberry Pi, Analog Devices ADALM-PLUTO, Texas Instruments Delfino F28377S LaunchPad, LabJack T7-Pro, Microchip PIC32MZ EF Development Board, ESP8266 та Red Pitaya.

Arduino відзначається своєю простотою використання та наявністю численних додаткових модулів, однак вона менш потужна порівняно з Raspberry

Pi, ESP8266 чи Red Pitaya. Red Pitaya, у свою чергу, відкриває додаткові можливості для виконання специфічних завдань у ВСК.

Табл.1.1. Основні технічні характеристики ряду платформ для реалізації засобів вихрострумового вимірювання та контролю

Платформа	Обчислювальна потужність	АЦП	ЦАП	Комунікаційні інтерфейси	Память
Red Pitaya 125-14	Xilinx Zynq-7010 (ARM Cortex-A9)	2x 14-bit, 125 MSPS, $\pm 1V$	2x 14-bit, до 125 MSPS, $\pm 1V$	Ethernet, USB, HDMI, GPIO	512MB DDR3 256MB
LabJack T7-Pro	1 GHz ARM Cortex-A9	24-bit, 50 kSPS, $\pm 10V$	14-bit, до 128 kSPS, $\pm 10V$	Ethernet, USB, Modbus TCP, SPI, I2C, GPIO	16MB RAM 4MB
Analog Devices ADALM-PLUTO	ARM Cortex-A9 (Zynq-7010)	12-bit, 61.44 MSPS, $\pm 1V$	12-bit, 61.44 MSPS, $\pm 1V$	USB, Ethernet, GPIO	512MB RAM 4GB
Texas Instruments Delfino F28377S LaunchPad	TMS320F28377S (ARM Cortex-M3)	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	USB, JTAG, SCI, SPI, I2C, GPIO	1MB RAM 2MB
Microchip PIC32MZ EF Development Board	PIC32MZ2048EF (MIPS M14K)	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	USB, Ethernet, CAN, SPI, I2C, GPIO	512KB RAM 2MB
Raspberry Pi 4 Model B 8GB + ADC-DAC Pi Zero	Broadcom BCM2711 (ARM Cortex-A72)	12-bit, 100 kSPS, $\pm 2.048V$	12-bit, 100 kSPS, 0-2.048V	USB, Ethernet, HDMI, GPIO	8GB LPDDR4-3200 MicroSD Card

Red Pitaya відзначається не лише своєю гнучкістю на базі FPGA, але й вбудованими швидкісними АЦП та ЦАП з високою роздільною здатністю, що забезпечують широкий динамічний діапазон. Ці характеристики роблять її

ідеальним інструментом для прототипування автоматизованих систем ВСК, для яких швидкодія є критично важливою.

Прототипування має значний потенціал для використання в галузі НК, зокрема у ВСК. Нові дослідження і розробки можуть включати в себе використання розширених наборів матеріалів і технологій в процесі створення прототипів, розробку більш ефективних методів тестування прототипів та удосконалення процесів аналізу результатів контролю.

Прототипування, як потужна технологія створення нових продуктів, може бути використане для стимулювання інновацій в області ВСК. Це може бути здійснено через використання прототипів для демонстрації нових ідей та концепцій, а також для стимулювання інтересу індустрії до нових технологічних рішень.

1.6. Постановка завдання створення та дослідження САК процесу ХФ на основі матричної технології ВСК

Аналіз сучасних джерел з питань ВСК підтверджує, що основна увага дослідників приділяється використанню одноелементних ВСП та простим засобам реалізації ВСК. Проте, такий підхід не враховує інформаційних можливостей ВСМ, що веде до обмеження точності та ефективності засобів керування та контролю. Тому виникає необхідність у пошуку нових методів і технологій, які дають змогу більш повно використовувати інформаційний потенціал ВСМ.

Основною метою роботи є створення САК, в якій якість процесу ХФ забезпечується як підтримкою технологічно обґрунтованої швидкості перебігу процесу травлення шляхом автоматичного керування температурою травника, так і вчасною зупинкою травлення, що реалізується постійним вимірюванням товщини виробу в процесі його ХФ.

Для досягнення цієї мети необхідно розробити моделі інформаційних сигналів, обґрунтувати методи опрацювання їх інформативних параметрів, розробити програмне забезпечення для аналізу вихідних сигналів ВСМ,

розробити конструкцію прототипу матричного ВСП і провести його дослідження, створити прототип дослідного зразку автоматизованої системи ВСК і розробити методику опрацювання інформаційних сигналів ВСМ, які використовуються в САК для формування керувальних впливів, а також провести модельні дослідження окремих компонентів САК процесу ХФ.

Опрацювання сигналів ВСМ відіграє ключову роль у створенні САК процесу ХФ на основі матричної технології ВСК. При цьому важливо, щоб використовувані методи та засоби відповідали певним вимогам, що забезпечують надійність та ефективність контролю:

1. Висока швидкодія. Методи обробки повинні забезпечувати швидку реакцію на вхідні сигнали, дозволяючи оперативно опрацьовувати дані.
2. Засоби автоматизованого опрацювання інформаційних сигналів повинні бути інтегровані в структуру АСКТП ХФ для збільшення ефективності і зменшення впливу людського фактору на якість процесу ХФ.
3. Алгоритми опрацювання сигналів повинні мати можливість змінюватись в залежності від завдань керування чи властивостей виробу.
4. Процес керування повинен мати можливість налаштування під однотипні задачі.
5. Інтерфейс користувача повинен бути інтуїтивно зрозумілим та надавати зручні інструменти керування та відображення поточного стану ТОК.

Виконаний аналіз дав змогу сформулювати науково-технічну задачу та основні напрями теоретичних і практичних завдань дослідження, які відображено на діаграмі рис. 1.9.

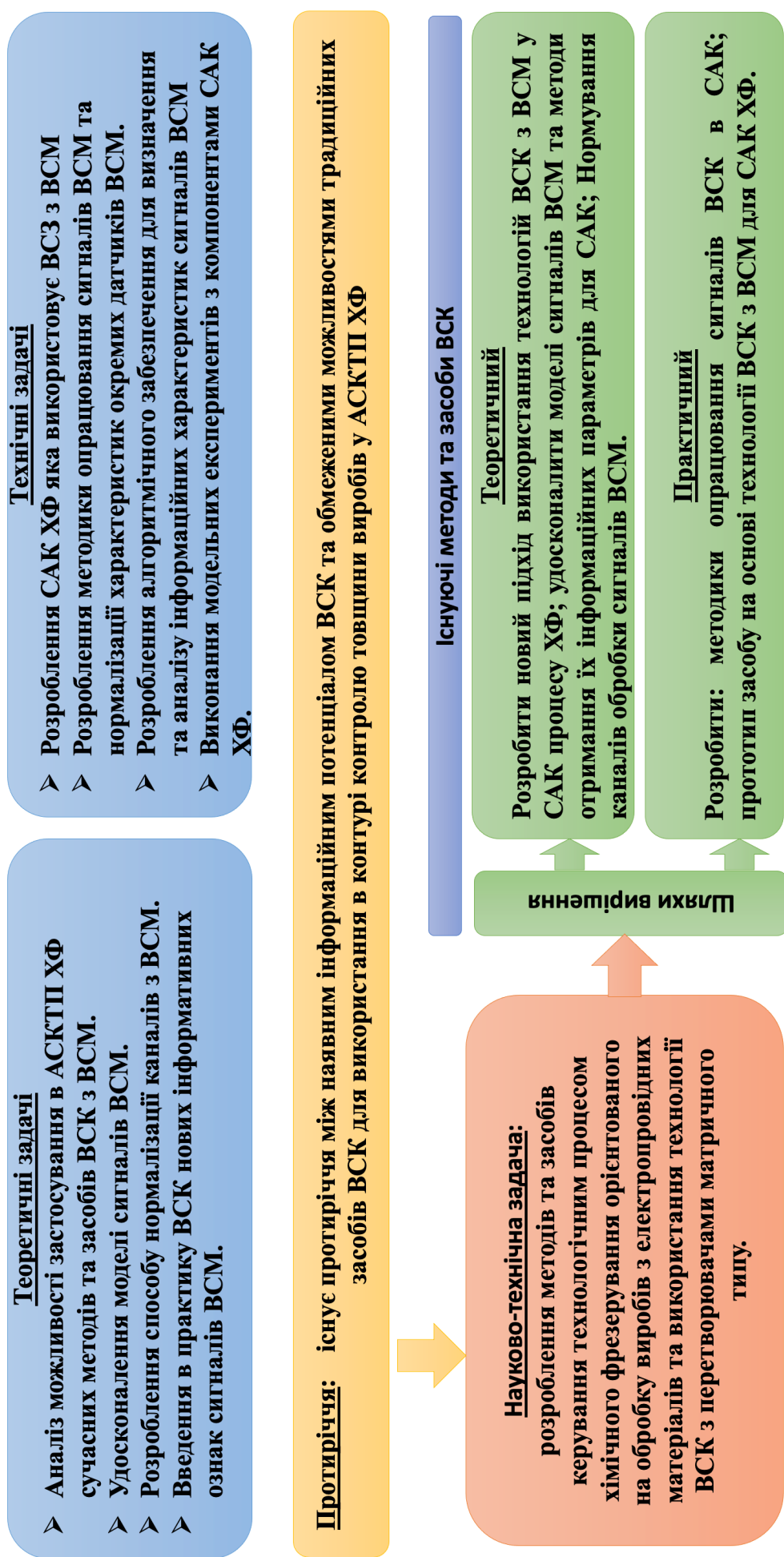


Рис. 1.9. Діаграма обґрунтування та структуризації основних елементів наукового дослідження в контексті використання технології матричного ВСК для створення САК

Результати, отримані в ході цієї дисертації, відповідають спеціальності 151–автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, і містять:

- технічні рішення створення АСКТП ХФ з використанням матричної технології ВСК для вимірювання товщини виробу в процесі травлення;
- методики аналізу сигналів ВСМ і їх інформативних параметрів та використання останніх для формування сигналів керування;
- розроблення нових для ВСК вторинних ознак інформаційних сигналів, використання яких сприятиме покращенню керування ТП;
- результати модельних експериментів окремих складових САК процесу ХФ;
- створення прототипу автоматизованої підсистеми ВСК на основі матричної технології ВСК, яка дає змогу підтвердити ефективність запропонованих технічних рішень.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційного дослідження проаналізовано особливості процесу ХФ, важливі для розроблення систем керування цим технологічним процесом проблемні питання, пов'язані з використання технології матричного ВСК. Виконано аналітичний огляд сучасних тенденцій розвитку методів ВСК для їх більш повного врахування при розробленні САК процесу ХФ на основі технології ВСК. В результаті аналізу було зроблено наступні висновки.

1. Вихрострумний контроль є одним із ключових видів неруйнівного контролю, який широко використовується у промисловості. Він дає змогу контролювати різноманітні параметри матеріалів і виробів і формувати сигнали керування ТП.

2. Сучасні методи ВСК активно розвиваються у напрямі автоматизації процесу контролю. Автоматизація ВСК дає змогу підвищити ефективність та інформативність контролю, проте можливості ВСК ще не в повній мірі використані для створення ефективних АСКТП.

3. За допомогою сучасних вихрострумних матриць існує можливість підвищити ефективність та скоротити час формування сигналів керування в АСКТП ХФ габаритних ОК.

4. Прототипування в задачах створення нових автоматизованих засобів ВСК, в тому числі і для використання у складі АСКТП ХФ, дає змогу оперативно оцінювати ефективність їх апаратних та програмних складових, адаптувати сучасні інформаційно-вимірювальні технології під конкретні завдання керування ТП.

5. Зроблено обґрунтований висновок про те, що в цілому подальший розвиток технології ВСК буде відбуватись в напрямках застосування вискоєфективних алгоритмів оброблення інформаційних сигналів, розроблення нових вихрострумних датчиків та інтеграції цих систем в автоматизовані виробничі процеси.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: [підручник для студ. вищ. навч. закл.] / В. В. Попович, В. В. Попович. – Львів: Світ, 2006. – 624 с. — ISBN 966-603-452-2.
2. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / [навч. посібник для учнів проф. навч. зал.] / Хільчевський В. В., Кондратюк С. Є., Степаненко В. О., Лопатько К. Г. К.: Либідь, 2002. – 328 с. — ISBN 966-06-0247-2
3. Бучинський М.Я., Горик О.В., Чернявський А.М., Яхін С.В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О.В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. – Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7.
4. Черненко В. С., Кіндрачук М. В., Дудка О. І. Променеві методи обробки: Навч. посібник. — К.: Кондор, 2004. — 166 с.
5. Антосяк В. Г., Могорян Н. В. Электрофизические методы обработки материалов / Под ред. Н. К. Фатеева; Кишиневский политехнический институт им. Лазо — Кишинев: Штиинца, 1987—145 с.
6. Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, Flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). Second edition. Edited by R.C. McMaster and P. VcIntire. – USA: American Society for NDT, 1986. – 677 p.
7. Louis C. Westphal. Handbook of Control Systems Engineering. – 2nd edition; The Springer International Series in Engineering and Computer Science. – Springer, 2001. – Т. 635. – 1063 с. – ISBN 978-0792374947.
8. Жученко А. І. Теорія автоматичного керування. Терміни, поняття, визначення: Довідник для студ. напряму «Автоматизація та компютерно-інтегровані технології» / А. І. Жученко, Т. В. Аверіна. – К. : НТУУ«КПІ», 2006. – 52 с.
9. Іванов А.О. Теорія автоматичного керування: Підручник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. – 2003. – 250 с.
10. Ключников, Ю. В. Авіаційні матеріали та їх технології. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів першого

(бакалаврського) рівня освіти за освітньою програмою «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка / Ю. В. Ключников, О. Т. Сердітов, В. Л. Дубнюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,23 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 115 с.

11. “Chemical Milling”, у *Machining*. ASM Int., 1989, с. 579–586. Дата звернення: 24 січ. 2024. [Онлайн].
Доступно: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002170>

12. Лукінюк М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 кн. Кн. 1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів [Текст]: навч. посіб. / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с.

13. Дорофеев А.Л. Индукционная толщинометрия / Дорофеев А.А., Никитин А.И., Рубин А.Л. – М., Энергия, 1978. – 184 с.

14. Bray, D. E., & Stanley, R. K. (2018). *Nondestructive evaluation: A tool in design, manufacturing and service*. CRC Press.

15. Shull, P. J. (2002). *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. Marcel Dekker.

16. Brauer, H. (2018). *Motion-induced Eddy current techniques for non-destructive testing and evaluation*. Institution of Engineering and Technology.

17. Bowler, N. (2019). *Eddy-Current nondestructive evaluation*. Springer New York.

18. Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання: [монографія] / В.М. Учанін; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.

19. Долиненко В.В. Роботизована система неруйнівного вихрострумового контролю виробів зі складною геометрією / В.В. Долиненко, Ю.В. Куц, Є.В. Шаповалов та інші // Автоматическая сварка. – 2017. – № 5-6 (764). – С. 60-67.

20. "Eddy Current Flaw Detector for Automated Inspections", [Online].
Доступно: <https://ethernde.com/products/automated-inspection/victor-22d>.
21. "SMARTSCAN Aircraft Wheel Inspection System", [Online].
Доступно: <https://www.ndt.com.ua/en/products/et/flaw-detectors/smartscan-aircraft-wheel-inspection-system/>.
22. "EDC RAIL 5065 Rail Testing Eddy-Current Machine," NDT. [Online].
Доступно: <https://www.ndt.com.ua/en/products/et/flaw-detectors/edc-rail-5065-rail-testing-eddy-current-machine>.
23. "Automated Eddy Current Testing Systems," TecScan, [Online].
Доступно: <https://tecscan.ca/products/eddy-current-testing/>.
24. TecScan Systems, "Automated Eddy Current Testing - 3D Scanning Solution for Aero-engine Components," e-Journal of Nondestructive Testing, vol. 23, no. 12, 2018. [Online].
Доступно: <https://www.ndt.net/?id=23561>.
25. "Automated Eddy Current Testing Solution for Aero-Engine Discs" Quality Magazine, [Online].
Доступно: <https://www.qualitymag.com/articles/95560-automated-eddy-current-testing-solution-for-aero-engine-discs>.
26. "Automated Surface Inspection Using Eddy Current Array Technology," Olympus IMS, [Online].
Доступно: <https://www.olympus-ims.com/en/applications/automated-surface-inspection-using-eddy-current-array-technology/>.
27. B. Ribes, J. M. Rego, J. Hernández, L. Gonzalo, J. Guerra, Tecnatom SA. ET Array Probe Applications with TEDDY+ System, (2007). 6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, October 2007, Budapest, Hungary.
www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=70.
28. Richard K. GRANVILLE, Peter C. CHARLTON. Detection and Sizing of Baffle Plate Erosion and Fretting using Eddy Current Array Technology, NDT.net Issue: 2016-09, e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT Articles & News) | Vol. 21(9). [Online].
Доступно: <http://www.ndt.net/?id=20232>.

29. C.Schmidt, C.Schultz, P.Weber та B.Denkena, “Evaluation of eddy current testing for quality assurance and process monitoring of automated fiber placement”, *Composites Part B: Eng.*, т. 56, с. 109–116, січ. 2014. Дата звернення: 21 груд. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.061>.

30. Учанин В.Н. (2010) Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 24–29.

31. Учанин В.М. (2018) Пропозиції щодо вдосконалення класифікації вихрострумових перетворювачів. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*, 2018 (2), 69-73.

32. Analysis of normative documentation on the use of array eddy current probes / Lysenko I., Mirchev Y., Kuts Y., Levchenko O. // XXII Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи”, 16 – 17 травня 2023 р., Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – С. 267-269.

33. Behun, L., Smetana, M., & Capova, K. (2018). Comparison of detection abilities between Fluxgate and GMR magnetometer in inverse ECT of deep lying cracks. *2018 ELEKTRO*. <https://doi.org/10.1109/elektro.2018.8398332>.

34. Goktas, T., Lee, K. W., Zafarani, M., & Akin, B. (2016). Analysis of magnet defect faults in permanent magnet synchronous motors through Fluxgate sensors. *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. <https://doi.org/10.1109/apec.2016.7468272>.

35. Garcia-Martin, J., & Gomez-Gil, J. (2013). Comparative evaluation of Coil and hall probes in Hole Detection and thickness measurement on aluminum plates using eddy current testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 49 (8), 482–491. <https://doi.org/10.1134/s1061830913080044>.

36. Sandhu, A., Masuda, H., Oral, A., Bending, S. J., Yamada, A., & Konagai, M. (2002). Room temperature scanning hall probe microscopy using GaAs/AlGaAs and

BI micro-hall probes. *Ultramicroscopy*, 91 (1-4), 97–101. [https://doi.org/10.1016/s0304-3991\(02\)00087-6](https://doi.org/10.1016/s0304-3991(02)00087-6).

37. Ramos, H. G., & Ribeiro, A. L. (2014). Present and future impact of magnetic sensors in NDE. *Procedia Engineering*, 86, 406–419. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.054>.

38. Chao, W., Ya, Z., & Peng, G. (2013). GMR based Eddy Current System for defect detection. *2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. <https://doi.org/10.1109/icemi.2013.6743214>.

39. Daughton, J. M. (2000). GMR and SDT sensor applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36 (5), 2773–2778. <https://doi.org/10.1109/20.908586>

40. Wincheski, B., Yu, F., Simpon, J., Williams, P., & Rackow, K. (2010). Development of SDT sensor based eddy current probe for detection of deep fatigue cracks in multi-layer structure. *NDT & E International*, 43 (8), 718-725. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.08.005>.

41. Krause, H.-J., & Kreutzbruck, M. (2002). Recent developments in Squid NDE. *Physica C: Superconductivity*, 368(1-4), 70–79. [https://doi.org/10.1016/s0921-4534\(01\)01142-x](https://doi.org/10.1016/s0921-4534(01)01142-x).

42. Keenan, S. T., & Romans, E. J. (2012). Compensated high temperature squid gradiometer for mobile NDE in magnetically noisy environments. *NDT & E International*, 47, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.11.012>.

43. Mook, G., Michel, F., & Simonin, J. (2011). Electromagnetic imaging using probe arrays. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 2011(03), 227–236. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.173>.

44. Postolache, O., Ribeiro, A. L., & Ramos, H. G. (2013). GMR Array Uniform Eddy current probe for defect detection in conductive specimens. *Measurement*, 46(10), 4369–4378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.050>.

45. Jun, J., Hwang, J., & Lee, J. (2007). Quantitative nondestructive evaluation of the crack on the austenite stainless steel using the induced eddy current and the Hall Sensor Array. *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*. <https://doi.org/10.1109/imtc.2007.379095>.

46. Yamada, H., Hasegawa, T., Ishihara, Y., Kiwa, T., & Tsukada, K. (2008). Difference in the detection limits of flaws in the depths of multi-layered and continuous aluminum plates using low-frequency eddy current testing. *NDT & E International*, 41 (2), 108–111. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.08.004>.
47. Дьоміна А. О. Особливості прототипування об'єктно-орієнтованих програмних систем / А. О. Дьоміна // Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки. - 2012. - Т. 138. - С. 68-75. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/NaUKMAkn_2012_138_15.
48. Левченко О.Е. Використання платформи Red Pitaya в технології прототипування автоматизованих систем вихрострумowego контролю // Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ, Вип. 66(2), (2023), с. 43-51.
49. A. M. (. M. Beyer, "User feedback on prototypes and its impact on the success of future products", thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010. Дата звернення: 2 серп. 2023. [Онлайн]. Режим доступу: <http://hdl.handle.net/1721.1/59893>
50. B. Peterson and B. Vogel, "Prototyping the Internet of Things with Web Technologies: Is It Easy?," 2018 *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, Athens, Greece, 2018, pp. 518-522, doi: 10.1109/PERCOMW.2018.8480268.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАСАД АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ В ЗАСОБАХ ВСК З МАТРИЧНИМИ ВИХРОСТРУМОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ АСКТП ХФ

В структурі АСКТП важливу роль відіграють датчики, які входять до складу ланцюгів зворотного зв'язку і першими сприймають і перетворюють керований параметр [1-3]. В АСКТП ХФ таким параметром є товщина виробу. Цей параметр є складним для безпосереднього вимірювання під час процесу травлення. В розробленій САК процесу ХФ використано датчики, що реалізують метод ВСК. В цілому цей метод дає змогу перетворювати різні параметри та характеристики електропровідних матеріалів та виробів, в тому числі і товщину останніх, у інформативних параметрів сигналів ВСП – амплітуду, фазу та частоту гармонічних сигналів, і не вимагає безпосереднього механічного контакту датчиків з виробами [4, 5] .

В цьому розділі розглянуто використання технології ВСК з матричними перетворювачами як основи для визначення часу травлення в процесі ХФ за досягнення необхідної товщини виробу. Зокрема проаналізовано особливості формування сигналів ВСК, розроблено моделі їх вихідних сигналів, представлено метод аналізу інформаційних параметрів сигналів на основі дискретного перетворення Гільберта, методологію отримання вторинних інформаційних ознак з фази сигналів ВСК та стратегію їх використання в контурі САК процесу ХФ.

Отримані автором і представлені в цьому розділі наукові результати опубліковано в роботах [5, 30, 31].

2.1. Концепція використання технології ВСК в АСКТП ХФ

В обробці металів широко застосовується технологічний процес хімічного фрезерування (хімічного травлення), який полягає у контрольованому видаленні частини металу з поверхні виробу шляхом його розчину в процесі хімічної реакції. В такий спосіб обробляють, до прикладу, вироби з алюмінієвих сплавів, міді та її сплавів. Швидкість перебігу таких процесів травлення коливається в

межах до ~ 1 мкм/с. Її можна корегувати регулюванням концентрації травників (в межах 28-40%), їх температури (найчастіше в межах 20-50 °С), швидкості перемішування розчину тощо. Такий процес обробки металів має унікальні властивості: по-перше, дає змогу обробляти деталі одночасно з двох сторін, по-друге, не потребує механічних зусиль, які могли би призвести до деформації тонкостінних деталей.

На швидкість хімічного травлення, крім часу травлення Δt , чинить вплив ціла низка параметрів, серед яких можна відзначити:

- концентрацію розчину, Q ,
- температуру розчину, t^o ,
- швидкість перемішування розчину (або швидкість струменя при струменевому обробленні виробу, c ,
- нерівномірність швидкості травлення по поверхні виробу, тобто її залежність від координат певної точки на її поверхні x, y і т.і.

З урахуванням дії різних впливаючих параметрів, товщина шару витравленого металу в загальному виді визначається як Δh

$$\Delta h(\Delta t, \bar{\lambda}) = v(\bar{\lambda}) \cdot \Delta t, \quad (2.1)$$

де вектор впливаючих параметрів

$$\bar{\lambda} = (Q, t^o, c, x, y, \bar{\eta}), \quad (2.2)$$

$\bar{\eta}$ – вектор неврахованих параметрів.

На швидкість травлення, крім концентрації травника і його температури, чинять вплив і інші фактори – хімічний склад матеріалу деталі та механічні напруження в деталі тощо. Складні функціональні залежності між швидкістю травлення та цими чинниками не дають змоги реалізувати контроль за цим процесом за розрахованим завчасно часом травлення і вимагають постійного контролю товщини деталі та підтримування заданої швидкості хімічного фрезерування безпосередньо в технологічному процесі.

З урахуванням того, що фазовий зсув φ між сигналом збудження і вимірювальним сигналом котушок екранного ВСП лінійно залежить від товщини ОК [5] в широкому інтервалі значень $H_{\text{лін}}$, а поточне значення товщини ОК в процесі ХФ визначається різницею $h(\Delta t, \bar{\lambda}) = h_{\pi} - \Delta h(\Delta t, \bar{\lambda})$ між початковим значення товщини ОК h_{π} і товщиною знятого шару, маємо

$$\varphi(\Delta t, \bar{\lambda}) = k h(\Delta t, \bar{\lambda}) + \varphi_o, \quad h \in H_{\text{лін}}, \quad (2.3)$$

де φ_o – початкове значення фазового зсуву сигналів, яке визначається при калібруванні системи, k – коефіцієнт пропорційності між фазовим зсувом сигналів і товщиною ОК (має розмірність рад/мм), рівняння вимірювання набуває такого загального виду

$$h(\Delta t, \bar{\lambda}) = k^{-1} (\varphi(\Delta t, \bar{\lambda}) - \varphi_o), \quad h \in H_{\text{лін}}, \quad (2.4)$$

Значення $H_{\text{лін}}$ для випадку ХФ виробів з немагнітних матеріалів обираються з умови виконання нерівності [5]

$$H_{\text{лін}} \sqrt{2\pi f \mu_o \gamma} > 2, \quad (2.5)$$

де f – частота вихрових струмів в ОК, γ – питома електропровідність матеріалу ОК, μ_o – магнітна стала.

Процес травлення зупиняється в момент досягнення рівності

$$h(\Delta t, \bar{\lambda}) = h_{\text{ном}}, \quad h \in H_{\text{лін}}, \quad (2.6)$$

де $h_{\text{ном}}$ – номінальне значення товщини ОК.

Вирази (2.1) – (2.6) дають формалізований опис процедури контролю товщини ОК в процесі ХФ. Хоча згідно виразу (2.6) поточне значення товщини ОК залежить від аргументів $\Delta t, \bar{\lambda}$, процес керування не передбачає необхідності їх контролю.

Традиційно в системах ВСК використовують одноелементні ВСП, які збуджують вихрові струми в електропровідних матеріалах і виробих гармонічними сигналами певної частоти [4] з наступним аналізом інформативних

параметрів сигналу ВСП – амплітуди і фази. Використання в АСКТП ХФ вихрострумових матриць (ВСМ, в англomовній літературі ECA – Eddy Current Array) має певні переваги завдяки здатності забезпечувати високу швидкість, надійність, інформативність та повторюваність результатів контролю. Крім того ВСМ дають змогу отримати інформацію про товщину виробу в сукупності точок на його поверхні і за рахунок цього збільшити обсяг інформації для більш коректного здійснення процесу керування.

Враховуючи вищенаведене запропоновано двоконтурну САК процесу ХФ, яка дає змогу, по-перше, підтримувати на заданому рівні температуру розчину травника і за рахунок цього забезпечувати певну швидкість травлення, по-друге, зупиняти процес травлення по досягненню виробом потрібної товщини. Структура такої системи зображена на рис. 2.1. На цій схемі позначено: ТОК – технологічний об'єкт керування, КП1, КП2 – керувальні пристрої, ЗЕ1, ЗЕ2 – задаючі елементи, Р1, Р2 – регулятори, Д1 – датчик температури, Д2 – датчик товщини.

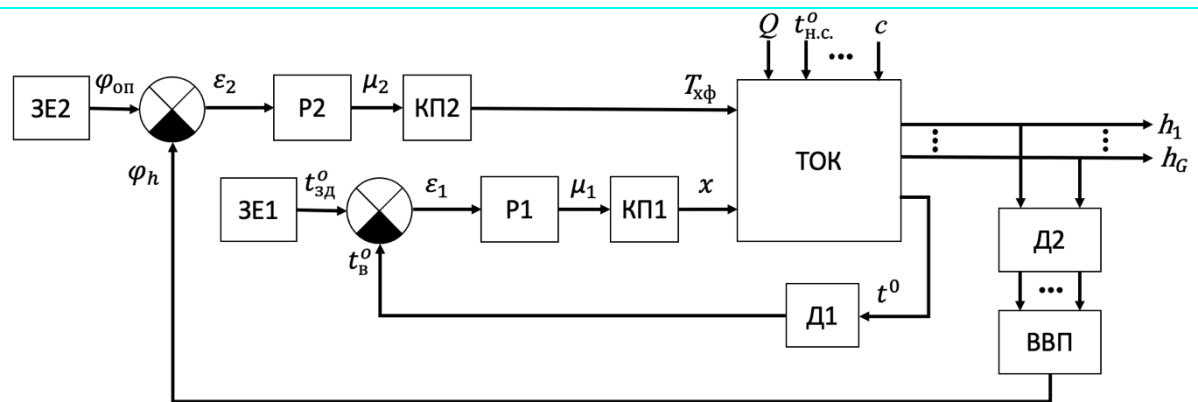


Рис. 2.1. Структура двоконтурної САК процесу ХФ

Перший контур САК процесу ХФ містить: датчик температури Д1, який вимірює поточне значення температури травника; задаючий елемент ЗЕ1, який зберігає номінальне значення температури травника; елемент порівняння поточної і заданої температури травника, який формує сигнал ε_1 ; регулятор Р1, який забезпечує формування керувального впливу μ_1 на КП1; керувальний пристрій КП1, до складу якого входить нагрівач що забезпечує нагрівання травника. Цей контур шляхом зміни температури травника дає змогу

підтримувати швидкості травлення в певних межах.

Другий контур САК процесу ХФ містить: Д2 – датчик що конструктивно об'єднує дві ВСМ (кожна ВСМ містить G вихрострумівих перетворювачів, одна з матриць містить котушки збудження, друга – вимірювальні котушки); вторинний вимірювальний перетворювач ВВП, який забезпечує перетворення товщини виробу, що фрезерується, в усереднений фазовий зсув сигналів φ ; задаючий елемент ЗЕ2, який зберігає опорне значення фазового зсуву сигналів $\varphi_{оп}$, що відповідає номінальному значенню товщини виробу; регулятор Р2, який забезпечує формування керувального впливу μ_2 на КП2; керувальний пристрій КП2, який за сигналом μ_2 зупиняє процес ХФ, тобто фактично формує інтервал часу $T_{хф}$ необхідний для досягнення заданої товщини виробу (початок/зупинка процесу ХФ відбувається шляхом занурення/витягання виробу з розчину травника).

Оскільки процес ХФ достатньо інерційний, до системи керування не висуваються спеціальні вимоги щодо швидкодії.

Особливістю САК є використання матричних вихрострумівих перетворювачів ВСМ1 та ВСМ2, елементи яких попарно утворюють ВСП екранного типу. Більш детально ця частина системи представлена на рис. 2.2.

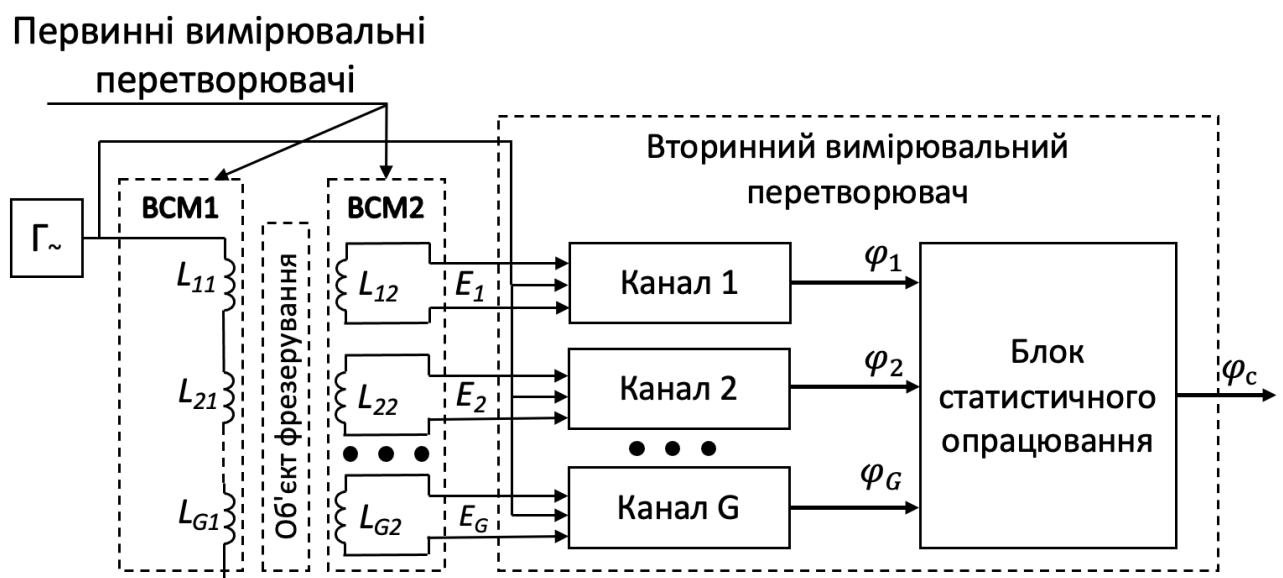


Рис. 2.2. Структура підсистеми формування вихідного сигналу ВВП

Кожна пара елементів L_{g1} та L_{g2} утворює вихрострумний перетворювач екранного типу, які розміщені на відстані, що унеможлиблює взаємний вплив цих пар одна на одну. Котушки збудження L_{g1} включені послідовно і підключені до генератора змінного струму $\Gamma_{\sim}$. Вимірювальні котушки L_{g2} генерують електрорушійні сили E_g , які поступають у відповідні вимірювальні канали ВВП, в яких виконується їх підсилення і прецензійне визначення фазових зсувів $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_G$ відносно вихідного сигналу блока $\Gamma_{\sim}$. Ці фазові зсуви надходять у блок статистичного опрацювання сигналів ВСМ, який здійснює їх усереднення і формування усередненого фазового зсуву φ_h ОК згідно виразу (2.4).

Кожна пара елементів L_{g1} та L_{g2} утворює g -тий вихрострумний перетворювач екранного типу. Всі G екранних ВСП розміщені один від одного на відстані, що унеможлиблює взаємний вплив цих пар одна на одну. Котушки збудження L_{g1} включені послідовно і підключені до генератора змінного струму $\Gamma_{\sim}$. Вимірювальні котушки L_{g2} генерують електрорушійні сили E_g , які поступають у відповідні вимірювальні канали, в яких виконується їх підсилення і прецензійне визначення фазових зсувів $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_G$ відносно вихідного сигналу блока $\Gamma_{\sim}$. Ці фазові зсуви надходять у блок статистичного опрацювання сигналів ВСМ, який здійснює їх усереднення і формування усередненого фазового зсуву φ_h .

Реалізація концепції використання ВСК в САК процесу ХФ потребує аналізу особливостей формування сигналів ВСМ, розроблення їх моделі та методів аналізу інформаційних параметрів. Опрацювання цього питання дасть змогу скорегувати вимоги до апаратної частини засобів ВСК та обґрунтувати вибір методів та алгоритмів оброблення інформаційних сигналів ВСМ.

2.2. Формування інформаційних сигналів ВСП в ланцюгах зворотного зв'язку САК процесу ХФ

В основу обґрунтування методів та алгоритмів опрацювання інформаційних сигналів ВСМ покладено загальні принципи формування сигналів в системі «ВСМ– ОК» та їх моделі.

В процесі взаємодії змінного електромагнітного поля збудження та електропровідного ОК в останньому утворюються вихрові струми. Їх щільність змінюється під впливом різнорідних факторів – форми сигналу збудження, його частоти, характеристик матеріалу ОК та його геометричної форми, проміжку між котушкою збудження ВСМ і ОК, розмірів і розташування дефектів в ОК, тощо. Вихрові струми створюють електромагнітне поле вихрових струмів, що діє на сенсорний елемент ВСМ. Таким чином, відбувається перенесення інформації про властивості ОК та його матеріалу на параметри та характеристики сигналів ВСМ, внаслідок чого вони (функціонально чи кореляційно) стають залежними від параметрів ОК.

Розглянемо більш детально процес формування сигналів окремих вихрострумових перетворювачів у складі ВСМ. Схематично процес формування сигналу вихрострумового перетворювача за відсутності його руху відносно ОК зображено на рис. 2.3 [6].

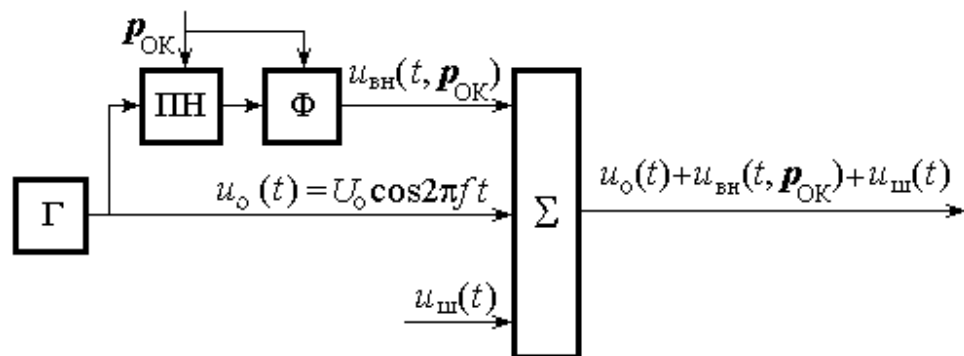


Рис. 2.3. Модель процесу формування сигналу вихрострумового перетворювача у САК процесу ХФ

На рис. 2.3 позначено: Γ – генератор напруги холостого ходу з робочою частотою f та амплітудою U_0 ; ПН – подільник напруги, Ф – фазообертач, С – суматор. Вихідний сигнал складається з трьох компонент: напруги холостого ходу $u_0(t)$; внесеної напруги $u_{BH}(t, p_{OK})$, викликаній наведеними в ОК вихровими струмами; шумової складової $u_{ш}(t)$.

В наведеній на рис. 2.3 моделі формування сигналів вихрострумового перетворювача напруга $u_{BH}(t, p_{OK})$ представлена верхньою гілкою. Коефіцієнт

передачі ПН ($k < 1$) та фазовий зсув у Φ ($-\pi/2 < \varphi < \pi/2$) змінюються під впливом множини параметрів системи ВСП-ОК (електропровідності та магнітної проникності матеріалу ОК, проміжку між перетворювачем і ОК, форми та геометричних розмірів ОК тощо), які відображені в моделі вектором параметрів $\mathbf{p}_{\text{ОК}}$. В процесі ХФ всі параметри системи ВСП-ОК, крім товщини виробу h , лишаються незмінними, тому їх вплив на параметри сигналів ВСМ можна врахувати під час калібрування системи. На цій основі вважаємо, що $\mathbf{p}_{\text{ОК}} = \{h\}$.

Складова $u_o(t)$ залежить від ряду технологічних параметрів вихрострумового перетворювача та його конструктивних особливостей, сили струму збудження і не залежать від характеристик і параметрів ОК. Ця складова не містить інформації про параметри і характеристики ОК, проте має найбільший рівень і найбільше маскує вплив вихрових струмів ОК на амплітуду і фазу вихідного сигналу.

Зазначені вище складові вихідного сигналу перетворювача, у разі його збудження гармонічним сигналом, в загальному виді представляються виразом

$$u(t, \mathbf{p}_{\text{ОК}}) = u_o(t) + u_{\text{вн}}(t, h) = U(h) \cos[2\pi f t - \varphi(h)]. \quad (2.7)$$

У виразі (2.7) амплітуда і фазовий зсув результуючого сигналу подані незалежними від часу, що відображає той факт, що процеси травлення є інерційними, і на інтервалі часу вимірювання (кілька періодів сигналу носія, тобто десятки мілісекунд) ці параметри лишаються практично незмінними.

На практиці така модель може бути використана і в інших за стосунках ВСК, до прикладу, у вихрострумовому вимірюванні електропровідності [7] або у вихрострумовому визначенні геометричних розмірів виробів [8].

В загальному випадку в моделі сигналів ВСМ має бути врахована і шумова складова, яка на рис. 2.3 позначена як $u_{\text{ш}}(t)$. За малих рівнів шуму порівняно зі значенням $U(t)$, цією складовою сигналу ВСМ можна знехтувати.

2.3. Моделі інформаційних сигналів ВСМ

З урахуванням того, що в розроблюваній САК процесу ХФ використовується збудження вихрових струмів у виробі за допомогою змінного електромагнітного поля, складові якого змінюються в часі за законом синуса, а сам виріб виготовлено з електропровідного немагнітного матеріалу, задачу розроблення моделі сигналів ВСМ розглянемо в лінійній постановці.

Поле вихрових струмів у електропровідному виробі збуджується системою “G” перетворювачів екранного типу, які входять до складу ВСМ. Котушки збудження кожного перетворювача в матриці живляться змінним струмом виду

$$i(t) = I_0 \cos(2\pi f t), t \in T_c, \quad (2.9)$$

де I_0 – амплітудне значення струму, t, T_c – поточне значення часу та часовий інтервал спостереження вихрових струмів, $T_c \gg f^{-1}$.

Створене кожною котушкою збудження змінне електромагнітне поле діє на певну ділянку виробу і створює в ній вихрові струми. Їх щільність залежить від електрофізичних параметрів матеріалу виробу на цій ділянці, наявній неоднорідності структури матеріалу, геометричних параметрів виробу, частоти струму збудження тощо. Створене вихровими струмами електромагнітне поле разом з полем збудження діє на вимірювальні котушки вихрострумових перетворювачів, в яких наводяться відповідні електрорушійні сили (е.р.с.).

Поверхня виробу має плоску форму. Елементи матриці розміщені просторово у лінійку і жорстко закріплені зі сталим кроком h , який дає змогу знехтувати впливом кожного одиничного перетворювача у ВСМ на суміжні елементи. Необхідно сформулювати модель вихідного сигналу ВСМ під час визначення товщини виробу в процесі ХФ.

2.3.1. Модель ідеальних сигналів ВСМ

Загальні питання побудови моделей сигналів для використання у неруйнівному контролі, в тому числі і моделей багатовимірних сигналів, розглянуто в роботах [10, 11].

Вважатимемо, що всі перетворювач ВСП є ідентичними, тобто мають однакові амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики і не вносять додаткових спотворень у інформаційний сигнал.

В загальному виді вихідну інформаційну складову напруги g -того перетворювача матриці у режимі контролю товщини виробу можна представити у вигляді суми двох компонент g

$$u_g(t, h_g) = u_0(t) + u_{\text{вн},g}(t, h_g), \quad t \in T_c, \quad g = \overline{1, G}, \quad h_g \in H, \quad (2.10)$$

де h_g – товщина виробу в околі g -того ВСП матричного перетворювача, $u_0(\cdot)$, $u_{\text{вн},g}(\cdot)$ – відповідно складові напруги холостого ходу та внесеної напруги для g -того ВСП. Значення h_g змінюється в області значень H в певних межах від мінімального до максимального значень, які визначаються конкретними умовами задачі ХФ.

Відомо [6,10], що за умови розміщення електропровідного немагнітного середовища у гармонічному електромагнітному полі, створене вихровими струмами ОК електромагнітне поле також буде гармонічним. Отже будуть гармонічними і наведені у вимірювальних котушках е.р.с., і виділені на відповідних навантаженнях електричні напруги. З урахуванням цього вираз (2.10) представляється у такому виді

$$\begin{aligned} u_g(t, h_g) &= U_0 \cos(2\pi f t) + U_{\text{вн},g}(h_g) \cos(2\pi f t - \varphi_{\text{вн},g}(h_g)) = \\ &= U_g(h_g) \cos[2\pi f t - \varphi_g(h_g)], \quad t \in T_c, \quad g = \overline{1, G}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де U_0 – амплітудне значення напруги холостого ходу, $U_{\text{вн},g}$, U_g – амплітудні значення відповідно внесеної та сумарної напруги g -того ВСП, $\varphi_{\text{вн},g}(h_g)$, $\varphi_g(h_g)$ – початкові фази відповідно внесеної та сумарної напруги g -того ВСП.

В інформаційному сигналів типу (2.11) немає можливості розділити його складові. Отже напруга холостого ходу в (2.11) може мати значний маскувальний ефект і зменшувати чутливість ВСП до товщини виробу.

Механізм маскування інформаційних складових сигналу (2.11) пояснює наступний приклад [6]. Розглянемо суму двох гармонічних функцій: першої,

$\sin(2\pi ft)$, що не містить корисної інформації, та другої інформаційної функції – $A_i \sin(2\pi ft + \varphi_i)$, $A_i \ll 1$, амплітуда і початкова фаза якої є носіями певної інформації. З курсу тригонометрії відомо, що

$$\sin(2\pi ft) + A_i \sin(2\pi ft + \varphi_i) = A \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (2.12)$$

де

$$A = \sqrt{1 + A_i^2 + 2 A_i \cos \varphi_i}, \quad (2.13)$$

$$\varphi = \arctg \frac{A_i \sin \varphi_i}{1 + A_i \cos \varphi_i}. \quad (2.14)$$

Для отримання кількісних оцінок покладемо у (2.7) $\varphi_i = 0$, $A_i = 0,1$. Тоді, до прикладу, зменшення A_i у двічі приводить до зменшення A всього на $\sim 4,5\%$.

Суттєво зменшується і діапазон зміни початкової фази: для значення $A_i = 0,1$ маємо

$$\varphi = \arctg \frac{0,1 \sin \varphi_i}{1 + 0,1 \cos \varphi_i} \ll \varphi_i, \quad (2.15)$$

Отже зміні значень початкової фази інформаційної функції в інтервалі $\varphi_i \in (0, 90^\circ)$ відповідає зміна фази сумарного сигналу (2.12) в діапазоні $\varphi \in (0, 5,71^\circ)$, тобто майже у 16 разів меншому.

Для підвищення чутливості засобів ВСК до параметрів ОК вдаються до вилучення неінформативних складових сигналу, що досягається різними шляхами. До прикладу у вихрострумовій дефектоскопії компенсація значної частини складових $u_o(t)$ та $u_{\text{вн}}(t, \mathbf{p}_{\text{ОК}})$ відбувається за рахунок диференціального включення вимірювальних навоїв ВСП; інший варіант зменшення впливу неінформативних компонент сигналу полягає у створенні компенсаційної напруги протифазної до цих складових, тобто створення напруги $u_{\text{к}}(t) = u_o(t) + u_{\text{вн}}(t, \mathbf{p}_{\text{ОК}})$, що реалізується для фіксованих значень вектора $\mathbf{p}_{\text{ОК}}$.

Для задачі визначення товщини виробу в процесі ХФ необхідна компенсація тільки напруги холостого ходу, тоді обирають $u_k(t) = -u_o(t)$. Це дає змогу збільшити чутливість до товщини виробу для ВСП екранного типу.

Упорядкований багатовимірний набір з G одновимірних сигналів виду (2.11), який задається вектором

$$U_g(t, \mathbf{h}) = \{u_1(t, h_1), \dots, u_g(t, h_g), \dots, u_G(t, h_G)\},$$

$$t \in T_c, \quad g = \overline{1, G},$$
(2.16)

де $\mathbf{h} = (h_1, \dots, h_g, \dots, h_G)$ – вектор значень товщин виробу для g -тих ВСП,

є загальною математичною моделлю сигналу ВСМ, яка використовується у АСКТП ХФ.

2.3.2. Модель реальних сигналів ВСМ

Реальні сигнали ВСМ відрізняються від ідеальних з таких причин. По-перше, електричні інформаційні сигнали на виході ВСМ обтяжені шумовими складовими, які обумовлені електромагнітними наводками у з'єднувальних дротах, власними шумами електронних блоків тощо. По-друге, амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики окремих перетворювачів у матриці не можуть бути абсолютно ідентичними. На фіксованій частоті їх відхилення від ідеальних характеристик може набувати певних значень, з діапазону, який визначається технологією виготовлення елементів матричного перетворювача.

Дія шуму може бути врахована в моделі сигналу (2.11) адитивною шумовою складовою $u_{ш}(t)$, яка за виконання певних загальних припущень може розглядатись як реалізація гауссового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 . Неідентичність характеристик перетворювача може бути врахована введенням в модель сигналу (2.11) комплексного коефіцієнта передачі реального перетворювача, який однозначно визначається своїм модулем та аргументом. При ідентичній дії ОК на елементи ВСМ варіація значень модулів приводить до варіації амплітуди складових $u_{вн,g}(\cdot)$

внесених сигналів окремих перетворювачів у матриці, а зміна аргументу коефіцієнта передачі g -того елементу ВСМ – до зміни фаз цих сигналів на величину $\Delta\varphi_g$, $g = \overline{1, G}$. Враховуючи вище наведене, модель реального сигналу g -того ВСП в матриці представляється виразом

$$\begin{aligned}\tilde{u}_g(t, \mathbf{h}_g) &= U_0 \cos(2\pi f t) + U_{\text{вн},g}(\mathbf{h}_g) \cdot (1 - k_g) \cdot \cos(2\pi f t - \varphi_{\text{вн},g}(\mathbf{h}_g) - \Delta\varphi_g) + u_{\text{ш}}(t) = \\ &= \tilde{U}_g(\mathbf{h}_g) \cos[2\pi f t - \tilde{\varphi}_g(\mathbf{h}_g)] + u_{\text{ш}}(t), \quad t \in T_c, \quad g = \overline{1, G},\end{aligned}\quad (2.17)$$

де k_g , $g = \overline{1, G}$ – відносна зміна модуля коефіцієнту передачі g -того перетворювача в матриці, $|k_g| \ll 1$.

Загальна математична модель реального багатовимірного сигналу ВСМ лишається незмінною і задається вектором (2.16), елементами якого є одновимірні сигнали виду (2.17).

Оскільки значення k_g , $g = \overline{1, G}$ та $\Delta\varphi_g$, $g = \overline{1, G}$ фактично мають зміст систематичних похибок, їх можна визначити на етапі калібрування системи і внести в результати оцінювання параметрів сигналів у вигляді поправок.

Інформаційні сигнали ВСК спостерігаються на фоні адитивного шуму різного походження, який може суттєво обмежувати точність отримуваних результатів. Вплив шумової складової $u_{\text{ш}}(t)$, за низького відношення сигнал/шум – $c/\text{ш} = \tilde{U}_g(\mathbf{h}_g)/\sigma$, зменшується за рахунок включення до складу вторинного вимірювального перетворювача (див. рис.2.2) блока статистичного опрацювання даних.

2.4. Застосування дискретного перетворення Гільберта в аналізі сигналів ВСМ

Ефективність використання засобів ВСК в АСКТП ХФ значною мірою залежить не тільки від типу вихрострумового перетворювача та режиму його роботи, але й від методів опрацювання його сигналів, математичного та

алгоритмічно-програмного забезпечення процесу виділення корисної інформації про товщину виробу. В перших приладах ВСК для реалізації різних методів виділення корисної інформації – амплітудного, фазового та методу проєкцій, використовувались відповідно амплітудні, фазові та синхронні детектори. До їх складу входять нелінійні елементи та інерційні ланцюги (зокрема, фільтри низької частоти) з частото-залежними елементами, наявність яких призводить до додаткових нелінійних спотворень.

Перші засоби ВСК були орієнтовані на роботу на одній або декількох фіксованих робочих частотах в статичному (квазістатичному) [12, 13] або модуляційному [13, 14] режимах. Пізніше операції детектування виконувались за допомогою алгоритмів цифрової обробки сигналів, виділення їх квадратурних компонент та розроблення методів інтерпретації годографів сигналів ВСП у комплексній площині [12, 13, 16]. З часом було запропоновано низку нових для ВСК методів обробки сигналів ВСП, серед яких успішно розвиваються методи що ґрунтуються на використанні нейромережевих технологій [16-18], вейвлет-перетворень [19, 22], принципів томографії для тривимірної реконструкції [20] тощо. Набувають розвитку методи оброблення сигналів ВСП за їх збудження імпульсними сигналами [22-24]. До кола перспективних методів оброблення сигналів ВСП відносяться методи, в основу яких покладено дискретне перетворення Гільберта (ДПГ), і які вже використовуються у неруйнівному контролі та вимірювальній техніці [25 - 28]. Проте застосування ДПГ у ВСК потребує подальшого розвитку і методологічної підтримки.

Нижче на основі робіт [6, 29, 30] узагальнено особливості оброблення сигналів ВСП в складі АСКТП ХФ на основі аналізу їх фазових і амплітудних характеристик, отриманих за допомогою ДПГ.

2.4.1. Особливості оброблення сигналів ВСП в САК процесу ХФ

Сигнали ВСП виду (2.17), з огляду на обмеженість частотного діапазону реальних вихрострумових систем, відносяться до класу вузькосмугових сигналів, аргументами яких є час, частота та товщина контролюваного виробу. Такі

сигнали представляються числовими функціями $u(x) \in L_2$. Для таких функцій має місце перетворення Гільберта, яке відоме в математиці як інтегральне перетворення з ядром $1/\pi x$ і застосовується на практиці як інструмент оброблення сигналів в задачах вимірювань та контролю [23-26]. В якості аргументу x найчастіше виступає час t . Це перетворення дає змогу однозначно визначати такі характеристики функцій: амплітудну $A(t)$, фазову $\Phi(t)$ та частотну $F(t)$. Його дискретна реалізація у вигляді ДПГ є одним з ефективних методів цифрового опрацювання сигналів у часовій області.

Основні переваги і особливості використання алгоритмів оброблення сигналів ВСП на основі ДПГ для використання у САК процесу ХФ полягають у такому [6].

1. Висока інформативність через можливість аналізувати всю інформацію, пов'язану з інтегральним впливом параметрів ОК на характеристики сигналів ВСП (у випадку застосування перетворення Фур'є в аналізі сигналів ВСП, вплив параметрів ОК розподіляється між різними частотними компонентами спектру).

2. Можливість отримувати вибірки характеристик сигналу ВСМ значних обсягів, що створює передумови для більш коректного використання статистичних методів їх опрацювання.

3. Можливість синхронно обчислювати амплітудну та фазову характеристики сигналів ВСМ для спільного їх використання з метою виділення нових інформаційних ознак, що можуть бути ефективними для визначення параметрів та характеристик ОК в системах керування технологічними процесами.

4. Можливість визначати зміни параметрів сигналів ВСМ на інтервалах часу від одного до сотень періодів сигналу-носія.

5. Застосування математичного апарату ДПГ до результатів фізичних експериментів з сигналами ВСМ дає змогу врахувати той факт, що останні мають розмірність (вольти). Їх можна представити добутком числової функції $u(t)$ на одиницю вимірювання [U] відповідної фізичної величини U.

Оскільки ДПГ має властивість лінійності, а модуль комплексного коефіцієнта перетворення Гільберта дорівнює одиниці, формування гільберт-образу сигналів $\tilde{u}(t) \cdot [U]$ відбувається без спотворення міри, за допомогою якої вимірюються значення $u(t) \cdot [U]$. В таблиці 2.1 наведено узагальнені дані щодо вимірюваних характеристик сигналів, які отримують через ДПГ, їх розмірності та необхідності використання мір фізичних величин.

Табл. 2.1. Узагальнені дані щодо розмірностей характеристик сигналів ВСМ

Функція	Розмірність	Міра фізичної величини
$u(t) [U], \tilde{u}(t) [U], A(t) [U]$	вольт	міра напруги U
$\Phi(t)$	радіан	-
$F(t)$	герц	міра часу t

Таким чином, у випадку застосування ДПГ до сигналів ВСМ, можна зазначити наступне:

- формування гільберт-образу сигналів та визначення їх амплітудної характеристики відбувається без спотворення міри, яка використовується для вимірювання сигналу ВСМ у визначених одиницях фізичної величини;
- значення фазової характеристики (фази) в радіанах є величиною з розмірністю одиниця, яка визначається через відношення двох величин одного роду – $\tilde{u}(t) \cdot [U]$ та $u(t) \cdot [U]$ без будь-якого використання окремої міри вимірювання фазового зсуву сигналів;
- оцінювання значень частотної характеристики $F(t)$ з функції $\Phi(t)$ в Герцах вимагає використання додаткової міри часу.

6. Можливість зменшення аналогової частини опрацювання сигналів за рахунок розширення цифрової обробки, що збільшує гнучкість систем ВСК у складі АСКТП та можливість їх оновлення за рахунок удосконалення програмної частини.

2.4.2. Зміст та завдання формування та опрацювання сигналів ВСК за допомогою ДПГ

Узагальнена схема отримання та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ подана на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Структурно-логічна схема формування та опрацювання сигналів ВСК з використанням ДПГ, що реалізується в чотири етапи

На рис. 2.4 позначено: ДГГС – двофазний генератор гармонічних сигналів, ПП – підсумовуючий підсилювач; Ф – фільтр; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; НЦД – накопичувач цифрових даних; ДПГ – дискретний перетворювач Гільберта; ООС та ОФС – обчислювачі обвідної та фази сигналу відповідно; ОХО та ОХФ – обчислювачі характеристик обвідної та фази відповідно; БОПОК – блок оцінювання параметрів ОК.

Формування сигналів ВСК виконується наступним чином. ДГГС формує синусоїдний сигнал живлення ВСП робочої частоти f . Окремий перетворювач в ВСК через електромагнітне поле взаємодіє з ОК і формує сигнал ВСП $u_g(t, p_{\text{ОК}})$. Аргументами цього сигналу є не тільки час t , але й вектор параметрів ОК $p_{\text{ОК}}$.

Конструктивним підходом до аналізу сигналів ВСП є підхід, що ґрунтується на визначенні характеристик таких сигналів – амплітудної, фазової, частотної, та їх подальшому опрацюванні.

Розглянемо детальніше методологію такого опрацювання сигналів ВСМ, яке виконується у три етапи (рис. 2.4). На першому етапі сигнал $u(t, p_{\text{OK}})$ спочатку додається до сигналу компенсації $u_k(t)$ в підсумовуючому підсилювачі ПП. Сигнал $u_k(t)$ формується ДГГС, який забезпечує можливість керування його амплітуди і фази. Таке керування необхідно для компенсації неінформативної складової кожного сигналу ВСМ залежно від задачі і умов контролю. Фільтр Φ – це фільтр низьких частот, який використовується перед АЦП для обмеження частотної смуги пропускання сигналу у відповідності з теоремою відліків Найквіста – Шеннона. Його частота зрізу обирається рівною половині частоти дискретизації АЦП, тобто $0,5F_d$.

Отримувану вибірку цифрового сигналу, що акумулюється у блоці НЦД, для кожного елементу ВСМ можна записати (без урахування шумової складової) у такому виді

$$u_g[j, p_{\text{OK}}] = U_g[j, p_{\text{OK}}] \cdot \cos(\Phi_g[j, p_{\text{OK}}]), j = \overline{1, J} \quad g = \overline{1, G} \quad , \quad (2.18)$$

де: J – обсяг вибірки, j – номер відліку у вибірці.

З виразу (2.18) видно, що характеристики ОК впливають як на дискретну амплітудну $U_g[j, p_{\text{OK}}]$ характеристику (представлену дискретними значеннями обвідну сигналу), так і на дискретну фазову характеристики сигналу (ФХС) $\Phi_g[j, p_{\text{OK}}]$ (представлену дискретними значеннями фази сигналу) кожного елементу ВСМ. Хоча взаємозв'язок характеристик ОК з характеристиками сигналів ВСМ у явній формі в більшості випадків встановити неможливо, функції амплітуди та фази є носіями інформації про властивості ОК.

Вторинне опрацювання сигналів ВСМ включає виконання ДПГ сигналів та обчислення їх обвідної та фази, що виконується відповідно блоками ДПГ, ООС та ОФС. ДПГ реалізує оператор дискретного перетворення Гільберта $\mathbf{H}_d$ і забезпечує отримання гільберт-образу вибірки $u_g[j, p_{\text{OK}}]$:

$$\tilde{u}_g[j, p_{\text{OK}}] = \mathbf{H}_d(u[j, p_{\text{OK}}]), \quad j = \overline{1, J} .$$

Значення дискретних обвідної та фази сигналу для всіх значень вибірки g -того елементу ВСМ обчислюються в блоках ООС та ОФС за алгоритмами відповідно [28]

$$U_g[j, \mathbf{p}_{OK}] = \sqrt{u_g^2[j, \mathbf{p}_{OK}] + \tilde{u}_g^2[j, \mathbf{p}_{OK}]}, \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \Phi_g[j, \mathbf{p}_{OK}] = \arctan \frac{\bar{u}_g[j, \mathbf{p}_{OK}]}{u_g[j, \mathbf{p}_{OK}]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign } \bar{u}_g[j, \mathbf{p}_{OK}](1 + \text{sign } u_g[j, \mathbf{p}_{OK}])\} \\ + L(\bar{u}_g[j, \mathbf{p}_{OK}], u_g[j, \mathbf{p}_{OK}]), \end{aligned} \quad (2.20)$$

де $\mathbf{L}$ – оператор розгортання ФХС за межі інтервалу $[0; 2\pi)$.

ДПГ дає можливість отримати вибірки амплітудної та фазової функцій з частотою $F_d \gg f$. Це, по-перше, дає змогу відслідкувати динаміку зміни характеристик сигналів ВСМ навіть протягом його періоду, по-друге, застосувати і детерміновані, і статистичні методи опрацювання цих функцій.

Третинне опрацювання сигналів ВСМ виконується блоками ОХО, ОХФ та БОПТОК. Цей етап спрямований на отримання вторинних детермінованих і статистичних характеристик з послідовностей $U_g[j, \mathbf{p}_{OK}]$ та $\Phi_g[j, \mathbf{p}_{OK}]$. Це можуть бути функція амплітудної модуляції сигналу, її параметри, індекс модуляції, функція фазової модуляції, яка визначається як різниця фазових характеристик сигналу ВСП та сигналу збудження

$$\varphi_g[j, \mathbf{p}_{OK}] = \Phi_g[j, \mathbf{p}_{OK}] - 2\pi f j T_d, \quad (2.21)$$

та інші.

Процедуру нормалізації сигналів в каналах ВСМ пропонується виконувати наступним чином. ВСМ встановлюється на бездефектну ділянку тестового зразку (чи ОК). Для отримання однакових сигналів у всіх G каналах ВСМ виконується їх нормалізація. Ця процедура полягає у збільшенні значень обвідної у $(1 - k_g)^{-1}$ разів, а фази сигналів – на величину $\Delta\varphi_g$. Ці поправки визначаються таким чином. Параметри сигналів одного з каналів ВСМ, до прикладу, першого – U_1, φ_1 , приймаються за опорні, тоді значення поправок обчислюються згідно із загальними виразами

$$k_g = \frac{U_g - U_1}{U_1}, g = \overline{2, G}, \quad (2.22)$$

$$\Delta\varphi_g = \varphi_g - \varphi_1, g = \overline{2, G}. \quad (2.23)$$

Нормування сигналів полягає у введенні поправок (2.22), (2.23) в результати обчислення амплітуди і фази сигналів в каналах ВСМ під час контролю. Ця процедура може виконуватись в автоматичному режимі у цифровому варіанті у процесорі.

Основним завданням БОПОК є формування оцінок одного чи декількох параметрів ОК залежно від потреб випробування тобто він має виокремити інформацію про певну досліджувану властивість ОК. Мова йде про операцію виділення із сигналу ВСП інформаційних ознак, яка в англійській літературі має назву «feature extraction». Вона полягає у виділенні з інформаційного сигналу тільки тих його первинних і вторинних характеристик, які найбільш тісно пов'язані з досліджуваним параметром ОК (функціонально чи кореляційно). В цілому, визначення амплітудної і фазової характеристик сигналів ВСМ окремо одна від одної дає змогу збільшити кількість вхідних аргументів і забезпечує на цій основі більш широкі можливості для вдосконалення алгоритмів виявлення діагностичних ознак для їх використання як в системах неруйнівного контролю, так і в АСКТП.

Якщо первинне оброблення сигналів ВСМ виконується за допомогою аналогової технології, то вторинне і третинне оброблення даних реалізуються в цифровому виді. Це забезпечує гнучкість систем ВСК та можливість їх оновлення за рахунок вдосконалення програмного забезпечення. Крім того, мінімізація процедур аналогового оброблення сигналу сприяє зменшенню нелінійних спотворень, що важливо для підвищення надійності та достовірності контролю та керування.

2.5. Методологія отримання вторинних інформаційних ознак з фазової характеристики сигналів ВСМ

2.5.1. Методології отримання ФХС ВСМ

Методологія отримання та аналізу ФХС ВСМ ґрунтується на сукупності таких складових: ДПГ, яке дає змогу отримати вибірки фазових характеристик сигналів, їх детермінованого аналізу, що дає змогу отримати вторинні детерміновані ознаки, та методів статистичного аналізу фазових даних, що дає можливість отримати ряд кругових статистик [6] (рис. 2.5).

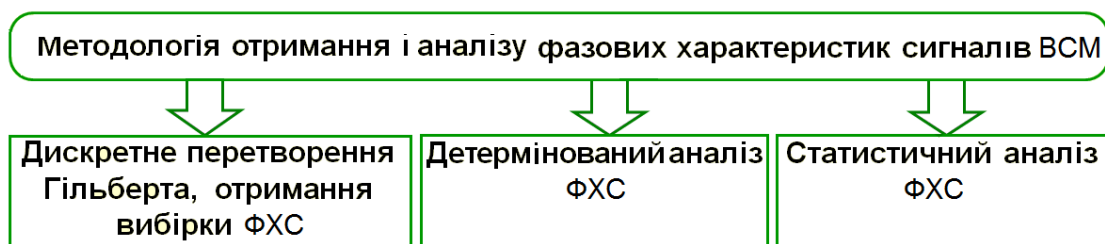


Рис. 2.5. Графічне представлення складових методології отримання та аналізу ФХС ВСМ

Реалізацію цієї методології ілюструє структурно-логічна схема, представлена на рис. 2.6. Вибірки сигналів $\{u_g[j], j = \overline{1, J}\}$, $\{u_o[j], j = \overline{1, J}\}$ (далі в структурі аргументів вказано лише номер елемента у вибірці) проходять безпосередньо та через модулі ДПГ, які формують вибір гільберт-образів цих сигналів $\{\tilde{u}_g[j], j = \overline{1, J}\}$, $\{\tilde{u}_o[j], j = \overline{1, J}\}$, на пристрої ділення, що обчислюють значення $\{\tilde{u}_g[j]/u_g[j], j = \overline{1, J}\}$ і $\{\tilde{u}_o[j]/u_o[j], j = \overline{1, J}\}$. Блоки $\tan^{-1}$ реалізують функцію отримання розгорнутої дискретної ФХС згідно (2.20).

Канал визначення дискретної розгорнутої фази $\{\Phi_o[j], j = \overline{1, J}\}$ сигналу збудження ВСМ може бути замінений на його дискретну фазову характеристику $2\pi f T_d$. Така можливість існує у випадку цифрового формування сигналу збудження.

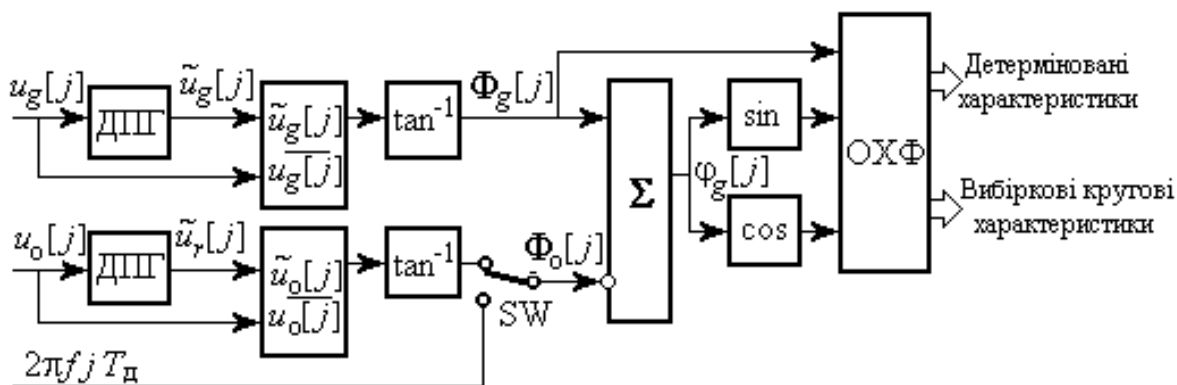


Рис. 2.6. Структурно-логічна схема реалізації методології отримання дискретних ФХС та вторинних інформаційних ознак на її основі

Переключення різних режимів отримання вибірки $\{\Phi_o[j], j = \overline{1, J}\}$ здійснюється перемикачем SW. Блок Σ забезпечує отримання різниці дискретних ФХС $\phi_g[j], j = \overline{1, J}$ згідно (2.21). Інформаційні ознаки формує обчислювач характеристик фази (ОХФ), на вхід якого надходять вибірки $\{\Phi_g[j], j = \overline{1, J}\}$, а також $\{\sin \phi_g[j], j = \overline{1, J}\}$ та $\{\cos \phi_g[j], j = \overline{1, J}\}$. Останні отримують відповідно в блоках “sin” та “cos”. Графічну ілюстрацію процесу усереднення фазових даних на колі дає рис. 2.7.

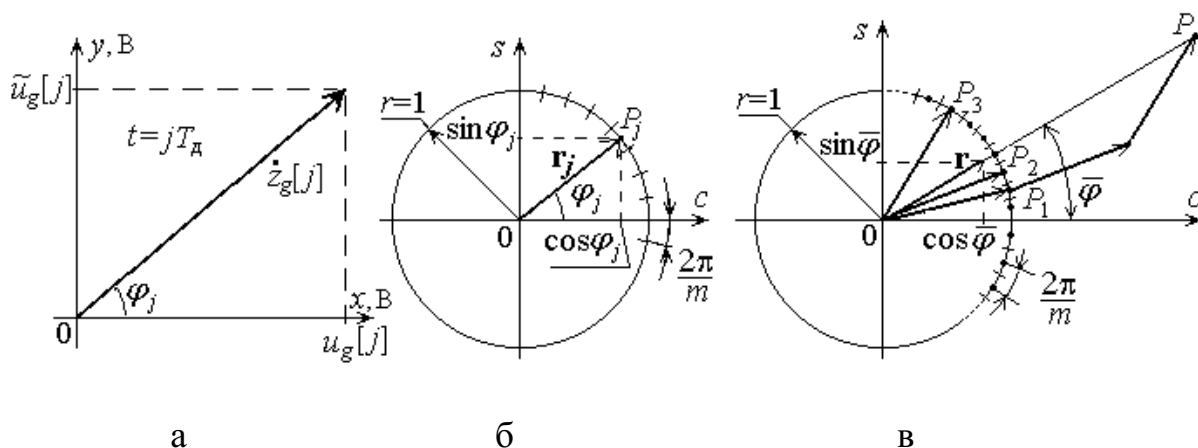


Рис. 2.7. Графічна ілюстрація процесу опрацювання дискретної ФХС: а – визначення поточного значення $\varphi_j = \Phi_g[j] \bmod 2\pi$; б – представлення φ_j на одиничному колі; в – підсумовування на колі фазових даних для вибірки з $J=3$

На рис. 2.7.а представлено зображення в декартових координатах значень $\tilde{u}_g[j]$ та $u_g[j]$ в момент часу $t = jT_d$ та показано утворення та визначення поточного значення фази сигналу φ_j через обернену тригонометричну функцію арктангенса від відношення $\tilde{u}_g[j]/u_g[j]$.

На рис. 2.7а також зображено вектор $\mathbf{z}_g[j] = u_g[j] + i\tilde{u}_g[j]$ ($i = \sqrt{-1}$). Кожному оберту вектора $\mathbf{z}_g[j]$ відповідає збільшення фази сигналу на 2π . Зазвичай приймається умова, що позитивному відліку фази відповідає обертання $\mathbf{z}[j]$ в напрямку проти ходу стрілки годинника.

На рис. 2.7б показано відображення значення φ_j на колі радіусу $r=1$ (одиничному колі), якому відповідає точка кола P_j . Зручність такого представлення φ_j полягає в тому, що Декартові координати точки P_j визначаються як $(\cos \varphi_j, \sin \varphi_j)$. У випадку застосування цифрового способу вимірювання все коло розбивається на m інтервалів величиною $2\pi/m$.

Рис. 2.7в пояснює сутність процесу усереднення фазових даних на одиничному колі. Результируючий вектор $\mathbf{r} = |\mathbf{r}| \cdot e^{i\bar{\varphi}}$ містить інформацію як про середнє значення фази $\bar{\varphi}$, так і про розкид окремих відліків фази відносно $\bar{\varphi}$: зі збільшенням розкиду зменшується значення $|\mathbf{r}|$.

Одиничне коло, як область представлення напрямків на площині використовується в статистичному аналізі кутових даних. Спорідненість математичних об'єктів кутових та фазових вимірювань та однакові одиниці вимірювання цих величин дали підстави для використання методів статистичного аналізу випадкових кутів на площині [32, 33] в аналізі результатів фазових вимірювань.

2.5.2. Методологія отримання вторинних інформаційних ознак з дискретної ФХС ВСМ

В практиці ВСК, довгий час найбільш уживаними були інформаційні ознаки, що отримувались з амплітуди сигналів – функція амплітудної модуляції сигналу, амплітуда сигналу, точки перетину сигналом певного рівня тощо [4]. Такий підхід не вимагав застосування складних технічних рішень.

Оскільки в запропонованій системі САК процесу ХФ інформація про товщину ОК отримується з фази сигналів ВСМ, представляється доцільним більш детально розглянути питання формування вторинних інформаційних ознак, які можуть бути використані для формування керувальних впливів в АСКТП ХФ, з дискретної фазової характеристики сигналів ВСМ.

В цілому використання фазової характеристики сигналів у ВСК має наступні переваги [30].

1. Фаза є неенергетичним параметром сигналу стійким до впливу шумів.
2. Природною мірою фази є величина 2π , яка не залежить від амплітуди сигналу.
3. Значення 2π може бути відтворено обчислювальними методами з високою точністю незалежно від місця і часу проведення експериментів.

Застосування ДПГ дає змогу більш повно використати інформаційний ресурс ФХС і визначити з неї ряд вторинних детермінованих та статистичних інформаційних ознак. Перелік найбільш характерних з них наведено на рис. 2.8.

Що стосується детермінованих характеристик, то їх більша частина отримується за алгоритмами, наведеними вище та у роботі [6]:

- нерозгорнута фаза сигналу – формула (2.20) за виключенням оператора L ;
- розгорнута фаза сигналу – формула (2.20);
- фазовий зсув сигналів, закони фазової модуляції/маніпуляції – формула (2.21).

У ряді завдань ВСК актуальним є вимірювання миттєвої частоти сигналів. Якщо відношення $c/\sigma \gg 1$, миттєва частота в дискретні моменти часу визначається безпосередньо з дискретної розгорнутої фази як функція

$$f_g[j] = \frac{\Phi_g[j] - \Phi_g[j-1]}{2\pi T_d}, \quad 2 \leq j \leq J. \quad (2.24)$$



Рис. 2.8. Найхарактерніші вторинні детерміновані та статистичні інформаційні ознаки сигналів ВСК, що отримують з ФХС

За умови дії шумів, що супроводжують процес отримання сигналів ВСК, значення фазових зсувів сигналів $\phi_g[j]$ [6] розглядаються як реалізації випадкової кутової величини. Отже до них можуть бути застосовані методи статистичного аналізу результатів кутових спостережень і відповідні статистики. Загальні питання цього розділу математичної статистики викладено в [32, 33], а прикладні питання їх використання у фазометрії – в роботі [31]. В цих роботах розглянуто різні аспекти статистичного аналізу кутових та фазових даних – основні поняття та кругові моделі, вибіркові кругові статистики, фундаментальні теореми для розподілених на колі кутів, розподіли ймовірності випадкових кутів тощо.

Для статистичного аналізу результатів фазових вимірювань природним є використання в якості вторинних інформаційних ознак кругових статистик –

вибіркового кругового середнього, вибіркової кругової дисперсії, результуючої довжини вектора (r -статистики) та ін. Ці статистики ще не набули достатнього поширення в практиці ВСК, тому нижче дано стислий огляд та зміст найбільш важливих для ВСК кругових статистик.

Вхідними даними для отримання вибірових кругових статистик є вибірка фазових зсувів сигналів $(\varphi_1, \dots, \varphi_j, \dots, \varphi_M)$, $\varphi_j \in [0, 2\pi)$ обсягу M , отримана для сигналу з одного елемента ВСК (тут для спрощення запису номер елемента матриці не вказаний). Ця вибірка розглядається як реалізація вектора випадкових фазових зсувів, всі елементи якого мають однакову безперервну щільність розподілу ймовірностей $p(x)$, $x \in [0, 2\pi)$. Для такої вибірки розглядаються наступні вибіркові кругові характеристики.

Вибірковий тригонометричний момент фазових зсувів сигналів порядку u відносно фазового кута $\alpha \in [0, 2\pi)$ визначається як комплексна функція

$$f_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M e^{iu(\varphi_j - \alpha)} = a_u(\alpha) + ib_u(\alpha) = r_u(\alpha) e^{im_u(\alpha)}, \quad (2.25)$$

де $r_u(\alpha)$, $m_u(\alpha)$ – відповідно модуль та аргумент $f_u(\alpha)$, u – ціле число.

Послідовність вибірових тригонометричних моментів утворює вибіркову характеристичну функцію.

Вибіркові косинусний та синусний моменти порядку u відносно фазового кута $\alpha \in [0, 2\pi)$ визначаються згідно формул

$$a_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M \cos[u(\varphi_j - \alpha)], \quad b_u(\alpha) = M^{-1} \sum_{j=1}^M \sin[u(\varphi_j - \alpha)]. \quad (2.26)$$

Найменування та зміст деяких інших важливих для ВСК вибірових кругових статистик наведено в табл. 2.2. Дві перші з наведених в табл. 2.2 характеристики отримують з вибірового тригонометричного моменту першого порядку – це вибірове кругове середнє статистики фазових кутів $\bar{\varphi} = \arg(f_1(0))$, та вибірова середня довжина результуючого вектора $r = |f_1(\alpha)|$, де $\alpha \in [0, 2\pi)$.

В системах з ВСМ в кожному з G каналів формується своє значення характеристики, тому для кожного фіксованого положення матриці отримується вектор вторинної інформаційної ознаки або декілька таких векторів. До прикладу, у разі визначення кругових середніх маємо

$$\bar{\varphi}_G = (\bar{\varphi}_1, \dots, \bar{\varphi}_g, \dots, \bar{\varphi}_G), g = \overline{1, G}, \quad (2.28)$$

а у випадку визначення вибіркової середньої довжини результуючого вектора

$$\bar{r}_G = (\bar{r}_1, \dots, \bar{r}_g, \dots, \bar{r}_G), g = \overline{1, G}. \quad (2.29)$$

Таблиця 2.2. Вибіркові кругові статистики, отримані з вибірки обсягу M

Найменування статистичної характеристики	Зміст, математичний запис
Вибіркове кругове середнє статистики фазових зсувів сигналів	$\bar{\varphi} = \arctg(S/C) + 0,5\pi \{2 - (\text{sign}S) \times [1 + \text{sign}C]\}$ $C = M^{-1} \sum_{j=1}^M \cos \varphi_j, S = M^{-1} \sum_{j=1}^M \sin \varphi_j$
Вибіркова середня довжина результуючого вектора	$r = \bar{f}_1(\alpha) = \sqrt{S^2 + C^2}$
Вибіркова кругова дисперсія статистики фазових зсувів сигналів	$\sigma = \sqrt{-2 \ln(1-V)}; V = 1 - \exp(-0,5\sigma^2)$
Кругове стандартне відхилення статистики фазових зсувів сигналів	$V = 1 - r$
Вибіркова кругова медіана статистики фазових зсувів сигналів	Це кут, якому відповідає точка кола P, для якої діаметр PQ ділить значення вибірки фазових зсувів сигналів навпіл, і в околі P спостерігається максимальна концентрація значень вибірки

Ці та інші характеристики можуть бути використані як для витягування нових діагностичних ознак (feature extraction), так і в якості вхідних даних для класифікаторів дефектів, зокрема, на основі нейронних мереж.

Висновки до розділу 2

За виконаним аналізом процесу формування сигналів ВСМ в складі САК процесу ХФ отримано наступні результати та зроблено такі висновки.

1. Розглянуто узагальнену модель сигналів окремих ВСП та запропоновано багатовимірну модель сигналів ВСМ за умови гармонічного збудження її елементів, в якій враховано додаткові амплітудні і фазові спотворення сигналів окремих перетворювачів ВСМ, викликані неідентичністю їх комплексних коефіцієнтів передачі, що необхідно для адекватного представлення процесу формування сигналів ВСМ.

2. Розглянуто структурно-логічну схему формування та опрацювання сигналів ВСМ з використанням ДПГ, в якій виділено та уточнено зміст первинного, вторинного та третинного етапів опрацювання сигналів ВСМ. З'ясовано, що використання ДПГ для опрацювання сигналів ВСМ дає змогу: отримувати більші обсяги інформації про ОК у цифровій формі; синхронно обчислювати амплітудну та фазову характеристики сигналу ВСМ і на цій основі розширити можливості для пошуку нових інформаційних ознак.

3. Використання методології опрацювання сигналів ВСК на основі поєднання ДПГ та методів детермінованої та статистичної фазометрії дає змогу включити в технологію ВСК нові векторні інформаційні ознаки сигналів ВСМ, які отримують з їх фазових характеристик і можуть бути використані для формування керувальних впливів в САК процесу ХФ.

Список використаних джерел до розділу 2

1. *Louis C. Westphal. Handbook of Control Systems Engineering. – 2nd edition; The Springer International Series in Engineering and Computer Science. – Springer, 2001. – Т. 635. – 1063 с. – ISBN 978-0792374947*

2. Жученко А. І. Теорія автоматичного керування. Терміни, поняття, визначення: Довідник для студ. напряму «Автоматизація та компютерно-інтегровані технології» / А. І. Жученко, Т. В. Аверіна. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – 52 с.

3. Іванов А.О. Теорія автоматичного керування: Підручник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. – 2003. – 250 с.

4. *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, Flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). Second edition. Edited by R.C. McMaster and P. VcIntire. – USA: American Society for NDT, 1986. – 677 p.*

5. Дорофеев А.Л. Индукционная толщинометрия / Дорофеев А.А., Никитин А.И., Рубин А.Л. – М., Энергия, 1978. – 184 с.

6. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю., Левченко О.Е. Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумowego контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумowego контролі / Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2021. – №3. – С.7-13. DOI:<https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.01>

7. Вихрострумовой моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки / В.М. Учанін, О.П. Осташ, С.А. Бичков та інші. // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2021. – № 1. – С. 3-10. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.01>.

8. Тетерко А.Я., Учанін В.М., Гутник В.І. Підвищення точності вихрострумowego контролю електропровідності матеріалу та товщини діелектричного покритву оболонок // Фіз.-хім. механ. матеріалів. – 2013. – № 6. – С. 133-139. (Teterko A., Uchanin V., Gutnik V. Improvement of the Accuracy of Eddy-Current Testing of the Electric Conductivity of Materials and the Thickness of

Dielectric Coatings of the Shells // Materials Science. – 2014. – № 6. – P. 857-865. DOI: 10.1007/s11003-014-9684-9.

9. Учанін В.М. Пропозиції щодо вдосконалення класифікації вихрострумових перетворювачів // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2018. – № 2. – С. 68-74. <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.10>.

10. Маєвський С.М. та ін. Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі/ С.М. Маєвський, В.П. Бабак, Л.М.Щербак. – К.: Либідь, 1993. – 200 с.

11. Гальченко В.Я. Информационные модели в теории и практике электромагнитной дефектоскопии. – Луганск: Издат. Восточноукраинского гос. ун-та, 1997. – 262с.

12. Uchanin V. Detection of the fatigue cracks initiated near the rivet holes by eddy current inspection techniques // Transactions on Aerospace Research. – 2020. – № 1(258). – P. 47-58. DOI: 10.2478/tar-2020-0010.

13. Hochschild R. Modulation analysis – a new instrument technique in eddy current testing // Nondestructive Testing. – 1960. – № 5. – P. 323-325.

14. Detection of defects in the tubes of refrigerators of locomotive diesel engines by the eddy current method / S. Aks' onova, A. Lyubchenko, V. Uchanin et al // Materials Science. – 2005. – Vol 41. – № 5. – P. 406-409. <https://doi.org/10.1007/s11003-005-0178-7>.

15. Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання, Львів: СПОЛОМ, 2013. – 286 с.

16. Udpa L., Udpa S.S. Eddy current defect characterization using neural networks // Materials Evaluation. – 1990. – Vol. 48. – № 4. – P. 342-347.

17. Challenges in improving the performance of eddy current testing: Review / A. Abdalla, M. Faraj, Samsuri F. et al. // Measurement and Control. – 2019. – Vol. 52(1-2). – P. 46-64. DOI: 10.1177/0020294018801382.

18. Єременко В.С. Переїденко А.В., Монченко О.В. Застосування нейромережових технологій у системах неруйнівного контролю // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – №1. – 2012. – С. 35-41.

19. Development of image fusion methodology using discrete wavelet transform for eddy current images / Sasi Balakrishnan, Matteo Cacciola, Lalita Udpa, Bhagi Purnachandra Rao, Tammana Jayakumar, Baldev Raj // *NDT&E International*. – 2012. Vol. 51. – P. 51–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.06.006>.
20. Grman J. Application of wavelet transformation in eddy current testing // *measurement science review*. – 2001. – Vol. 1. – № 1. – P. 21-24.
21. Вертій О.О., Учанін В.М. Тривимірна візуалізація виявлених дефектів методами вихрострумової обчислювальної томографії // *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. – 2021. – № 2. – С. 7-13. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.01>.
22. Tian G.Y., Sophian A., Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors // *NDT and E International*. – 2005. – Vol. 38. – P.77-82.
23. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin et al // *Materials Science*. – 2016. – Vol. 52. – № 3. – P. 431-437. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9975-4>.
24. Lysenko Ju., Eremenko V., Kuts Yu., Protasov A., Uchanin V. Advanced signal processing methods for inspection of aircraft structural materials // *Transactions on Aerospace Research*. – 2020. – № 2(259). – P.27-35. DOI: 10.2478/tar-2020-0008.
25. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Kurapov, P. Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation // *Digital Signal Processing*. – 2021. – Vol. 116(103113). doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103113.
26. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Застосування перетворення Гільберта у фазометрії // *Технологические системы*. – 2004. – №2. – С. 50 – 55.
27. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов (2-е изд., пер. с англ), 2006, М.: Изд-во «Бином-Пресс». – 656 с.
28. Куц Ю.В., Лысенко Ю.Ю. Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии // *Научни известия на НТСМ. България*, 2011. – № 121. – С. 22-24.

29. Zhong Mei, Yurii Kuts, Orest Kochan, Iuliia Lysenko, Oleksandr Levchenko, Halyna Vlach-Vyhrynovska. Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing / Measurement science review, 22, (2022), No 1, 32-43. DOI: <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004>.

30. Куц Ю.В., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю., Петрик В.Ф. Левченко О.Е., Богдан Г.А. Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумового контролю. Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації / Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2021. – №4. – С.11-18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>.

31. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія, 2009. Тернопіль: Вид-во Терн. держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – 383 с.

32. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. – М.: Гл.ред. физ.-мат. литературы изд-ва «Наука», 1979. – 240с.

33. Fisher N.I. Statistical analysis of circular data. / N.I. Fisher. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 277 p.

34. G. Dougherty, Pattern Recognition and Classification: An Introduction, Chapter 7. Feature Extraction and Selection.– Springer Science+Business Media New York 2013. DOI 10.1007/978-1-4614-5323-9_7.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБУ ВСК З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ САК ПРОЦЕСУ ХФ

В даному розділі представлено розробку прототипу засобу ВСК з ВСМ для визначення товщини виробу в процесі його хімічного фрезерування, який використовується в контурі визначення тривалості травлення САК процесу ХФ. Представлено архітектурне рішення, що забезпечує технічно обґрунтований режим роботи прототипу, спрямований на підвищення ефективності та швидкості створення функціональних прототипів нових засобів ВСК для керування технологічними процесами. Апаратна частина пристрою побудована на сучасних компонентах, що забезпечує високий рівень адаптивності до різних завдань ВСК у складі АСКТП.

Запропоновано архітектуру програмного забезпечення засобу ВСК на основі платформи Red Pitaya, що реалізує методологію опрацювання і аналізу даних, розроблену в розділі 2. Програмне забезпечення інтегровано з апаратною частиною і дає змогу проводити глибокий аналіз характеристик сигналів ВСМ, відслідковуючи динаміку зміни їх амплітудно-фазових характеристик.

Отримані в ході дослідження результати підтвердили ефективність запропонованого підходу та дали змогу розширити можливості САК процесу ХФ на основі матричної технології ВСК. Дані результати були представлені в ряді наукових публікацій [1-6].

3.1. Особливості використання засобу ВСК в САК процесу ХФ

Прототип засобу ВСК є інтегрованим рішенням для генерації, опрацювання та аналізу сигналів ВСМ, що складається з апаратної частини опрацювання сигналів та спеціального програмного забезпечення.

Основою прототипу засобу ВСК для САК процесу ХФ є платформа Red Pitaya, яка базується на високопродуктивному чіпі Xilinx Zynq-7010[1-2]. Даний чіп є системою на кристалі (SoC), що складається з двох підсистем: процесорної підсистеми та програмованої логічної підсистеми (FPGA). Така конфігурація

надає можливість динамічного налаштування кількості та характеристик периферійних пристроїв, що відіграють ключову роль у генерації та опрацюванні сигналів.

Для забезпечення ефективного обміну даними між платформою та зовнішніми системами, такими як персональні комп'ютери, використовується комунікаційний інтерфейс на базі Ethernet протоколу. Цей інтерфейс не тільки забезпечує швидку передачу даних, але й дає змогу гнучко налаштовувати параметри збору даних та обмінюватися попередньо опрацьованими даними.

Після передачі даних на персональний комп'ютер, можливо проводити їх детальний аналіз, попереднє опрацювання та постопрацювання, що значно розширює можливості системи та підвищує ефективність досліджень.

Уявлення про місце засобу ВСК та ВСМ в загальній архітектурі САК процесу ХФ, та передачу інформаційних потоків між компонентами системи дає рис. 3.1.

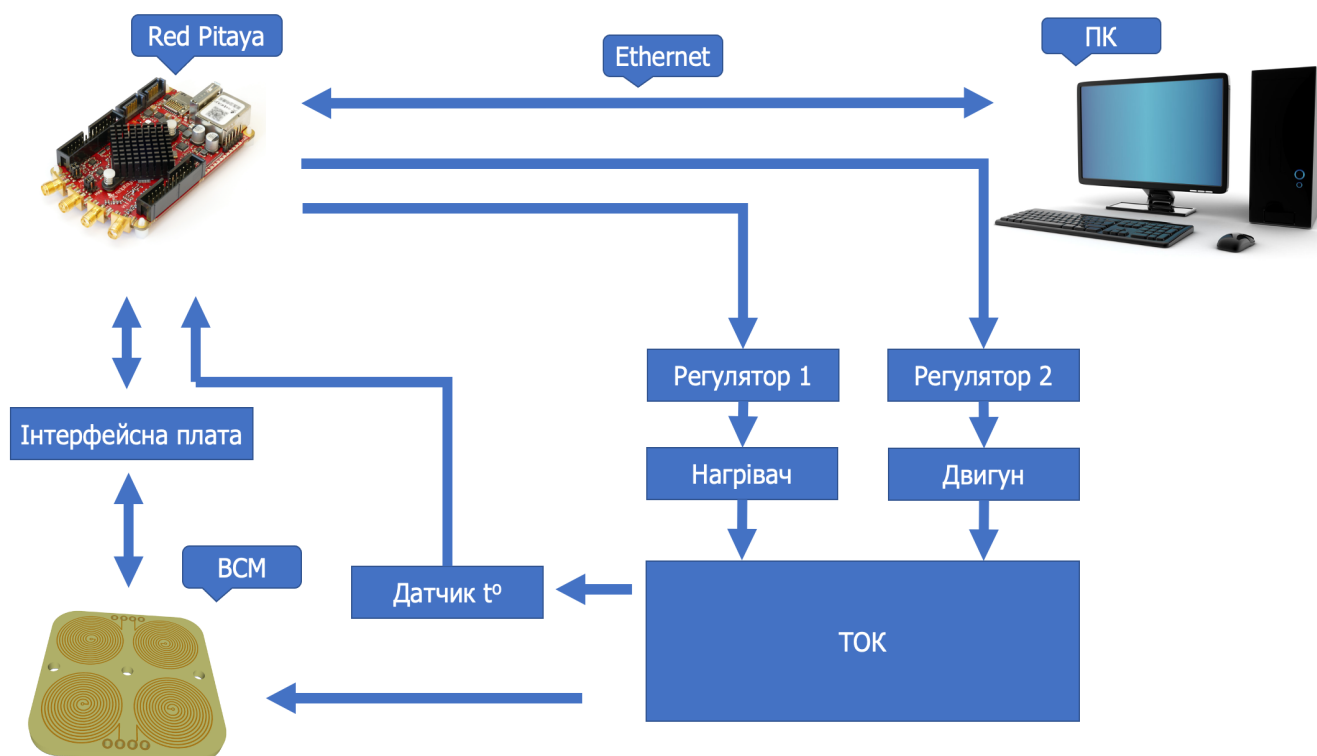


Рис. 3.1. Загальна архітектура двоконтурної САК процесу ХФ з реалізованим на платформі Red Pitaya прототипом засобу ВСК

Архітектура САК процесу ХФ включає такі компоненти.

1. Технологічний об'єкт керування (ТОК).
2. ВСМ, яка використовується як чутливий елемент для сприйняття товщини виробу.
3. Платформа Red Pitaya, яка використовується для генерації гармонічного сигналу збудження ВСМ, і як аналізатор сигналів ВСМ. Платформа підключається до ПК за допомогою Ethernet-протоколу та здатна підтримувати високу швидкість передачі даних.
4. Персональний комп'ютер (ПК), який використовується для контролю, опрацювання даних та формування сигналів керування.
5. Програмне забезпечення, яке дає змогу контролювати ВСМ, отримувати та обробляти дані від платформи Red Pitaya та здійснювати візуалізацію результатів роботи засобу ВСК та системи керування в цілому.
6. Регулятор 1, який формує керувальний вплив з метою забезпечення стабільності температури травника у відповідь на зміни технологічних параметрів та зовнішніх умов.
7. Нагрівач, інтегрований у ТОК, призначений для підтримання заданої температури травильного розчину.
8. Датчик температури, який безперервно вимірює температуру травильного розчину.
9. Регулятор 2 який формує керуючий вплив на двигун, відповідно реагуючи на виміряну товщину.
10. Двигун який необхідний для механічного переміщення заготовки у травильній ванні та її витягання після завершення процесу експозиції.

Ядро FPGA, комунікаційні інтерфейси та роз'єми для периферійних пристроїв знаходяться на основній платі Red Pitaya. Крім цього базового обладнання, основна плата має енергонезалежну флеш-пам'ять, що використовується для зберігання програмного забезпечення та внутрішніх налаштувань, кількох джерел синхронізації та конфігурації інтерфейсів.

Плата Red Pitaya з'єднується із ВСМ через інтерфейсу плату до складу якої входять мультиплексор та підсилювач. Також платформа може бути використана

для керування механізованими пристроями, що призначені для сканування поверхні об'єкту виробництва. Однак у розробленому засобі ВСК функція керування сканером здійснювалася за допомогою ПК. Інтерфейсна плата ВСМ прототипу системи ВСК відповідає за мультиплексування та підсилення сигналів ВСМ.

В цілому застосування ВСМ площинного типу дає змогу забезпечити покращену візуалізацію та кількісне оцінювання технологічних параметрів та дефектів ОК [3]. Ці технології, як відзначено в аналізі нормативної документації, відіграють ключову роль у забезпеченні якості та надійності електропровідних матеріалів, що використовуються в критично важливих галузях промисловості [4]. В роботі [5] виконано аналіз роботи ВСМ в імпульсному режимі, показано нові можливості для виявлення дефектів порівняно з традиційними методами ВСК. Сучасні дослідження [6] також вказують на необхідність врахування викликів, пов'язаних з інтеграцією ВСМ у системи ВСК, їх оптимізацією та розширенням функціональних можливостей стосовно використання в САК.

Обмін даними між ПК та платформою Red Pitaya реалізовано через протокол Ethernet. Цей протокол, як стандарт комунікаційних технологій в локальних мережах, забезпечує високу пропускну здатність та надійність передачі даних.

Генерація гармонічного сигналу збудження ВСМ на платі Red Pitaya відбувається за принципом DDS (Direct Digital Synthesis), який реалізовано на FPGA (Field Programmable Gate Array – програмована користувачем вентильна матриця) підсистемі чіпа Xilinx. Центральним елементом DDS є фазовий акумулятор, який накопичує значення фази сигналу і визначає його частоту. Для генерації гармонічного сигналу використовується спеціалізована таблиця, яка містить дискретні значення амплітуди для кожного значення фази сигналу. Ця таблиця, зазвичай відома як таблиця синусоїди, зчитується залежно від значення фазового акумулятора і відповідає значенням амплітуди. З кожним тактом, фазовий акумулятор збільшується на певне значення, яке визначає частоту вихідного сигналу. Це значення може бути динамічно змінено для зміни частоти

генерації. Після того, як значення амплітуди визначено за допомогою таблиці синусоїди, воно передається на ЦАП, який перетворює послідовність цифрових кодів на аналоговий сигнал. Результатом є гармонічний сигнал з визначеною частотою та амплітудою. Таким чином, завдяки DDS принципу, реалізованому на FPGA підсистемі чіпа Xilinx Zynq 7010, плата Red Pitaya здатна генерувати сигнали довільної форми з високою точністю та гнучкістю у налаштуванні їх параметрів.

3.2. Розроблення засобу ВСК для САК процесу ХФ

3.2.1 Апаратна частина засобу ВСК

Плата Red Pitaya (рис. 3.2) є програмно-апаратною платформою, яка застосована як основа для розроблення прототипу засобу ВСК. Основні характеристики платформи Red Pitaya, наведено у табл 3.1. Архітектура плати Red Pitaya побудована на чіпі Xilinx Zynq-7010. Цей чіп є системою на кристалі (SoC), що складається з двох підсистем: процесорної та програмованої логічної підсистем (рис. 3.3). Така архітектура забезпечує з'єднання програмованої логіки з процесорною підсистемою на кристалі, що дає змогу виконувати завдання швидко та ефективно.

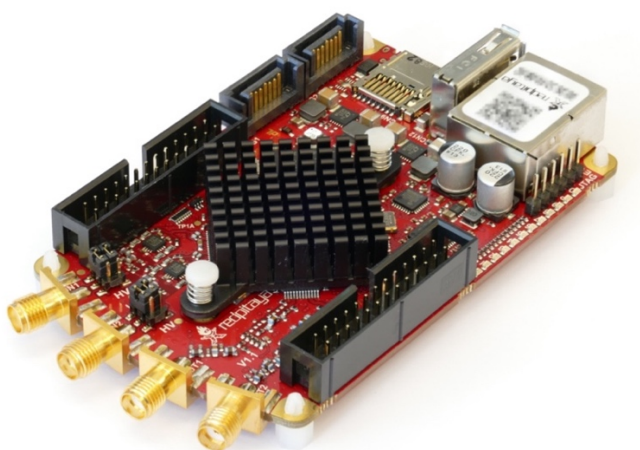


Рис. 3.2. Платформа Red Pitaya

Процесорна підсистема містить двоядерний процесор ARM Cortex A9. Кожне ядро процесора має свій власний спеціалізований кеш L1. Існує ще один

спільний кеш L2 об'ємом 512 кБ, який використовується обома процесорами. Також існує спеціалізований контролер DRAM, який може бути підключений до різних типів DRAM. Периферійні секції мають інтерфейси для UART, USB, SPI, Ethernet, SD Card, GPIO та ін. Також на цій платформі розташований контролер DMA, який відповідає за обмін даними між різними частинами підсистеми. Вбудований центральний комутатор відповідає за з'єднання всіх компонентів процесорної та програмовано логічної підсистеми.

Таблиця 3.1. Основні характеристики платформи Red Pitaya

Характеристика	Опис
Процесор	Xilinx Zynq 7010 SOC (система на кристалі), що включає в себе ядро ARM Cortex A9
Оперативна пам'ять	512 МБ DDR3 RAM
Пам'ять для зберігання даних	4 GB microSD (клас 10)
Операційна система	Linux
Сигнальний ввід/вивід	2 канали АЦП (125 MSPS, 14 біт), 2 ЦАП(125 MSPS, 14 біт)
Цифрові порти	16 цифрових входно-вихідних портів
Комунікаційні порти	Ethernet, USB, HDMI
Розміри	107 мм x 60 мм x 21 мм
Додаткові можливості	FPGA для адаптивного програмування та оброблення сигналів

Для забезпечення необмеженої кількості вимірювання вихідної напруги будь-якої пари котушок перетворювача матричного типу системи ВСК запропоновано блок мультиплексування та попереднього підсилення сигналу (рис. 3.4). Мультиплексор має змогу передавати сигнали від котушок ВСМ, які включені в абсолютному або диференційному режимах роботи. Отримані від ВСМ сигнали підсилюються за допомогою каскаду підсилення з низьким рівнем шуму, до складу якого входить підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення та цифровим керуванням (ПРКП), після якого включено підсилювач

з програмованим дискретним коефіцієнтом підсилення, який дає змогу максимально використовувати динамічний діапазон системного АЦП.

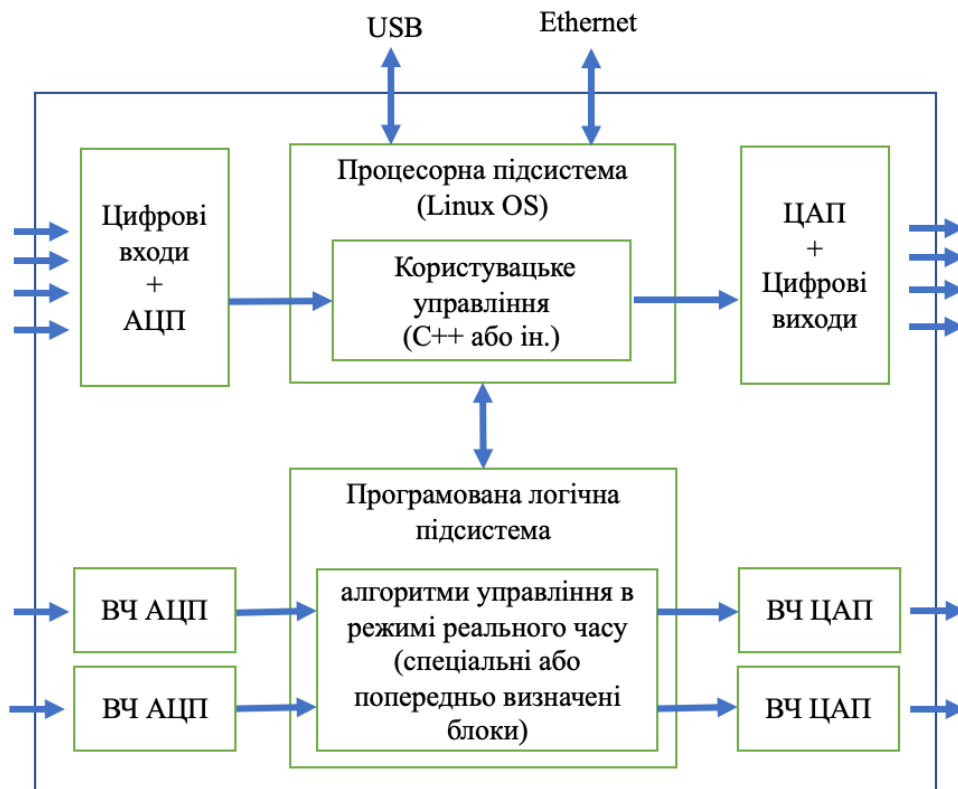


Рис. 3.3. Архітектура плати Red Pitaya

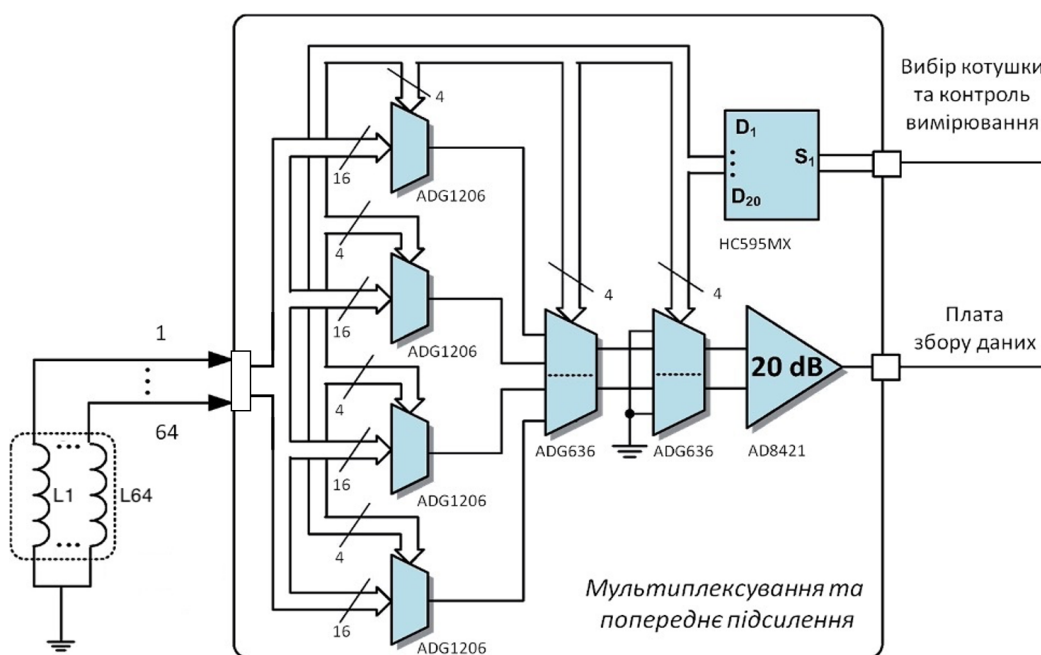


Рис. 3.4. Функціональна схема мультиплексування та попереднього підсилення сигналів ВСМ

Підсилення з низьким рівнем шуму досягається за допомогою інструментального підсилювача, що покращує заглушення синфазного сигналу, коли дві котушки включаються в диференціальному режимі.

3.2.2 Архітектура програмного забезпечення

Проектування архітектури програмного забезпечення є одним з ключових етапів розроблення сучасних засобів ВСК. Правильно побудована архітектура забезпечує ефективність, стійкість та масштабованість системи, а також спрощує її модернізацію та підтримку в майбутньому. Відповідно до концепції програмування Фаулера, неперервний процес рефакторингу є критичним для підтримування та оптимізації програмного забезпечення, гарантуючи його адаптацію до змінюваних вимог [7].

Система автоматизованої ВСК вимагає особливого підходу до архітектурного проектування з огляду на велику кількість даних, їх динамічний характер, а також потребу в швидкодії і ефективності опрацювання даних [8]. Це ставить перед розробниками ряд викликів, починаючи від вибору оптимальних алгоритмів опрацювання до розроблення інтуїтивного і зручного інтерфейсу оператора. Алрешіді та Ахмад розглядають архітектурні основи для систем Інтернету речей, які можуть бути інтегровані для підвищення стійкості та гнучкості вихрострумівих систем [9]. Такий підхід до архітектури, доповнений класифікацією Ахмада та його колег, задає важливі напрями розроблення інтуїтивно зрозумілого та ефективного користувацького інтерфейсу [10].

Для розгортання структури та взаємодії компонентів програмного забезпечення в даній роботі запропоновано використовувати методику C4-діаграм [11]. Ця методика дає змогу відображати ієрархічну структуру системи на рівнях: контексту, контейнерів, компонентів та коду, що значно спрощує процес проектування та аналізу архітектури. Нижче представлено детальний опис архітектури програмного забезпечення засобу ВСК з ВСМ, орієнтованого на роботу у складі САК процесу ХФ, і розробленого на основі C4-діаграм.

Діаграма рівня "контекст" має на меті надати загальне розуміння того, як система взаємодіє зі своїм зовнішнім оточенням (рис. 3.5). Цей рівень розглядає систему як єдиний ціле, акцентуючи увагу на основних точках взаємодії між системою та зовнішніми учасниками.

Оператор системи є основним користувачем системи. Він ініціює процеси сканування, конфігурує параметри обладнання, отримує експериментальні дані та інтерпретує їх.

Система дистанційного моніторингу забезпечує збір, опрацювання та передачу даних про стан об'єкта виробництва на віддалені сервери. Автоматизована система ВСК може передавати інформацію до цієї системи для додаткового аналізу, моніторингу та архівації.

Система бази даних є централізованою базою, що зберігає історію зміни технологічних параметрів та параметрів об'єкта виробництва. Система ВСК взаємодіє з цією базою для зберігання, відновлення та порівняння даних.

Можлива додаткова взаємодія системи ВСК з іншими зовнішніми системами, інтеграція з системами автоматичного контролю та керування процесами в промисловості, системами документообігу для автоматизації процесів документування, а також із системами електронного навчання для підготовки та перепідготовки операторів.

Взаємодія системи із зазначеними зовнішніми учасниками є ключовим моментом для забезпечення ефективності, надійності та безперебійної роботи автоматизованої системи ВСК.

Програмне забезпечення для керування автоматизованою системою ВСК було розроблено в середовищі MATLAB, яке дає змогу використовувати високорівневі інструкції для ефективного програмування складних обчислювальних процедур [12-14]. Розроблене програмне забезпечення має графічний інтерфейс [15], надаючи користувачам можливість легко налаштовувати параметри сканування.

Програмне забезпечення містить декілька модулів: керування сканером; керування системою збудження та збору даних; цифрове опрацювання вхідних

даних; відображення результатів, ручне керування системою. Модуль керування системою збудження та збору даних та модуль цифрового опрацювання вхідних даних використовує викладені Смітом в роботі [16] методи та техніки оптимізації обробки сигналів та збільшення продуктивності. Модуль відображення результатів використовує передові методи оптимізації MATLAB [17], щоб забезпечити швидке та інтуїтивно зрозуміле представлення результатів сканування, що є ключовим для оперативного формування сигналів керування та прийняття рішень.

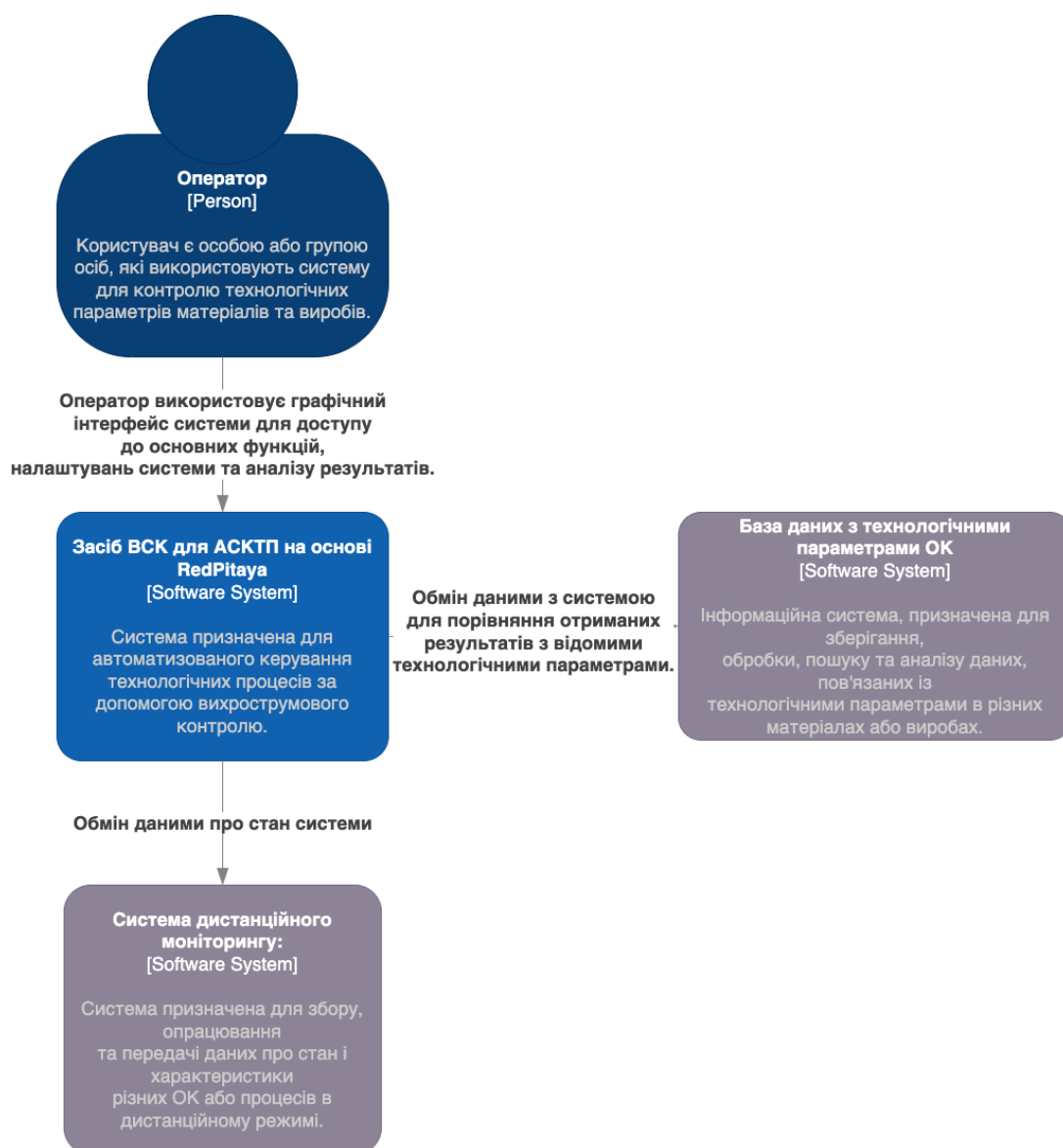


Рис. 3.5. Архітектура програмного забезпечення системи ВСК

Графічний інтерфейс реалізованого додатку зображено на рис. 3.6. В цій розробці врахована можливість підключення сканера для управління положенням

ВСК, що може бути корисно на етапі відпрацювання програмного забезпечення системи ВСК в різних завданнях контролю та керування (відповідні опції можуть бути відключені в робочому прототипі системи). Для розділення згаданих вище компонентів використано компонент "Tab Groups": "Com. Config" використовується для налаштування параметрів комунікації, що необхідно для зв'язку та керування сканером і платформою Red Pitaya; "Meas" – для налаштування параметрів збудження ВСК, збору даних та цифрової опрацювання вихідних даних.

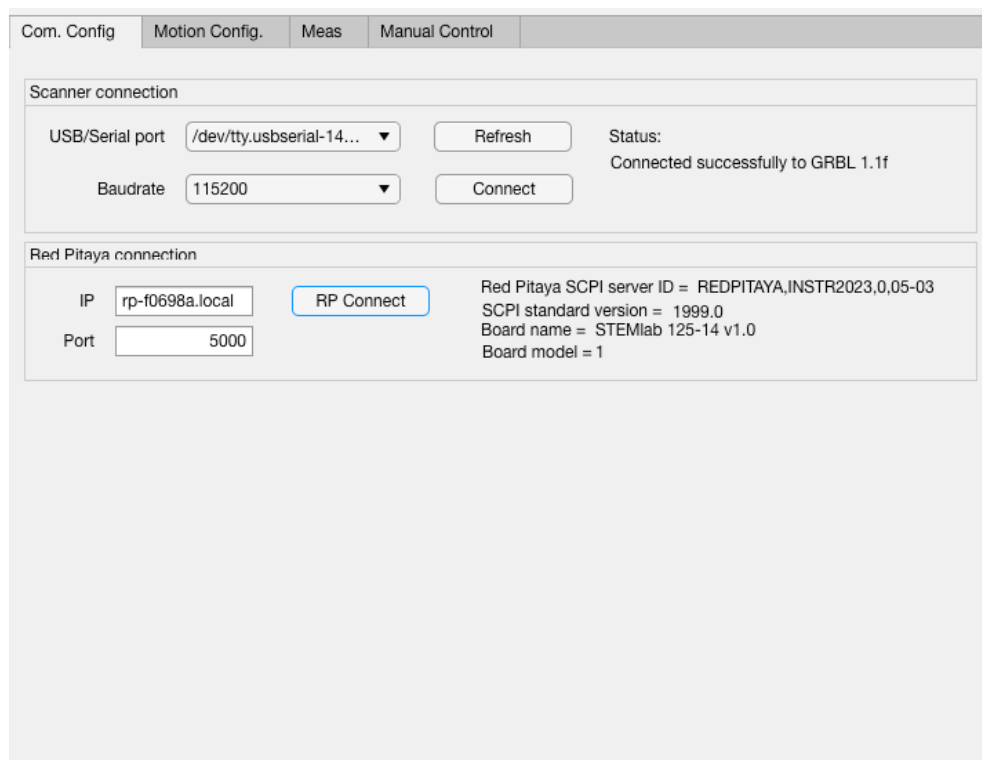


Рис. 3.6. Графічний інтерфейс

На рис. 3.7 представлено панель керування вкладки "Motion Config". Користувач повинен задати область сканування, вказавши максимальні значення по осях Max X і Max Y і бажані кроки в кожному напрямку, а також траєкторію сканування.

Інтерфейс дає змогу користувачеві легко робити вибір між різними траєкторіями сканування за допомогою випадаючого списку. Цей список включає такі опції, як Raster Scan, Column-major Order та Boustrophedon. Траєкторія Boustrophedon (рис. 3.8a) відрізняється тим, що рух сканувального пристрою відбувається у зигзагоподібному порядку, мінімізуючи кількість необхідних змін

напрямку та покращуючи швидкість сканування. Raster Scan траєкторія (рис. 3.8б) є стандартним методом сканування, де сканування виконується рядок за рядком. Column-major Order (рис. 3.8в), у свою чергу, представляє собою метод сканування, де опрацювання даних виконується колонка за колонкою.

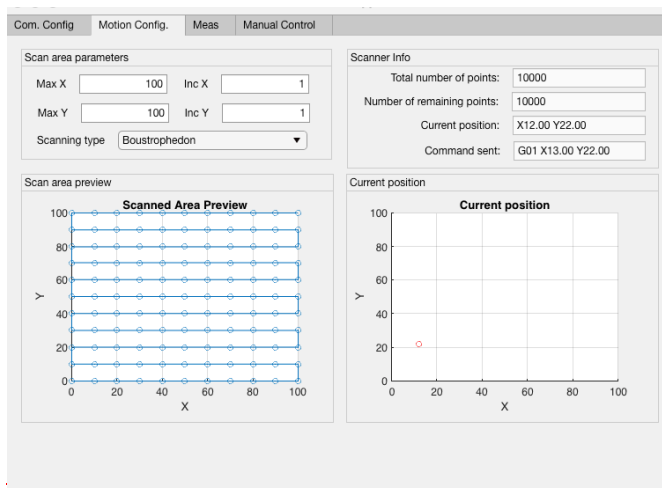


Рис. 3.7. Вкладка конфігурування руху

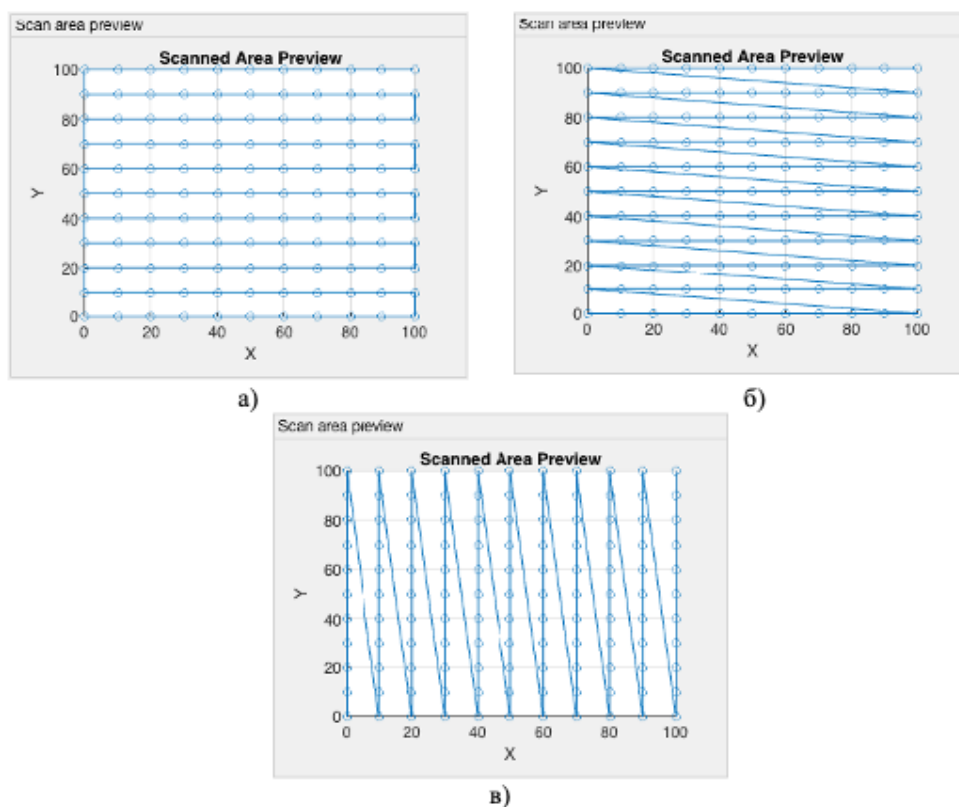


Рис. 3.8. Види траєкторій сканування

На рис. 3.9 показано панель керування вкладки "Meas". У лівій частині панелі розташовані елементи керування для налаштування параметрів, необхідних

для запуску процедури вимірювання. У правій частині представлені результати вимірювань.

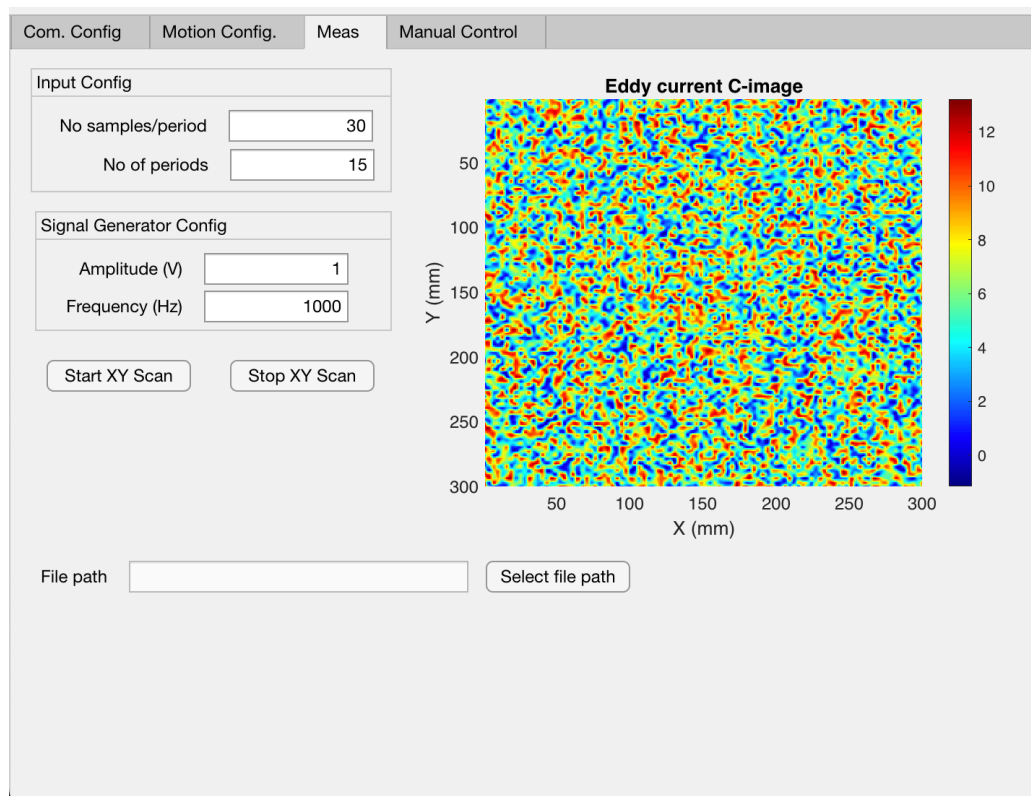


Рис.3.9. Вкладка «Meas»

Перед початком вимірювань задається амплітуда напруги, що генерується генератором сигналу збудження, і параметри збору даних (кількість відліків на період і кількість періодів).

Після встановлення всіх параметрів користувач повинен натиснути кнопку "START XY Scan" для початку вимірювання.

Для того, щоб зберегти вибірку значень вимірюваних сигналів, користувача просять натиснути кнопку Select file path і підтвердити ім'я файлу, який буде містити дані.

Вкладка "Manual Control" (рис. 3.10) забезпечує зручне та ефективне середовище для ручного керування сканером та платформою Red Pitaya. Основні компоненти інтерфейсу, які сприяють цьому процесу: вікна "Terminal Display", "Command Input" та кнопка "Send". Вікно "Terminal Display" відображає відповіді взаємодії між користувачем та сканером, що дає змогу користувачу візуально спостерігати за результатами виконання введених команд. "Command Input"

дозволяє користувачу вводити специфічні команди, які безпосередньо передаються до обладнання.

Сканер розуміє команди написані на мові GCode, що є стандартом для обладнання з ЧПК, а Red Pitaya розуміє SCPI команди, що призначена для роботи з діагностичним та вимірювальним пристроями.

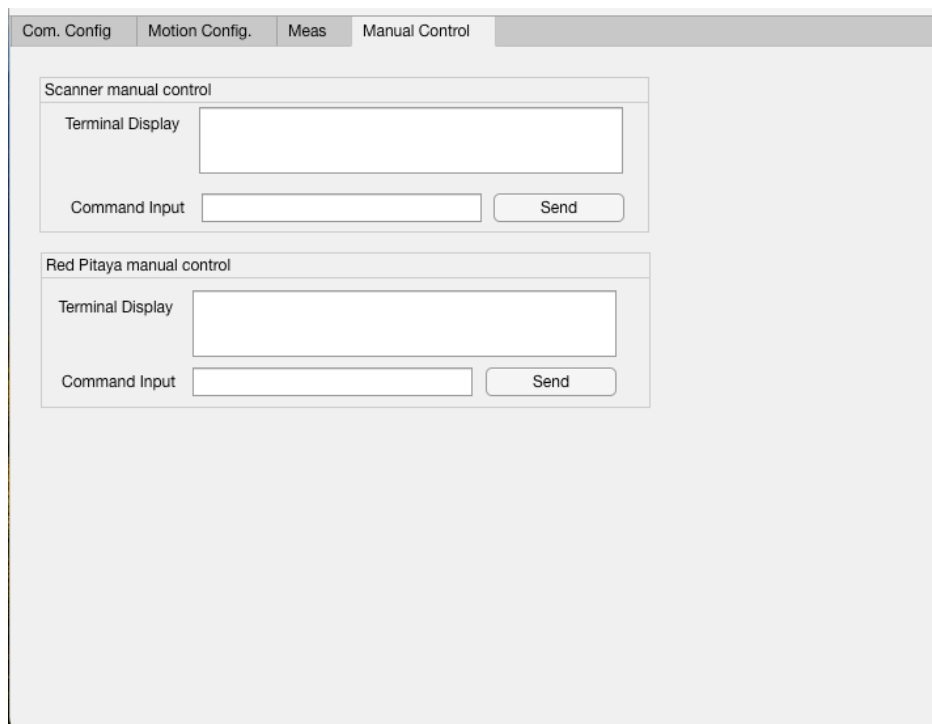


Рис. 3.10. Вкладка «Manual Control»

На рис. 3.11 представлено блок-схему розробленого додатку. На початку роботи системи необхідно вказати порт, до якого підключається сканер та Red Pitaya. Потім необхідно охарактеризувати скановану область і встановити перетворювач у початкове положення. Після цього користувачу необхідно виставити параметри збудження та отримання сигналів, які включають налаштування частоти та амплітуди. По завершенню процесу сканування, на екрані буде відображено С-скан, що надає візуальне представлення сканованої області з виявленими неоднорідностями товщини виробу по його поверхні, або дефектами суцільності матеріалу виробу. Цей скан можна використовувати для первинного аналізу стану виробу.

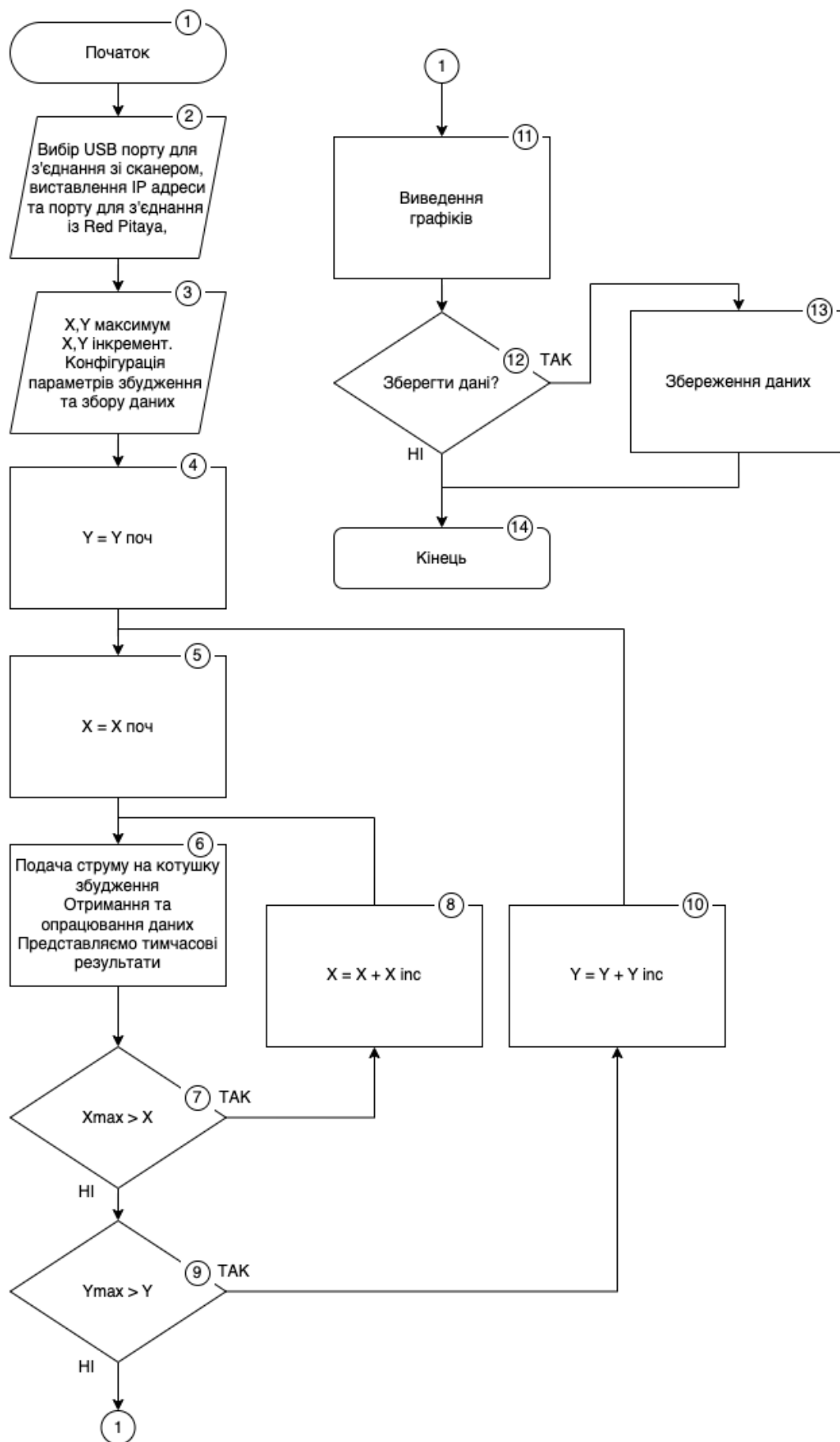


Рис. 3.11. Алгоритм взаємодії оператора із ПЗ системи ВСК

Нарешті, користувач має можливість зберегти отримані сигнали у файл для подальшого детального опрацювання, аналізу та зберігання. Збережені дані можуть бути використані для довгострокового моніторингу стану готового виробу або для порівняльного аналізу з результатами майбутніх сканувань.

3.3. Розроблення конструкції вихрострумового перетворювача матричного типу

Матричний вихрострумний перетворювач відрізняється від традиційних перетворювачів, в першу чергу, своєю унікальною структурою. Він об'єднує в собі декілька окремих ВСП, розташованих у вигляді матриці. Це дає змогу одночасно аналізувати декілька ділянок виробу, забезпечуючи швидкість та надійність процесу контролю.

Основою розробленого ВСМ є плоска спіральна котушка (рис. 3.12). Вона виготовлена за технологією друкованих плат, що забезпечує високу точність та швидкість виготовлення. Суттєвою перевагою котушок такого типу є те, що вони можуть бути максимально наближені до поверхні виробу, за рахунок чого збільшується чутливість перетворювача. Основним обмеженням на їх застосування є певне погіршення локальності контролю та вимога до поверхні об'єкта виробу, – вона повинна бути пласкою чи мати значний порівняно з розмірами котушки радіуси кривизни.

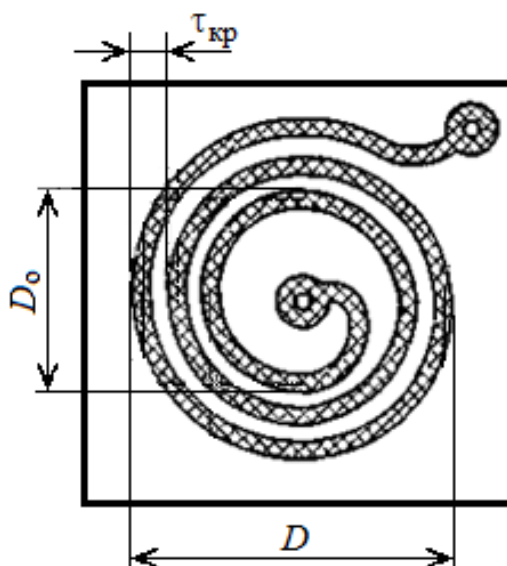


Рис. 3.12. Плоска спіральна котушка: 1 – діелектрична основа, 2 – провідник

Зовнішній діаметр плоскої одношарової котушки може бути визначений по формулі [18]:

$$D = D_0 + 2 \cdot \tau_{\text{кр}} \cdot (N - 1), \quad (3.1)$$

де D_0 – діаметр внутрішнього витка, $\tau_{\text{кр}}$ – крок спіралі, N – кількість витків спіралі.

Індуктивність плоскої спіральної котушки може бути вирахована за формулою [18]:

$$L = 0.025 \cdot D_{\text{ср}} \cdot N^{\frac{5}{3}} \cdot \log \frac{4 \cdot D_{\text{ср}}}{\tau_{\text{кр}}}, \quad (3.2)$$

де середній діаметр витків котушки визначається як $D_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (D_0 + D)$. Це значення і крок спіралі слід підставляти у формули (3.1), (3.2) у сантиметрах, тоді індуктивність L буде виражена в мікрогенрі.

Загальна довжина плоскої котушки у формі спіралі Архімеда може бути розрахована через інтеграл [19]:

$$l = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{\left(\tau_{\text{кр}} \theta + \frac{D_0}{2}\right)^2 + a^2} d\theta, \quad (3.3)$$

де θ_1, θ_2 – діапазон кутів, через які проходить спіраль.

Активний опір плоскої спіральної котушки залежить від її довжини, площі перерізу та матеріалу провідника.

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.4)$$

де ρ – питомий опір матеріалу спіралі (зазвичай це мідь), l – загальна довжина, S – площа перерізу провідника.

Технологія друкованих плат надає додаткові переваги у виготовленні таких перетворювачів. Зокрема, це дозволяє створювати компактні, легкі та надійні конструкції, які можуть бути легко інтегровані в різноманітне обладнання та системи контролю. Крім того, використання друкованих плат забезпечує високий рівень повторюваності характеристик, що є критично важливим елементом виготовлення ВСМ та стандартизації процесів контролю.

Конструкція вихрострумowego перетворювача матричного типу для САК процесу ХФ була розроблена з позицій еволюції. Ця еволюція для створення ВСМ

полягає у використанні матриці 2×2 чутливих котушок (2 по горизонталі та 2 по вертикалі) незалежних котушок. Крок спіралі згідно (3.1) дорівнює

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{D - D_0}{2 \cdot (N - 1)} = \frac{1.25 - 0.175}{2 \cdot 11} \approx 0.048 \text{ см.}$$

Конфігурація розробленого перетворювача матричного типу 2×2 на друкованій платі показано на рис. 3.13.

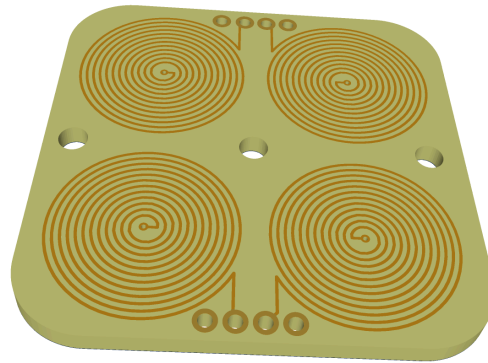


Рис. 3.13. Конфігурація перетворювача матричного типу автоматизованої системи ВСК 2×2 на друкованій платі в масштабі

В розрахунках електричних параметрів котушки геометричні розміри задаються в сантиметрах. Середній діаметр витків котушки складає $D_{\text{ср}} = 0.5 \cdot (D_0 + D) = 0.5 \cdot (0.175 + 1.25) = 0.7125 \text{ см}$, а індуктивність (в мкГн) згідно (3.2) становить

$$L = 0,025 \cdot D_{\text{ср}} \cdot N^{\frac{5}{3}} \cdot \log \frac{4 \cdot D_{\text{ср}}}{\tau_{\text{кр}}} = 0,0253 \cdot 0,71 \cdot 12^{\frac{5}{3}} \cdot \log \frac{4 \cdot 0,71}{0,0486} = 1,996 \text{ мкГн.}$$

Для розрахунку активної складової комплексного опору котушок, які виконуються згідно (3.4), спочатку було визначено довжину l друкованої доріжки. Розрахунки за формулою (3.3), з урахуванням того, що повний кут спіралі перетворювача, з урахуванням 12 витків, склав $\vartheta = 24\pi$, дав значення $l = 0.23 \text{ м}$.

З урахуванням того, що питомий опір міді орієнтовно складає $\rho = 0.018 \text{ Оммм}^2/\text{м}$, значення опору склало $R = 0,591 \text{ Ом}$.

Вимірювання складових опору котушок здійснювалось вимірювачем RLC типу P5030, який має такі основні характеристики:

- діапазон вимірюваних величин:
 R від $5 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^9$ Ом;
 C від $1 \cdot 10^{-14}$ до $2 \cdot 10^{-1}$ Ф;
 L від $1 \cdot 10^{-7}$ до $2 \cdot 10^6$ Гн;
- значення основної похибки вимірювання на основних діапазонах – 0,25%;
- час одного вимірювання на будь-якому діапазоні вимірювань – менше 0,1 с;
- час автоматичного вибору діапазону вимірювань не перевищує 0,1 с при частоті 1 кГц і 1 с – при частоті 0,1 кГц.

За результатами вимірювань середнє значення активного опору склало $\sim 0,602$ Ом, а його середнє квадратичне відхилення $\sim 0,029$ Ом. Для індуктивності відповідні показники дорівнювали $\sim 1,975$ Гн та $\sim 0,050$ Гн.

Результати вимірювання складових опору наведені у таблиці 3.3.

Для більш наочного оцінювання варіацій опору та індуктивності елементів матриці проведено аналіз модулів і аргументів їх комплексного опору $\dot{z}_g = R_g + i2\pi fL_g$ на частоті $f=20$ кГц.

Табл. 3.3. Параметри котушок параметричного ВСМ з матрицею елементів 2×2

№ котушки	Активний опір R_g , Ом	Індуктивність L_g , мкГн
1	0,60	1,9
2	0,57	2,0
3	0,60	2,0
4	0,64	2,0

Для даних табл. 3.3 результати розрахунків модулів $|\dot{z}_g|$ та аргументів $\arg(\dot{z}_g)$ комплексних опорів $\dot{z}_g$, а також відносні відхилення цих показників від їх середніх значень наведено у таблиці 3.4.

Табл. 3.4. Модулі і аргументи комплексних опорів котушок параметричного ВСМ з матрицею елементів 2×2

g	R_g , Ом	$2\pi fL_g$, мкГн	$ \dot{z}_g $, Ом	$\gamma_{g,m}$, %	$\arg(\dot{z}_g)$, рад	$\gamma_{g,a}$, %
1	0,60	0,2388	0,6458	-0,9	0,787	-3,2
2	0,57	0,2513	0,6229	-4,4	0,4153	6,2
3	0,60	0,2513	0,6505	-0,18	0,3967	1,4
4	0,64	0,2513	0,6876	5,5	0,3742	-4,4

З даних таблиці 3.4. видно, що розкид відносних відхилень значень модуля і аргумента комплексного опору елементів ВСМ охоплює інтервали величиною $\sim 10\%$. І на вищих робочих частотах ці значення, за такої ж точності параметрів комплексного опору елементів ВСМ, будуть тільки збільшуватись. Це вказує на доцільність і необхідність виконання процедури вирівнювання (нормалізації) сигналів від різних елементів ВСМ, які знаходяться в однакових умовах.

Запропонована структура перетворювача матричного типу автоматизованої системи ВСК є загальною і можливі і інші конфігурації, наприклад, $N \times M$ приклади яких зображені на рис. 3.14 в,г.

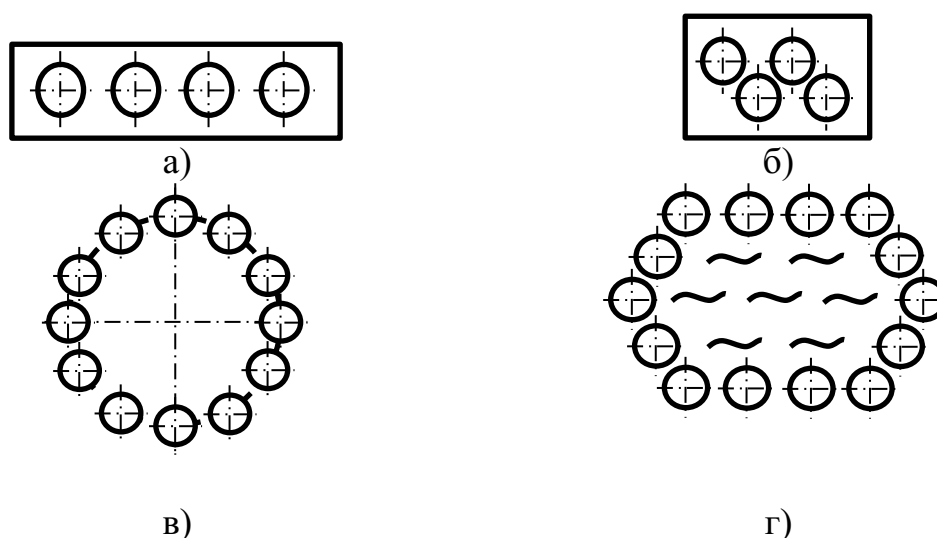


Рис. 3.14. Просторове розташування вихрострумів перетворювачів у ВСМ.

Для розробленого ВСМ на 3D-принтері був надрукований переносний корпус датчика перетворювача матричного типу (рис. 3.15).

На рис. 3.15 показано прототип перетворювача матричного типу автоматизованої системи вихрострумового контролю 2×2 на друкованій платі з електронікою, що прикріплена до корпусу. У корпусі датчика перетворювача матричного типу для автоматизованої системи ВСК інтегровано додаткову електронну плату. Ця плата включає попередні підсилювачі та мультиплексор, що розширює її функціональні можливості.

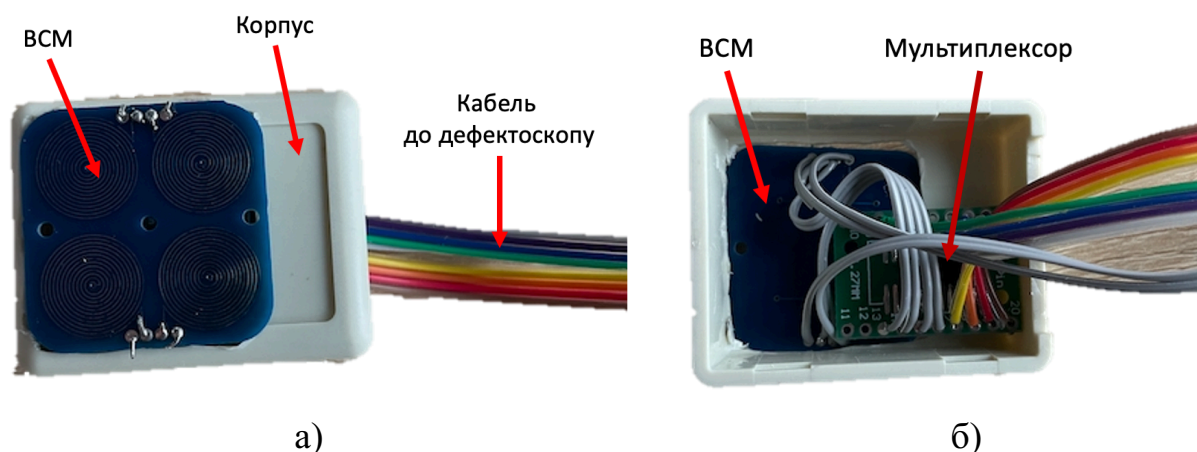


Рис. 3.15. Загальний вигляд датчика перетворювача матричного типу: а – корпус датчика; б – вид датчика зверху зі знятою кришкою

На рис. 3.16 показано корпус датчика перетворювача матричного типу автоматизованої системи ВСК, створений за допомогою технологій 3D-моделювання. Корпус був розроблений використовуючи програмний пакет Autodesk 360, що дозволило досягти високого рівня точності та адаптивності дизайну.

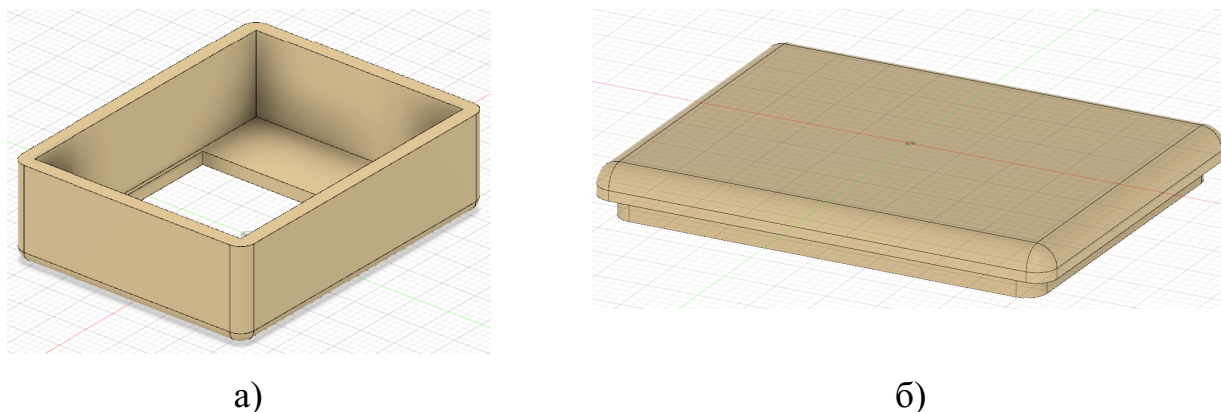


Рис. 3.16. Модель корпусу: а – корпус, б – кришка корпусу.

Програма Autodesk 360 надала можливість детально відтворити всі необхідні елементи корпусу, оптимізувавши його конструкцію та забезпечивши ергономічність та міцність. Після завершення процесу моделювання, корпус був виготовлений за допомогою 3D-принтера, що дозволило швидко та ефективно реалізувати проект у фізичному вигляді. Цей підхід не лише спрощує процес виготовлення, але й забезпечує високу гнучкість у внесенні змін та адаптації дизайну під специфічні потреби системи ВСК.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено прототип автоматизованої системи ВСК з ВСМ для використання в САК процесу ХФ і відповідає актуальним вимогам промисловості та науки. Ця система дає змогу формувати керувальні впливи для зупинки процесу травлення, використовуючи результати прецизійного визначення товщини виробу під час технологічного процесу.

2. В результаті експериментальних досліджень виготовлених за технологією друкованих плат чутливих елементів ВСМ у вигляді плоских котушок у виді спіралі Архімеда встановлено, що розкид відносних відхилень параметрів котушки коливається в межах інтервалів $\sim 10\%$. Це вказує на доцільність і необхідність виконання процедури вирівнювання (нормалізації) сигналів від різних елементів ВСМ, які знаходяться в однакових умовах.

3. Розроблено вискоєфективну апаратну частину засобу ВСК, яка виконує швидке та ефективне опрацювання сигналів ВСМ. Вона включає сучасні компоненти та модулі, що забезпечують стабільність роботи системи в різних умовах.

4. Запропонована архітектуру програмного забезпечення автоматизованого засобу ВСК, яке реалізує ряд алгоритмів опрацювання та аналізу даних і орієнтована на використання в САК процесу ХФ.

5. Розроблено вихрострумний перетворювач матричного типу з чутливими елементами у вигляді плоскої спіральної котушки, виготовленій за технологією друкованих плат. Конструкція перетворювача забезпечує високу чутливість до товщини виробу в процесі ХФ, а також забезпечує широкі можливості для його інтеграції в інші вихрострумові системи керування та контролю.

Список використаних джерел до розділу 3

1. Левченко О.Е. Використання платформи Red Pitaya в технології прототипування автоматизованих систем вихрострумowego контролю // Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ, Вип. 66(2), (2023), с. 43-51.
2. Левченко, О. Е. Застосування платформи Red Pitaya в автоматизованих системах вихрострумowego неруйнівного контролю / Левченко О. Е., Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю. // XXII Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи”, 16 – 17 травня 2023 р., Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – С. 270-272.
3. Левченко О.Е. Використання матричних вихрострумowych перетворювачів площинного типу у системах автоматизованого неруйнівного контролю // XX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник матеріалів конференції. – Київ, Україна. – 18 - 19 травня 2021. – С.129.
4. Analysis of normative documentation on the use of array eddy current probes / Lysenko I., Mirchev Y., Kuts Y., Levchenko O. // XXII Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи”, 16 – 17 травня 2023 р., Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – С. 267-269.
5. Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Левченко О.Е. Імпульсний вихрострумовой контроль із застосуванням багатоелементних перетворювачів // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник матеріалів конференції. – Київ, Україна. – 17 - 18 травня 2022. – С.207-209.
6. Lysenko I., Kuts Y.,Mirchev Y., Levchenko O. Reviewing challenges in the application of eddy current arrays and their impact on NDT efficiency // 16-та Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2023)». – Київ, Україна. – 23-24 травня 2023.– С. 91-92.

7. H.Bagheri, J.Garcia, A.Sadeghi, S.Malek та N.Medvidovic, “Software architectural principles in contemporary mobile software: from conception to practice”, *J. Syst. Softw.*, т. 119, с. 31–44, верес. 2016.
8. A.Alreshidi та A.Ahmad, “Architecting Software for the Internet of Thing Based Systems”, *Future Internet*, т. 11, № 7, с. 153, лип. 2019.
9. A.Ahmad, P.Jamshidi та C. Pahl, “Classification and comparison of architecture evolution reuse knowledge-a systematic review”, *J. Softw.: Evolution Process*, т. 26, № 7, с. 654–691, лют. 2014.
10. M.Fowler, *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Pearson Educ., Limited, 2018.
11. A. Vazquez-Ingelmo, A. Garcia-Holgado та F. J. Garcia-Penalvo, “C4 model in a Software Engineering subject to ease the comprehension of UML and the software”, у 2020 IEEE Global Eng. Educ. Conf. (EDUCON), Porto, Portugal, 27–30 квіт. 2020. IEEE, 2020. Дата звернення: 12 верес. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/educon45650.2020.9125335>
12. S. C. Chapra, *Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists*, 3-тє вид. New York: McGraw-Hill, 2012.
13. Лазарєв, Ю. Ф. Моделювання на ЕОМ [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Ю. Ф. Лазарєв ; НТУУ «КПІ». - Електронні текстові дані (1 файл: 13,76 Кбайт) - Київ : НТУУ «КПІ», 2003.
14. Лазарєв Ю. Ф. Початки програмування у середовищі MatLAB [Текст] : навч. посібник для студ. вищих техн. навч. закл. / Ю. Ф. Лазарєв – К.: НТУУ «КПІ», 2003. – 424 с.
15. “GUI development”, у *MATLAB Primer*, Eighth Edition. CRC Press, 2010, с. 209–210.
16. S. T. Smith, *MATLAB Advanced GUI Development*. Dog Ear Publ., LLC, 2006.
17. “Graphics and GUI”, у *Accelerating MATLAB Performance*. Chapman Hall/CRC, 2014, с. 552–619.
18. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоаппаратуры. Учебник

для радиотехнич. спец. техникумов. - М.: Высшая школа, 1989. - 463 с.

19. “Length of an Archimedean Spiral - Interactive Mathematics”. Interactive Mathematics - Mathematics, learning, computing, travel - and whatever... Дата звернення: 25 листоп. 2023. [Онлайн]. Доступно:

<https://www.intmath.com/blog/mathematics/length-of-an-archimedean-spiral-6595>

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВСК З МАТРИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В САК ПРОЦЕСУ ХФ

Теоретичні та модельні дослідження, представлені в попередніх розділах, підкреслили важливість і потенціал використання перетворювачів матричного типу в САК процесу ХФ. Ці дослідження вказали на можливість підвищення надійності та ефективності засобів ВСК для систем керування ТП завдяки оптимізації амплітудно-фазових характеристик сигналів ВСМ та використанню запропонованого методу опрацювання сигналів ВСМ.

В цьому розділі розглянуто шляхи удосконалення технології ВСК на основі матричних перетворювачів за рахунок нормалізації комплексних коефіцієнтів передачі вимірювальних каналів формування сигналів окремих перетворювачів в складі ВСМ. Представлено методику та алгоритм нормалізації, розглянуто варіанти автоматичних система нормалізації коефіцієнтів передачі вимірювальних каналів з використанням фільтра Гільберта та синхронних детекторів, висвітлено питання оцінювання невизначеності результату вимірювання товщини виробу та ефективності використання ВСМ в САК процесу ХФ.

Основні результати даного розділу опубліковано в роботах [6,10].

4.1 Методика нормалізації каналів засобів ВСМ в САК ХФ

Концепція формування та опрацювання сигналів ВСМ, що представлена у розділі 2, базується на детальному аналізі системи "ВСМ - ОК ". В результаті виконаного дослідження було виявлено, що для отримання адекватних результатів оцінювання параметрів сигналів ВСМ при гармонійному синфазному збудженні її елементів необхідно враховувати не тільки варіації коефіцієнтів передачі аналогових частин вимірювальних каналів опрацювання сигналів ВСМ, але й власне варіації коефіцієнтів передачі окремих перетворювачів у ВСМ, які можуть відрізнятись і приводити до розбіжностей амплітудних і фазових характеристик каналів. Останнє є особливо важливим з огляду на використання у АСКТП ХФ фазового методу вимірювання, який передбачає перетворення

товщини виробу у фазовий зсув сигналів. Ця особливість вимагає специфічного підходу до реалізації апаратно-програмної частини САК з технологією матричного ВСК. Розроблена багатовимірна модель сигналів ВСК, яка включає в себе варіації амплітудних та фазових характеристик окремих перетворювачів дає змогу запропонувати технічні рішення для подолання цієї проблеми.

Неідентичність елементів ВСК є важливим аспектом взаємодії перетворювача з виробом. Більше того, кожен канал вихрострумowego приладу, як сукупність елементу матриці та засобів аналогового оброблення сигналів, має свої власні характеристики, які можуть відрізнятися через недосконалість технології виготовлення ВСК чи варіації характеристик електронних компонентів вимірювальних каналів. Ця неідентичність призводить до того, що за однакових умов збудження різні канали ВСК можуть формувати різні за своїми параметрами внесені напруги як відгуки на однакові збурення. Така різниця у внесених напругах кожного каналу може спричинити небажані варіації параметрів вихідних сигналів ВСК, що, в свою чергу, може викликати некоректне формування керувальних впливів в САК процесу ХФ.

Враховуючи цей факт, перед тим, як почати процес хімічного фрезерування, необхідно виконати процедуру нормалізації [1]. Нормалізація дає змогу зробити ідентичними коефіцієнти передачі вимірювальних каналів, забезпечуючи однорідність формування і передачі внесеної напруги.

Алгоритм нормалізації каналів ВСК для отримання скорегованих коефіцієнтів передачі кожного каналу представлений на рис. 4.1.

Алгоритм нормалізації полягає у наступному.

1. Підготовка системи до роботи, яка полягає у встановленні ВСК на ділянку виробу з певною товщиною.
2. Аналого-цифрове перетворення сигналу g -того елемента матриці.
3. Зберігання цифрових даних отриманого сигналу в оперативній пам'яті.
4. Повторення п.2 ,3 для всіх G елементів матриці.
5. Виконання ДПГ для формування вибірок параметрів сигналів.

6. Обчислення обвідної (2.20) і різниці фазових характеристик сигналів в каналах ВСМ (2.22).
7. Обчислення поправок згідно з виразами (2.23), (2.24) для коригування амплітуд і фаз сигналів в каналах ВСМ.
8. Збереження обчислених поправок в пам'яті системи для подальшого використання в процесі керування технологічним процесом.



Рис. 4.1. Графічне представлення алгоритму нормалізації каналів ВСМ

Порядок опрацювання сигналів ВСМ ілюструє рис. 4.2.

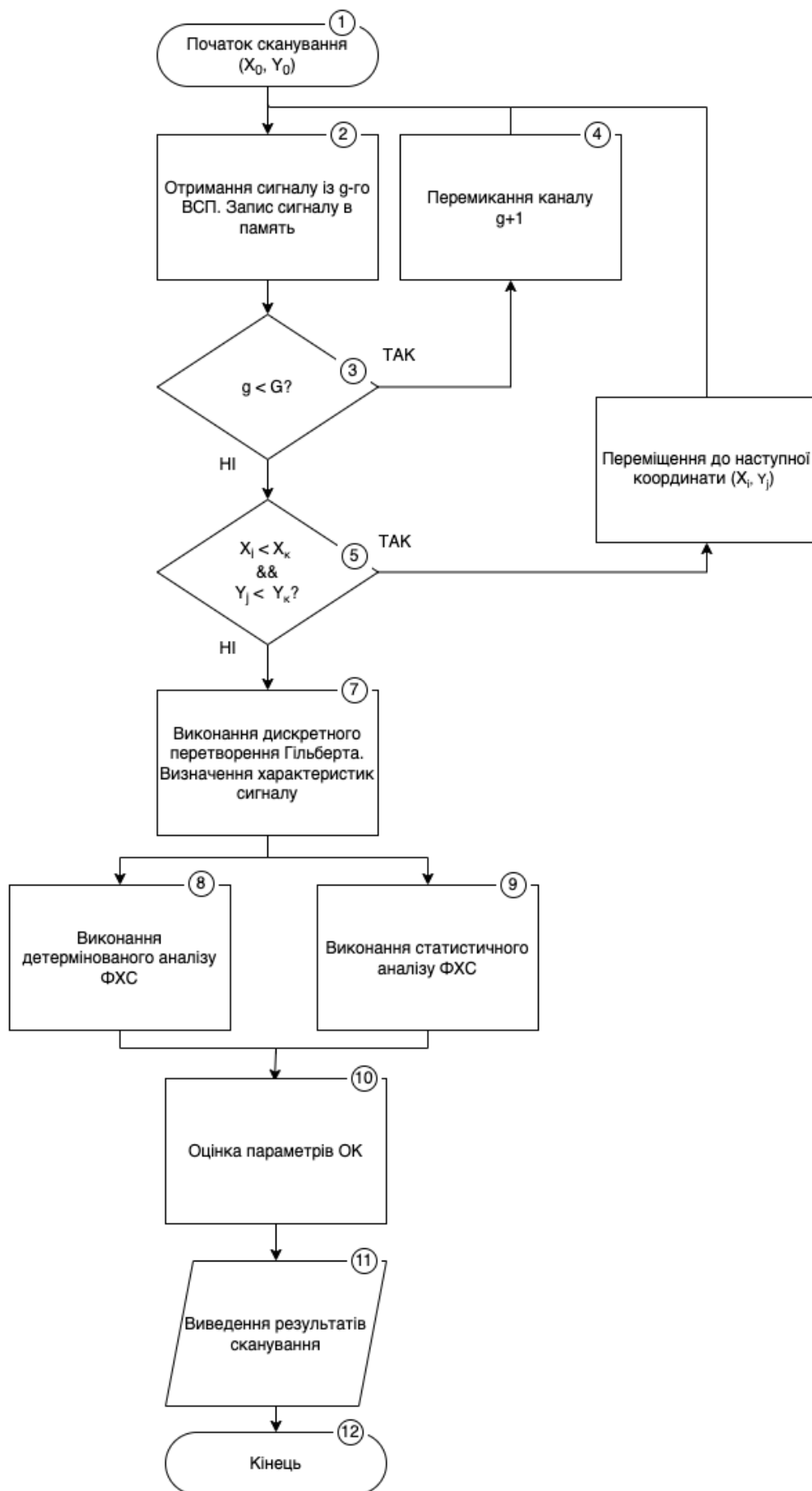


Рис. 4.2. Умовне графічне зображення алгоритму опрацювання сигналів ВСМ

Процес опрацювання та аналізу характеристик інформаційних сигналів ВСМ полягає у наступному:

- 1) Ініціалізація системи. Підготовка ОК та ВСМ до роботи.
- 2) Отримання сигналів ВСМ в процесі керування. Зчитування сигналу з кожного перетворювача ВСМ.
- 3) Зберігання цифрових даних отриманого сигналу в оперативній пам'яті разом з його координатами (x, y) для подальшого аналізу.
- 4) Визначення гільберт-образу сигналів кожного перетворювача ВСМ:

$$\tilde{u}_g[j, h, x, y] = \mathbf{H}_d(u[j, h, x, y]), \quad j = \overline{1, J}, \quad x, y \in Q, \quad (4.1)$$

де Q – область контрольованої ділянки ОК, та вторинних інформаційних ознак.

- 4.1) Визначення дискретних функцій – обвідної та фази сигналів ВСМ

$$U_g[j, h, x, y] = \sqrt{u_g^2[j, h, x, y] + \tilde{u}_g^2[j, h, x, y]}, \quad j = \overline{1, J}, \quad x, y \in Q, \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \Phi_g[j, h, x, y] = & \arctg \frac{\tilde{u}_g[j, h, x, y]}{u_g[j, h, x, y]} + \\ & + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sign} \tilde{u}_g[j, h, x, y] (1 + \text{sign} u_g[j, h, x, y]) \right\} + \\ & + \mathbf{L}(\tilde{u}_g[j, h, x, y], u_g[j, h, x, y]), \quad j = \overline{1, J}, \quad x, y \in Q \end{aligned} \quad (4.3)$$

- 4.2) Визначення різниці фазових характеристик сигналів згідно з (2.22).

- 4.3) Усереднення на колі отриманих різниць фазових характеристик сигналів.

- 4.4) Повторення п. 4.1 - 4.3 для всіх G елементів матриці.

- 5) Визначення стану ОК на основі порівняння поточного і заданого значень товщини виробу, за досягнення їх рівності – формування сигналу зупинки процесу травлення.

- 6) Візуалізація отриманих результатів.

Розроблені алгоритм нормалізації каналів ВСМ та методика опрацювання експериментальних даних спрямовані на виконання аналізу параметрів сигналів ВСМ в ході реалізації процесу керування технологічним процесом. Використання

процедури нормалізації дає змогу підвищити консистентність отриманих даних і формування сигналу керування.

4.2. Автоматизована система нормалізації вимірювальних каналів ВСМ з використанням фільтра Гільберта

Комплексні коефіцієнти передачі вимірювальних каналів систем автоматизованого ВСК на основі ВСМ потребують періодичного калібрування. Це пов'язано з тим, що ці коефіцієнти можуть відрізнитись як внаслідок недосконалості виготовлення ВСМ, такі і внаслідок зміни температури навколишнього середовища, зміни температури електронної частини вимірювальних каналів та старіння аналогових електронних компонентів вимірювальних каналів тощо. Відсутність калібрування може призвести як до помилок визначення параметрів ОК, та і до помилок в системах керування технологічними процесами.

В розділі 2 розглянуто модель сигналів ВСМ, вказано на необхідність вирівнювання амплітудно-частотної і фазочастотної характеристик окремих ВСП у складі ВСМ, а у випадку роботи на фіксованій частоті – коригування коефіцієнтів підсилення і фазового зсуву сигналів. В цьому розділі розглянуто виконання цих процедур за допомогою автоматизованої системи калібрування коефіцієнтів передачі елементів ВСМ з використанням фільтра Гільберта.

Ідея методу нормалізації полягає в тому, що один з елементів ВСМ визначається як опорний, що формує при його встановленні на бездефектну ділянку ОК опорний сигнал, а коефіцієнти передачі і фазовий зсув сигналів решти елементів ВСМ при встановленні на таку саму бездефектну ділянку підлаштовуються до параметрів опорного сигналу. Структура автоматизованої системи калібрування комплексних коефіцієнтів передачі двох каналів ВСМ представлена на рис. 4.3.

На рис. 4.3 позначено: ФГ – фільтр Гільберта, Д – дільник напруги, КД – керований дільник напруги, А – блок визначення амплітуди сигналу, Ф – блок визначення фази сигналу, Σ – суматор, СА – пристрій визначення середнього

арифметичного, СК – пристрій визначення середнього кругового, О – обчислювач. В схемі на рис. 4.10 входними сигналами є дискретні послідовності $u'_1[j]$ і $u_g[j]$. В якості опорного сигналу використано $u'_1[j]$. Задача керування полягає в тому, щоби отримати однакові по амплітуді і фазі сигнали від ідентичних ділянок ОК.

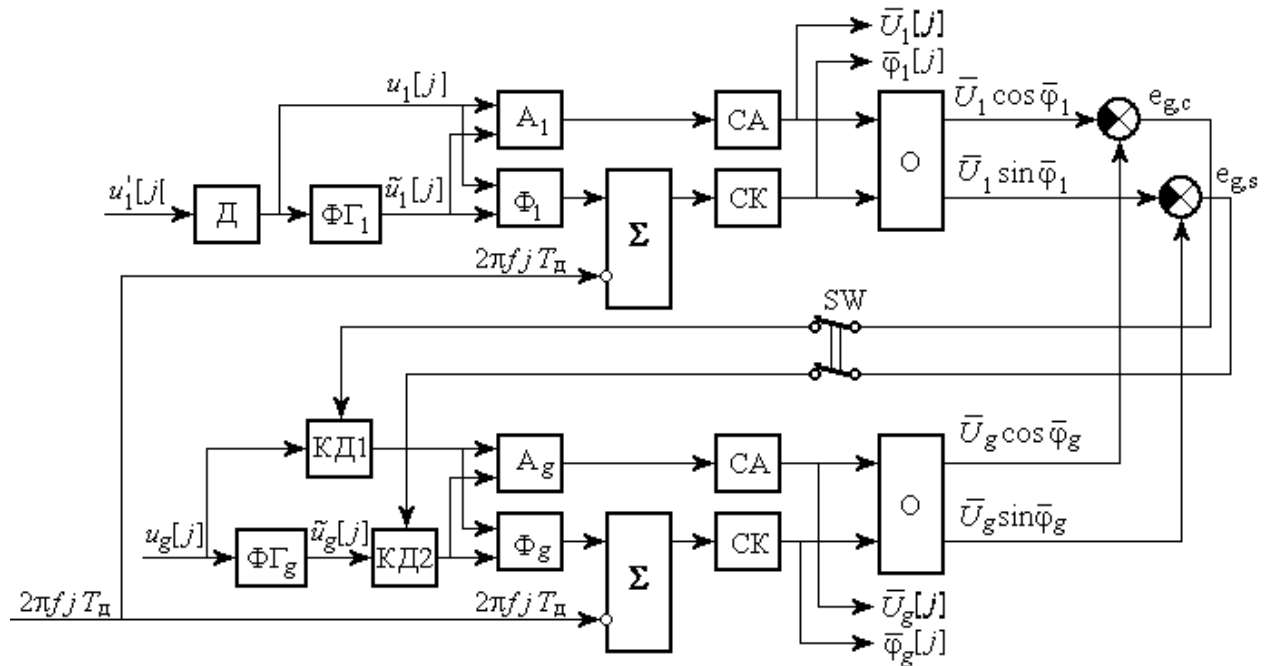


Рис. 4.3. Структура автоматизованої системи калібрування каналів ВСМ з використанням фільтра Гільберта

При розробленні схеми враховано наступні міркування.

1. Оскільки використання традиційних фазообертачів, які містять реактивні елементи, є недоцільним в прецизійних широкосмугових системах вимірювання та керування (їх комплексні коефіцієнти передачі залежать від частоти), в запропонованій структурі використано керування квадратурними компонентами сигналів за допомогою керуючих елементів у виді керованих діляників напруги.

2. Керування квадратурними компонентами сигналів відбувається за рахунок їх зменшення керованими діляниками напруги, які не вносять додаткові фазові зсуви в квадратурні сигнали. З цією метою в опорний канал введено діляник напруги з коефіцієнтом передачі $k_d = 0,7 \dots 0,9$.

Схема працює наступним чином. Опорним сигналом є послідовність $u_1[j] = k_d \cdot u'_1[j]$, її квадратурна складова $\tilde{u}_1[j]$ формується фільтром Гільберта ФГ₁. Послідовності $u_1[j]$ та $\tilde{u}_1[j]$ надходять на обчислювач А₁ поточних значень амплітуди сигналу $U_1[j]$ і обчислювач Ф₁ поточних значень фази сигналу $\Phi_1[j]$, які реалізують ці операції згідно формул (2.19), (2.20). Суматор Σ включений в схему для вилучення з фази сигналу неінформативного лінійного тренду $2\pi f T_d$ і отримання фазового зсуву сигналу $u_1[j]$ відносно віртуального гармонічного сигналу з частотою сигналу-носія, тобто отримання згідно з (2.21) послідовності $\varphi_1[j] = \Phi_1[j] - 2\pi f T_d$. З метою зменшення впливу шумової складової на кінцеві результати вимірювання в структуру системи на рис. 4.9 введено пристрої визначення середнього арифметичного СА і середнього кругового СК. Вони виконують відповідно усереднення послідовностей $U_1[j]$ і $\varphi_1[j]$ і формують на своїх виходах відповідні усереднені значення $\bar{U}_1$ і $\bar{\varphi}_1$. Ці значення, по-перше, є вихідними сигналами першого каналу, по-друге, використовуються як опорні для автоматизованого керування комплексними коефіцієнтами передачі рештки каналів ВСМ. З цією метою обчислювач О формує квадратурні компоненти $\bar{U}_1 \cos \bar{\varphi}_1$ та $\bar{U}_1 \sin \bar{\varphi}_1$, які власне і використовуються в процесі регулювання коефіцієнтів передачі каналів системи як опорні значення.

Оброблення сигналів $u_g[j]$ в цілому відбувається в аналогічний спосіб з тією різницею, що сигнали $u_g[j]$ і $\tilde{u}_g[j]$ проходять через керовані ділянки напруги КД1 та КД2, для яких управляючими є сигнали помилок

$$e_{g,c} = \bar{U}_g \cos \bar{\varphi}_g - \bar{U}_1 \cos \bar{\varphi}_1, \quad g = \overline{1, G}, \quad (4.4)$$

$$e_{g,s} = \bar{U}_g \sin \bar{\varphi}_g - \bar{U}_1 \sin \bar{\varphi}_1, \quad g = \overline{1, G}. \quad (4.5)$$

Після завершення калібрування ключ SW розмикається і система переходить в робочий режим – режим контролю.

Наведену на рис. 4.3 автоматизовану систему калібрування каналів ВСМ доцільно використовувати в цифрових системах, призначених для роботи з інформаційними сигналами, що можуть задаватись в широкій смузі частот.

4.3. Автоматизована система нормалізації каналів ВСМ з використанням синхронних детекторів

Варіант структури автоматизованої системи нормалізації каналів ВСМ з використанням синхронних детекторів представлена на рис. 4.4.

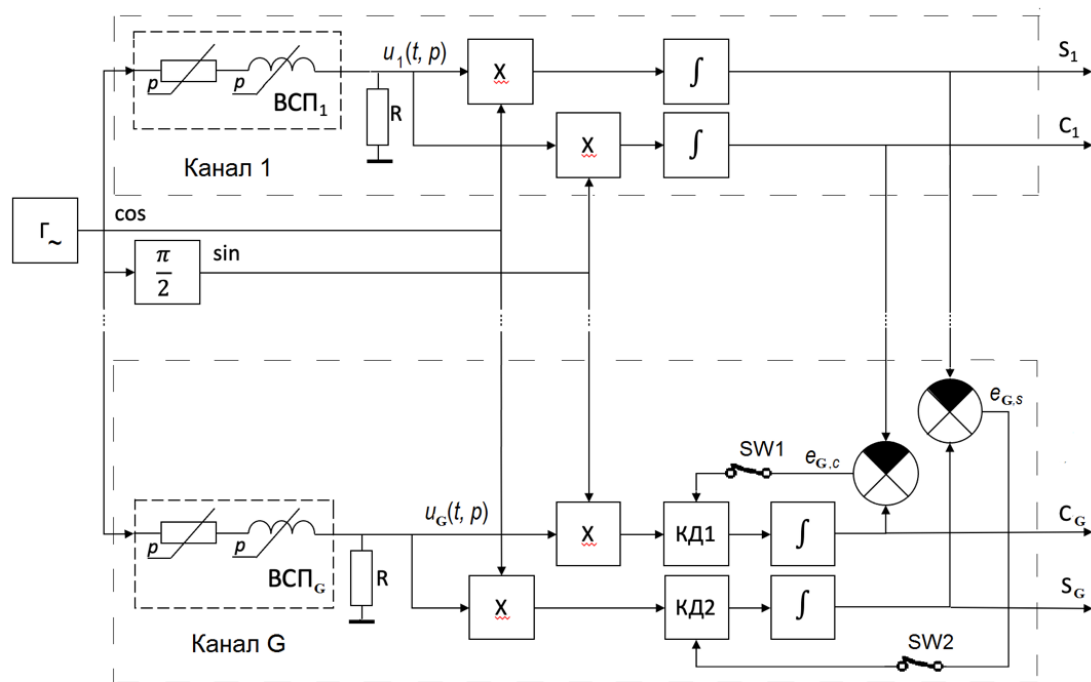


Рис. 4.4. Структура автоматизованої системи керування комплексними коефіцієнтами передачі каналів ВСМ з використанням синхронних детекторів

Схема орієнтована на роботу з аналоговими сигналами фіксованої частоти. Синхронні детектори утворені послідовно включеними перемножувачами «х» та інтеграторами « $\int$ ». Такі детектори широко використовуються у прецензійних вимірюваннях параметрів періодичних сигналів низького рівні, які спостерігаються на фоні значних шумів [2].

Для кращого розуміння принципу роботи системи в структуру включено і елементи формування інформаційних сигналів – генератор змінного струму $\Gamma_{\sim}$ та матрицю параметричних вихрострумів перетворювачі $ВСП_1 \dots ВСП_G$ (на схемі вказано залежність складових опорів ВСП від параметра p об'єкту керування).

ВСП разом з резисторами R утворюють ділянки напруги, які формують сигнали змінної напруги $u_g(t, p)$, $g = \overline{1, G}$.

Внаслідок впливу ОК на ВСП змінюється його комплексний опір, отже амплітуда і початкова фаза сигналів $u_g(t, p)$, $g = \overline{1, G}$. Опорними для синхронних детекторів є квадратурні гармонічні сигнали, зсунуті по фазі на кут 90° за допомогою фазообертача $\frac{\pi}{2}$. Синхронні детектори формують квадратурні компоненти сигналу $C_g(p)$, $S_g(p)$, $g = \overline{1, G}$, які вподальшому можна використати для оцінювання амплітуди і початкової фази сигналів

$$U_g = \sqrt{C_g^2(p) + S_g^2(p)}, \quad g = \overline{1, G} \quad (4.6)$$

$$\varphi_g(p) = \text{Arctg} \frac{S_g(p)}{C_g(p)}, \quad g = \overline{1, G}. \quad (4.7)$$

Під час калібрування всі ВСП встановлюються на бездефектну ділянку ($p = \text{const}$, або навіть $p = 0$), ключі $SW1$ та $SW2$ замкнені. Процедура калібрування загалом виконується аналогічно, як і для схеми на рис. 4 10.

4.4. Оцінювання невизначеності результату вимірювання товщини виробу та ефективності використання ВСМ в АСКТП ХФ

Загальні питання оцінювання невизначеності результатів вимірювань розглянуті в роботах [3,4]. Оцінюючи невизначеність вимірювання товщини виробів в розробленій АСКТП ХФ приймемо до уваги наступні міркування.

Визначення товщини виробу відбувається за результатами вимірювання фазових зсувів сигналів, отже вихідною статистикою для опрацювання даних є вибірка фазових зсувів сигналів $(\varphi_j, j = \overline{1, J})$, $\varphi_j \in [0, 2\pi)$.

Похибка результатів вимірювання фазових зсувів сигналів не містить систематичної складової, яка компенсується на етапі нормування вимірювальних каналів системи (тобто не скомпенсоване значення цієї складової може бути зведено до нехтовно малої величини).

Домінуючою складовою випадкової похибки визначення фазових зсувів сигналів є похибка квантування миттєвих значень напруги, які перераховуються у фазові зсуви через функцію $\arctg$ (4.3). В системі передбачено використання АЦП з кількістю двійкових розрядів 14, що дає змогу визначати миттєві значення напруг з відносною похибкою $1/4096$ (з урахування 13 двійкових розрядів на інтервал peak-to-peak). Це наближено відповідає середньому квадратичному відхиленню (СКВ) вимірювання фазових зсувів $\sim 0,12^\circ$ [5]. В розрахунках невизначеності використаємо значення СКВ одного вимірювання $\sigma_1 = 0,3^\circ$ (тобто з коефіцієнтом запасу $\sim 2,5$).

При оцінювання невизначеності даних фазових вимірювань врахуємо специфіку їх статистичного опрацювання як розподілених на колі випадкових кутових величин, яка розглянута в роботах [5,6].

Ймовірнісна модель вимірювального експерименту з випадковими фазовими зсувами сигналів, який передбачає проведення серії J незалежних вимірювань, задається у вигляді випадкового вектора [5]

$$\Psi(\omega) = (\psi_1(\omega), \dots, \psi_J(\omega)), \quad \omega \in \Omega, \quad (4.8)$$

де ω – елементарна подія з області подій Ω , $\psi_j(\omega)$ – випадкові фазові зсуви сигналів з областю значень $[0, 2\pi)$, які вважаються незалежними і мають однакові розподіли щільності ймовірностей Мізеса $p_M\left(\frac{\theta}{\mu}, k\right)$, $\theta \in [0, 2\pi)$

$$p_M(\theta/\mu, k) = \frac{1}{2\pi I_0(k)} \exp\{k \cos(\theta - \mu)\}, \quad |\mu| < \infty, \quad k > 0, \quad (4.9)$$

де $I_0(k)$ – модифікована функція Бесселя першого роду і нульового порядку, μ – параметр положення; k – параметр концентрації випадкового кута в околі μ .

Сумісний розподіл щільності ймовірності випадкового вектора $\Psi(\omega)$ визначається виразом

$$p_M\left(\theta_1, \dots, \theta_J / \mu, k\right) = \prod_{j=1}^J p_M\left(\theta_j / \mu, k\right), \quad \theta_j \in [0, 2\pi). \quad (4.10)$$

З теорії статистичного аналізу фазових даних відомо [5], що найбільш правдоподібною оцінкою параметра μ є середнє кругове значення, а найбільш правдоподібна оцінка параметра k визначається як розв'язок рівняння

$$I_1(k)/I_0(k) = r. \quad (4.11)$$

де r – середня довжина результуючого вектора.

Наближене значення параметра k у випадку $r > 0.8$ обчислюють згідно виразу

$$k = \frac{1}{2(1-r) - (1-r)^2 - (1-r)^3}. \quad (4.12)$$

Спираючись на результати робіт [5,6] та наведені в табл. 2.2 п.2.5.2. розрахункові формули вибірових кругових статистик представимо методику оцінювання невизначеності (за типом А) результатів вимірювання товщини виробу наступною послідовністю дій.

1. Розрахунок сум C та S за формулами $C = J^{-1} \sum_{j=1}^J \cos \varphi_j$, $S = J^{-1} \sum_{j=1}^J \sin \varphi_j$.

2. Розрахунок вибіркового кругового середнього фазового кута

$$\varphi_c = \arctg(S/C) + 0,5\pi \{2 - (\text{sign}S) \times [1 + \text{sign}C]\}.$$

3. Перевірка виконання умови $\sum_{j=1}^J \sin(\varphi_j - \varphi_c) = 0$ для підтвердження

правильності розрахунку φ_c .

4. Визначення вибіркової середньої довжини результуючого вектора $r = \sqrt{S^2 + C^2}$ та вибіркової кругової дисперсії $V = 1 - r$ одного вимірювання фазового кута.

5. Розрахунок кругового стандартного відхилення $\sigma_1 = \sqrt{-2 \ln(1-V)}$.

6. Обчислення кругового стандартного відхилення кругового середнього фазового кута, визначеного за вибіркою обсягу J : $\sigma_c = \frac{\sigma_1}{\sqrt{J}}$. Приймаємо стандартну невизначеність кругового середнього фазового кута рівною круговому стандартному відхиленню: $u_\phi = \sigma_c$.

7. Використовуючи лінійну залежність між товщиною виробу і фазовим зсувом сигналів (2.3) визначаємо стандартну невизначеність результату вимірювання товщини виробу

$$u_h = \frac{u_\phi}{k}, \quad (4.13)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що має зміст чутливості ВСП і визначається в одиницях град/мм.

За умови незначних розбіжностей швидкості травлення по всій поверхні виробу існує можливість підвищення точності оцінювання товщини за рахунок врахування отриманих результатів вимірювання товщини виробу у всіх G каналах вихрострумове засобу, тобто по множині $\{\hat{h}_g, g = \overline{1, G}\}$. При цьому слід врахувати, що результати вимірювання у різних каналах отримують з різною точністю. Якщо в першому, опорному каналі СКВ, похибки вимірювання товщини дорівнює σ_1 , можна очікувати, що для решти $g = \overline{2, G}$ каналів СКВ орієнтовно дорівнює $\sqrt{2}\sigma_1$. Цей результат можна обґрунтувати тим, що коригування фазових характеристик каналів вихрострумове приладу виконується приблизно з таким же СКВ, тому сумарна СКВ результату вимірювання товщини $\sigma_g = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1^2} = \sqrt{2}\sigma, g = \overline{2, G}$

З теорії похибок відомо, що найкращою за критерієм максимуму правдоподібності оцінкою вимірюваної величини при нерівно точних вимірюваннях є зважене середнє. У випадку сумісного опрацювання даних

вимірювань у всіх G каналах вихрострумового приладу маємо зважену середню товщину виробу

$$\hat{h} = \frac{\sum_{g=1}^G \frac{\hat{h}_g}{\sigma_g^2}}{\sum_{g=1}^G \frac{1}{\sigma_g^2}}. \quad (4.14)$$

У формулі (4.14) вага кожного окремого результату $\hat{\Phi}_i$, $i = \overline{1, m}$ обернено пропорційна $\hat{\sigma}_i^2$, тому точніші результати мають більшу вагу і вагоміший вплив на остаточний результат обчислення $\hat{\Phi}$.

Середня квадратична похибка $\hat{\sigma}_h$ визначення зваженої середньої товщини виробу визначається як

$$\hat{\sigma}_h = \frac{1}{\sqrt{\sum_{g=1}^G \frac{1}{\sigma_g^2}}} = \sigma_1 \sqrt{\frac{2}{G+1}}, \quad (4.15)$$

До прикладу, для $G = 4$ маємо зменшення СКВ у $\sim 1,58$ разів.

Для ілюстрації практичного використання наведеної методики в частині оцінювання стандартної невизначеності результату вимірювання товщини виробу розглянемо наступний приклад.

Приклад 4.1. Здійснюється визначення товщини алюмінієвого виробу під час хімічного фрезерування за допомогою вихрострумового методу з ВСП екранного типу та перетворенням товщини виробу в фазовий кут сигналів. Діаметр котушки ВСП становить $D=12,5$ мм. Робоча частота ВСП $f=1350$ Гц, що відповідає узагальненому параметру $\beta=10$. Кількість відліків фази на період сигналу $m = 16$. Час аналізу сигналу становить 50 періодів сигналу збудження ВСП. СКВ одного вимірювання фазових зсувів сигналів становить $\sigma_1 = 0,3^\circ$. Необхідно оцінити стандартну невизначеність результату вимірювання товщини виробу.

Розв'язання. Визначимо обсяг вхідної вибірки: $J = 50m = 800$. Усереднення на колі результатів фазових вимірювань дає змогу зменшити СКВ кругового стандартного відхилення кругового середнього фазового кута:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1}{\sqrt{J}} = \frac{0,3}{\sqrt{800}} = 0,0106^\circ.$$

Стандартну невизначеність кругового середнього фазового кута приймаємо рівною круговому стандартному відхиленню: $u_\phi = \sigma_c = 0,0106^\circ$.

З наведеного в роботі [7] графіку залежності фазового зсуву сигналів ВСП від відносної товщини виробу $\delta = \frac{2h}{D}$ (рис.28 на стор.47) для узагальненому параметру $\beta = 10$ знаходимо чутливість ВСП: $k \approx 6 \frac{\text{град}}{\text{мм}}$.

Визначаємо стандартну невизначеність результату вимірювання товщини виробу: $u_h = \frac{u_\phi}{k} = \frac{0,0106}{6} = 0,00177 \text{ мм} = 1,77 \text{ мкм}$.

Для визначення розширеної невизначеності результату вимірювання необхідно задатись довірчою ймовірністю та обґрунтувати закон розподілу кругового середнього фазового кута. Для технічних розрахунків зазвичай обирають рівень довіри $P_{\text{дов}} = 0,95$. З [8,9] відомо, що розподіл оцінки кругового середнього підпорядкований гаусовому розподілу. Враховуючи ці факти визначаємо рівень покриття: $K=2$. Тоді розширена невизначеність результату вимірювання товщини дорівнює $U_h = u_h \cdot 2 = 1,77 \cdot 2 = 3,54 \text{ мкм}$.

Результат вимірювання подається в такій загальній формі – $h_c \pm U_h$, $P_{\text{дов}}$, де усереднене значення товщини $h_c = \phi_c / k$.

Питання ефективності ВСМ у вихрострумовому контролі порівняно з одноелементними ВСП на якісному рівні розглядалось в [10]. Конкретизуємо це поняття стосовно застосування вихрострумових матриць у складі АСКТП ХФ. Ефективність використання ВСМ полягає у підвищенні точності оцінювання товщини виробу за рахунок зменшення випадкової складової похибки вимірювання фазових зсувів сигналів за незмінного часу аналізу сигналів. Відомо, що усереднення результатів незалежних вимірювань дає змогу зменшити середнє квадратичне відхилення (СКВ) результату вимірювання у $\sqrt{J}$ разів відносно СКВ

σ_1 одного вимірювання, де J – обсяг вибірки. Отже можна очікувати, що у випадку застосування одноелементного ВСП значення СКВ усередненого результату вимірювання товщини виробу становитиме $\sigma_{ВСП} = \sigma_1 / \sqrt{J}$.

У випадку одночасного збору інформації з G елементів ВСМ, за незмінного часу аналізу сигналів, обсяг сукупної вибірки дорівнюватиме JG , а СКВ результату вимірювання визначатиметься величиною $\sigma_{ВСМ} = \sigma_1 / \sqrt{JG}$. Таким чином, ефективність використання ВСМ за незмінного часу вимірювання можна визначити коефіцієнтом

$$K_{\text{еф}} = \frac{\sigma_{ВСП}}{\sigma_{ВСМ}} = \sqrt{G}. \quad (4.16)$$

Для розглянутої в розділі 3 чотириелементної ВСМ маємо $K_{\text{еф}} = 2$.

Використання МВС в АСКТП ХФ має ще один позитивний момент, а саме скорочення для заданої СКВ часу аналізу сигналу. До прикладу, за частоти сигналу збудження $f = 1350$ Гц, кількості вибірок на період сигналу $m = 16$ і обсягу вибірки $J = 800$, час аналізу становить $T_a = \frac{J}{f \cdot m} = \frac{800}{1350 \cdot 16} \approx 0,037$ с. Для 4-елементної ВСМ відповідний час аналізу становитиме 0,009 с.

4.5. Перспективи використання нейромережових технологій у засобах ВСК для САК процесу ХФ

Для багатьох задач керування технологічними процесами з електропровідними об'єктами керування виникає потреба у сприйнятті і оцінюванні фізичних величин, які опосередковано впливають на ТП. В ряді інших випадків таких, наприклад, як виготовлення виробів з композиційних матеріалів, формування їх властивостей відбувається безпосередньо в технологічному процесі виготовлення самого виробу. Такі технологічні виклики вимагають постійного вдосконалення систем керування технологічними процесами. Однією з найбільш перспективних інновацій у цьому напрямі є інтеграція в засоби ВСК у складі САК нейромережових технологій. Нейромережі,

які вже довели свою ефективність в численних галузях від інформаційних технологій до медицини, пропонують нові можливості для автоматизації процесу контролю та керування, підвищення ефективності та адаптивності АСКТП.

Нейромережеві технології пропонують революційні можливості для різних галузей науки та промисловості. Їх адаптивність, гнучкість та потужність в опрацюванні великих обсягів даних роблять їх ідеальним інструментом для вирішення складних завдань. Можливості нейромережевих технологій для ВСК ілюструє ряд робіт з цієї тематики. До прикладу, в роботі [17] розглядалось питання розширення навчальної вибірки для штучної нейронної мережі (ШНМ) в системах ВСК на основі чисельного моделювання з використанням метод скінченних елементів, в роботі [18] запропоновано новий метод розпізнавання та класифікації дефектів на основі згорткової нейронної мережі (CNN) для ВСК титанової пластини, цей же метод в роботі [29] запропоновано для оцінювання глибини тріщини теплообмінних трубок парогенератора ядерного реактора. В роботі [20] представлена штучна нейронна мережа для вихрострумового тестування зварних швів аустенітної нержавіючої сталі. Показано, що така ШНМ використовує як вхідні дані оцифровані компоненти імпедансу параметричного ВСП, а вихідними даними можуть бути як оцінки розмірів рисок на поверхні зварного шву, так і варіації мікроструктури зварного шва.

Нейромережі імітують структуру та функціонування біологічних нейронних мереж, що дозволяє їм моделювати складні взаємозв'язки та функції між вхідними даними та реакцією мережі. Завдяки глибокому навчанню, ШНМ можуть автоматично виявляти та класифікувати шаблони в даних, що робить їх ефективними для завдань розпізнавання образів, прогнозування та класифікації.

З розвитком нейромережевих технологій та їх успішним застосуванням в різних галузях, АСКТП також можуть отримати додаткові можливості від їх впровадження. Інтеграція нейромереж у процес керування відкриває нові можливості для розширення області застосування засобів ВСК в САК. Зокрема впровадження нейромережевих технологій дасть змогу отримати нові розв'язки наступних задач:

- **Автоматизація процесу прийняття рішення про наявність неоднорідностей та дефектів і їх приналежність до певного класу з метою формування адекватних сигналів керування ТП.** Нейромережі дають змогу автоматизувати цей процес, навчаючись розпізнавати та класифікувати дефекти та неоднорідності матеріалів на основі великої кількості даних, що забезпечує швидкість та надійність контролю та керування.

- **Виявлення кореляційних зв'язків між технологічними параметрами та характеристиками об'єктів контролю в процесі виробництва.** Завдяки глибокому навчанню та здатності нейромереж моделювати складні взаємозв'язки, вони можуть значно підвищити вірогідність виявлення кореляційних зв'язків між технологічними параметрами та характеристиками об'єктів контролю.

- **Адаптація до різних матеріалів та зміни режимів технологічних процесів.** Нейромережі дають змогу адаптуватися до цих змін, навчаючись на різних наборах даних та забезпечуючи високу адекватність формування сигналів керування за варіації різних чинників.

З урахуванням цих переваг, інтеграція нейромережевих технологій у процес керування АСКТП може стати ключовим кроком у модернізації та оптимізації цього процесу за складних зв'язків між технологічними параметрами та характеристиками об'єктів контролю.

З урахуванням поточних досягнень та переваг нейромережевих технологій, можна виділити декілька ключових напрямів застосування ШНМ у засобах ВСК для САК:

1. Розвиток глибокого навчання та специфічних алгоритмів. З ростом обсягів даних та збільшенням складності завдань контролю та керування, можна очікувати створення нових, більш специфічних алгоритмів глибокого навчання. Ці алгоритми повинні бути спрямовані на адаптацію до нових матеріалів та технологій виробництва.

2. Інтеграція з іншими технологіями. Нейромережі можуть бути успішно інтегровані з іншими сучасними технологіями для створення більш

автоматизованих та інтелектуальних систем контролю якості. Така інтеграція дасть змогу збирати, обробляти та аналізувати дані в реальному часі, забезпечуючи високу ефективність керування технологічними процесами.

3. Пошук та практичне використання нових інформаційних ознак сигналів ВСК. Формування вхідних баз даних для нейромереж в системах АСКТП на основі нових інформаційних ознак, спільне використання різнорідних ознак в якості вхідних даних для ШНМ розширить можливості АСКТП. Ряд таких нових ознак запропоновано у розділі 2 як сукупність певних статистик, що отримують з фазової характеристики сигналів ВСМ.

З урахуванням поточних досягнень та інновацій у галузі нейромереж, можна очікувати їхнього подальшого розвитку та більш широкого застосування у ВСК в цілому, та у АСКТП на основі методів ВСК зокрема. Їх інтеграція з іншими сучасними технологіями та створення нових специфічних алгоритмів можуть відкрити нові горизонти для цієї галузі.

Висновки до розділу 4

1. Запропонована методика та алгоритм оброблення сигналів ВСМ, які включають нормалізацію комплексних коефіцієнтів передачі каналів ВСМ, дають змогу збільшити їх чутливість до різних технологічних параметрів в засобах ВСК для САК процесу ХФ. Визначені за допомогою ДПГ дискретні амплітудна і фазово характеристики сигналів в каналах ВСМ дають змогу отримати вторинні інформаційні ознаки, які є більш стійкими та зручними для формування сигналів керування в САК процесу ХФ.

2. Проведені експериментальні дослідження з використовувався вихрострумового дефектоскопу Olympus Omniscan MX з вихрострумовим датчиком матричного типу підтвердили високу продуктивність та ефективність технології ВСК на основі використання ВСМ та доцільність їх використання в САК процесу ХФ.

3. Запропоновано оцінювати ефективність використання ВСМ у складі САК процесу ХФ порівняно з вихрострумовими перетворювачами інших типів за допомогою коефіцієнта ефективності, який враховує зменшення випадкової складової похибки вимірювання фазових зсувів сигналів, отже і товщини виробів в процесі фрезерування, за незмінного часу аналізу сигналів.

4. Проаналізовано перспективи використання нейромережевих технологій в цілому у засобах ВСК для САК процесу ХФ, зроблено висновок, що використання штучних нейромереж в умовах відсутності прямих зв'язків між характеристиками об'єкта керування та параметрами сигналів ВСМ може значно підвищити ефективність систем автоматизованого керування технологічними процесами.

Список використаних джерел до розділу 4

1. “Normalization | Olympus IMS”. Olympus Inspection Solutions—NDT, Microscopes, XRF, RVI. Дата звернення: 17 груд. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/eca-tutorial/what-is-eca/normalization/>
2. Дехтяренко П. И. Синхронное детектирование в измерительной технике и автоматике. Киев.: Техніка, 1965. 313 с.
3. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM): First edition. – ISO, Switzerland, 1993. – 101 p.
4. Васілевський О.М. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник /О.М. Васілевський, В.Ю. Кучерук, Є.Т. Володарський. –Вінниця: ВНТУ, 2015.– 230 с.
5. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія, 2009. Тернопіль: Вид-во Терн. держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – 383 с.
6. Куц Ю.В. Вираження невизначеності вимірювань фазового зсуву сигналів/ Ю.В. КУц, Ю.Ю.Лисенко, О.Е. Левченко, М.О. Редька // 17-й Міжнар. наук.-техн. семінар “Невизначеність вимірювань: наукові, прикладні, нормативні та методичні аспекти” (УМ-2020), Созополь-Харьков, 2020.– Софттрейд, Болгария.– С.28-29.
7. Дорофеев А.Л. Индукционная толщинометрия / ДорофеевА.А., Никитин А.И., Рубин А.Л. – М., Энергия, 1978. – 184 с.
8. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. – М.: Гл.ред. физ.-мат. Литературы изд-ва «Наука», 1979. – 240с.
9. Fisher N.I. Statistical analysis of circular data. / N.I. Fisher. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 277 p.
10. Lysenko I. Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components / Lysenko I., Mirchev Y., Levchenko O., Kuts Y., Uchanin V. // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 2. – 84-88 pp.

11. Romain Cormerais, Roberto Longo, Aroune Duclos, Guillaume Wasselynck, Gerard Berthiau. Data Augmentation and Artificial Neural Networks for Eddy Currents Testing. *Electromagnetic Non-Destructive Evaluation (XXIII)*, 2020, 978-1-64368-118-4. 10.3233/SAEM200040. hal-02982338
12. Weiquan Deng, Jun Bao, and Bo Ye. Defect Image Recognition and Classification for Eddy Current Testing of Titanium Plate Based on Convolutional Neural Network. *Research Article | Open Access. Volume 2020 | Article ID 8868190 | <https://doi.org/10.1155/2020/8868190>*
13. Kazuyuki Demachi, Tomoyuki Hori, Stephen Perrin/ Crack depth estimation of non-magnetic material by convolutional neural network analysis of eddy current testing signal/ *Journal of Nuclear Science and Technology*, Volume 57, 2020 - Issue 4 ? <https://doi.org/10.1080/00223131.2019.1691076>
14. B.P.C. Rao, B. Raj, T. Jayakumar, P. Kalyanasundaram. An artificial neural network for eddy current testing of austenitic stainless steel welds. *NDT & E International*, Volume 35, Issue 6, September 2002, Pages 393-39. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00007-5)
15. Levchenko O. Using the Red Pitaya platform in automated eddy current testing / Levchenko O., Aleksiev A., Kuts Y., Lysenko I.// *International Journal “NDT Days”*, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 4. – 194-201 pp.
16. Uchanin, V. M. and Ivashchenko, K. A. (2021). Detection of defects of structures from ferromagnetic steel through the layer of anticorrosion cover without removal [in Ukrainian]. *Methods and devices of quality control*, 1(46), 5-14.
17. Romain Cormerais, Roberto Longo, Aroune Duclos, Guillaume Wasselynck, Gerard Berthiau. Data Augmentation and Artificial Neural Networks for Eddy Currents Testing. *Electromagnetic Non-Destructive Evaluation (XXIII)*, 2020, 978-1-64368-118-4. 10.3233/SAEM200040. hal-02982338
18. Weiquan Deng, Jun Bao, and Bo Ye. Defect Image Recognition and Classification for Eddy Current Testing of Titanium Plate Based on Convolutional Neural Network. *Research Article | Open Access. Volume 2020 | Article ID 8868190 | <https://doi.org/10.1155/2020/8868190>*

19. Kazuyuki Demachi, Tomoyuki Hori, Stephen Perrin/ Crack depth estimation of non-magnetic material by convolutional neural network analysis of eddy current testing signal/ Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 57, 2020 - Issue 4 ? <https://doi.org/10.1080/00223131.2019.1691076>

20. B.P.C. Rao, B. Raj, T. Jayakumar, P. Kalyanasundaram. An artificial neural network for eddy current testing of austenitic stainless steel welds. NDT & E International, Volume 35, Issue 6, September 2002, Pages 393-39. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00007-5)

РОЗДІЛ 5. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ХІМІЧНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ З МАТРИЧНИМ ВИХРОСТРУМОВИМ ДАТЧИКОМ ТОВЩИНИ ОБРОБЛЮВАНОГО ВИРОБУ

В цьому розділі розроблено двоконтурну систему керування процесом хімічного фрезерування виробів з алюмінієвих сплавів. Якість цього процесу значною мірою залежить від швидкості травлення, яка в свою чергу визначається концентрацією травника, його температурою та іншими факторами. Для підтримки в певних межах швидкості процесу травлення застосовано контур керування температурою травника. Оскільки неможливо передбачити сукупний вплив всіх факторів на швидкість травлення, апріорі розрахувати час травлення можна лише наближено. Тому для точного визначення інтервалу часу експозиції деталі в травнику в системі застосовано другий контур керування, який забезпечує зупинку процесу травлення за результатами вимірювання поточних значень товщини виробу. Безконтактне визначення товщини виробу в технологічному процесі хімічного травлення відбувається за допомогою багатоканального вихрострумowego засобу вимірювання товщини виробу з датчиками матричного типу.

В розділі сформульовано завдання дослідження, розроблено та дано детальний опис організаційно-технічної структури АСКТП ХФ, розроблено блок-схеми алгоритму керування товщиною заготовки та алгоритму керування температурою травника. Обґрунтовано висновок про те що, впровадження вихрострумowego засобу вимірювання з матричними перетворювачами у складі контуру керування товщиною виробу дає змогу реалізувати безконтактне визначення товщини виробу по всій його поверхні.

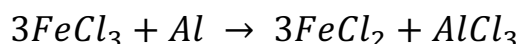
5.1 Аналіз задачі керування процесом хімічного фрезерування виробів з алюмінієвих сплавів

Алюміній має широке технічне застосування в авіаційній, аерокосмічній та автомобільній промисловості, де необхідна висока питома міцність, низька

питома вага, тепло- та електропровідність. Хімічна обробка алюмінію та його сплавів широко вивчається і використовується у виробництві деталей з цього матеріалу. Цей технологічний процес найбільш ефективний при виготовлення тонкостінних деталей, коли механічні методи оброблення є небажаними, оскільки вони призводять до значних деформацій деталі в процесі їх обробки.

У праці [1] описано широкий набір травників, що застосовуються для травлення алюмінію та його сплавів, зроблено детальний огляд хімічних складів, умов та процедур, які ефективно використовуються для досягнення бажаного ефекту травлення.

У літературі наведено результати численних досліджень, присвячених хімічній обробці алюмінію [1-10]. Втім значна частина цих публікацій акцентує увагу на обґрунтуванні травильних реагентів, які вважаються придатними для застосування в промислових масштабах. Інші дослідження демонструють вузькоспеціалізовані можливості певних травників – більш токсичних та менш технологічних, що обмежує їх застосування в більш широкому контексті хімічної обробки алюмінію. В цих та інших публікаціях найчастіше наводиться універсальний травник – хлорид заліза. Окислювально–відновна реакція за його застосування для травлення алюмінію має наступний вид:



Згідно з даними, представленими в джерелах [11,12], найефективнішим травильним розчином для обробки алюмінію визнано розчин хлорного заліза з додаванням азотної кислоти.

Відповідно до дослідження, результати якого представлені в роботі [11], встановлено, що залежність швидкості розчинення алюмінію від концентрації реагенту в загальному випадку є нелінійною і значно вищою за не лінійність швидкості травлення міді та сталі у цьому травнику (рис. 5.1.). Зокрема за температури травника 50 °C і зміні його концентрації в інтервалі 23 % – 34%, швидкість розчинення алюмінію варіюється в діапазоні значень 0,2 – 0,75 мм³/хв. Така нелінійність та відносно висока швидкість розчинення алюмінію

пояснюється значною хімічною активністю його іонів, яка впливає на динаміку реакції розчинення металу. Залучені в цей процес іони алюмінію, можуть утворювати різноманітні комплексні сполуки з розчинниками, що призводить до змін у швидкості розчинення в залежності від концентрації розчинених речовин.

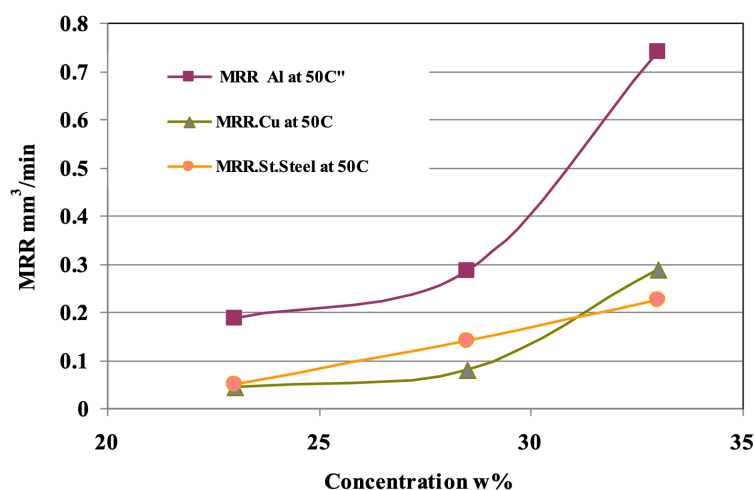


Рис. 5.1. Швидкість розчинення металів в залежності від концентрації травника за даними роботи [11]

Згаданий вище ефект свідчить про складність хімічних процесів, що відбуваються під час взаємодії алюмінію з розчинами травників, необхідність глибокого розуміння цих процесів для оптимізації умов травлення та неможливість визначити заздалегідь необхідний час травлення виробу для досягнення очікуваного результату.

5.2. Завдання дослідження

Ознайомившись з практикою хімічного фрезерування металевих деталей можна стверджувати, що цей процес є обмежено контрольованим, внаслідок дії неврахованих факторів, про що зазначалося у розділі 2. Початок процесу фрезерування вимагає певного налаштування обладнання і триває під спостереженням оператора для гарантування відповідності встановленим технічним вимогам. Орієнтовні значення часу перебігу та параметрів процесу задаються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на основі

апріорних даних про матеріал і вимоги до кінцевого продукту. Врахування цих даних є необхідним для досягнення високої якості обробки.

З практичного досвіду, що у процесі хімічного фрезерування існує кілька помилок, які можуть призвести до перевитрат матеріалів та енергії і зниження якості кінцевого продукту. До прикладу, у випадку завчасної зупинки процесу ХФ оброблюваний виріб матиме більшу товщину і вагу, за умови виходу товщини за встановлену верхню границю допуску унеможлиблюється процес спряження цього виробу з іншими деталями, а також збільшується загальна вага конструкційного вузла; у випадку «перетравлення» необґрунтовано збільшуються енергетичні витрати на реалізацію цього технологічного процесу, а за умови виходу товщини виробу за встановлену нижню границю допуску виріб втрачає необхідну розрахункову міцність і повинен бути відбракований.

Аналіз систем керування хімічним фрезеруванням показує, що окремий розгляд питань якості продукції та енергозбереження часто не дає бажаного результату, і потребує комплексного підходу для досягнення синтезу оптимальної системи керування.

На етапі розроблення оптимальної системи керування виробничим процесом, включаючи систему керування ХФ металів, необхідно формулювати задачі, що забезпечують і енергоефективність, і високу якість вихідної продукції. Технічні показники процесу ХФ, зокрема швидкість травлення поверхневого шару металу, залежать від багатьох чинників, і більшою мірою від температурного режиму його реалізації. Тому раціональне керування процесом ХФ повинно включати як стабілізацію температурного режиму, так і контроль тривалості процесу ХФ шляхом постійного вимірювання товщини виробу, що в сукупності забезпечує його потрібну якість.

Задача стабілізації температурного режиму виробничого процесу є традиційною для АСКТП, хоча стосовно процесу ХФ це питання і потребує певного перегляду існуючих методів визначення температурного графіка і тривалості процесу, які зазвичай засновані на досвіді оператора та переходу до використання науково обґрунтованих методів і методик.

Задача постійного вимірювання товщини виробу в процесі ХФ є набагато складнішою. Можна стверджувати, що проведення постійного аналізу товщини виробу в реальному часі в процесі його обробки є ключовою умовою реалізації якісного процесу ХФ.

Врахування вищенаведеного при розробленні АСКТП ХФ дасть змогу підвищити об'єктивність і точність процесу ХФ, забезпечуючи стабільність і передбачуваність виробництва.

5.3. Розроблення контурів САК процесу ХФ алюмінієвих виробів

Спираючись на результати аналізу особливостей процесу ХФ алюмінієвих деталей та виконану постановку задачі керування цим процесом визначено, що процес ХФ відбувається за апіорної неповної невизначеності початкової товщини ($\dim h = L$, мм) оброблюваної деталі та швидкості травлення ($\dim v = L^3 T^{-1}$, мм³/хв), яка визначається сукупністю різних факторів – концентрації розчину травника ($\dim = N L^{-3}$, моль/м³), його температурою ($\dim ^\circ T = K$, °С), швидкістю руху розчину ($\dim V = L T^{-1}$ м/с), що омиває поверхню деталі, наявністю комплексних сполук алюмінію з розчинником тощо. За таких умов керованим параметром доцільно обрати товщину виробу h . Керування процесом ХФ здійснюється шляхом визначення тривалості перебування деталі в розчині, що дає змогу досягти необхідної товщини виробу. Інтервал часу перебування деталі у розчині змінюється відповідно до потреби видалення необхідної товщини металу.

Оцінювання поточної товщини виробів в процесі хімічного фрезерування є ключовою операцією при визначенні часу травлення. Ця операція здійснюється на основі вихрострумowego методу з датчиками екранного типу і перетворенням товщини виробу у фазовий зсув сигналів (рис. 5.2) [13].

Згідно наведених у цій роботі даних залежність між фазовим зсувом сигналів ВСП та товщиною виробу з великою точністю може бути апроксимована лінійною функцією виду

$$\varphi_h(t) = S_h \cdot h(t) + \varphi_n, \quad (5.1)$$

де $S_h = f(\beta, R)$ – чутливість перетворювача (град/мм), φ_n – початковий фазовий зсув сигналів ВСП, $\beta = R\sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}$ – узагальнений параметр, R – радіус перетворювача, ω – кругова частота сигналу збудження ВСП, γ – питома електропровідність алюмінію, μ_0 – магнітна стала.

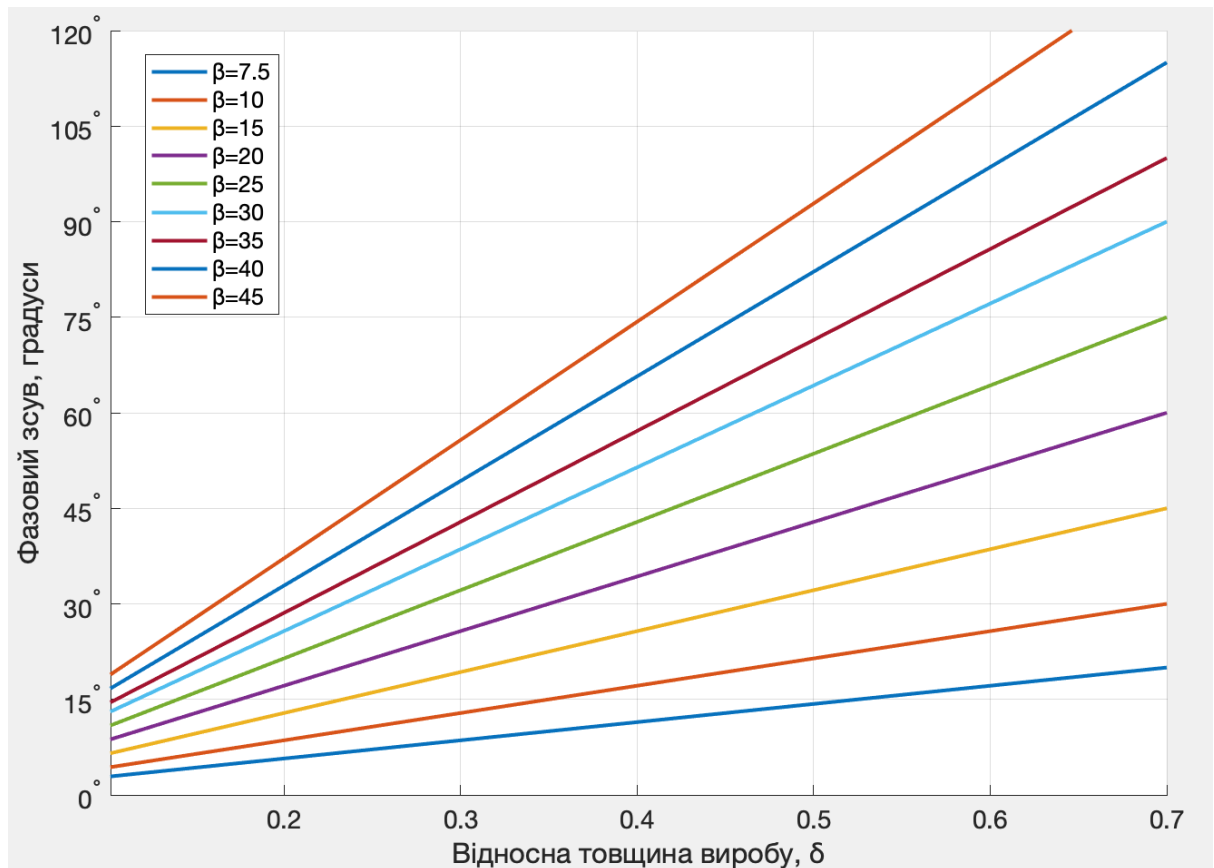


Рис. 5.2. Залежність фазового зсуву вихідної напруги ВСП екранного типу від узагальненого параметру δ [13].

Апроксимація (5.4) має місце в діапазоні значень узагальненого параметра $\beta \in [7.5, 50]$ та відносної товщини виробів $\delta \in [0.1, 0.7]$. Для зазначених діапазонів змінних та у разі вибору $R = 10$ мм чутливість ВСП змінюється в межах $\sim [3.8, 21]$ град/мм, а результат перетворення практично не залежить від зазору між ВСП і виробом. Крім того за даними [13] початковий фазовий зсув сигналів ВСП належить інтервалу $\varphi_n \in [2^\circ, 4^\circ]$. Значення S_h та φ_n можуть бути уточнені на етапі калібрування системи.

Другим керувальним параметром визначено температуру розчину травника, яка впливає на швидкість процесу хімічного фрезерування, а керованим параметром – швидкість перебігу процесу травлення. Особлива вимога – процес контролю товщини деталі повинен відбуватись без перекриття доступу травника до деталі, тобто безконтактно. Цій вимозі відповідає вихрострумовий метод вимірювання товщини.

Автоматизована система керування технологічним процесом ХФ зазвичай має складну структуру, що об'єднує різноманітне обладнання для забезпечення ефективності і точності виробничого процесу. Виходячи з необхідності керування двома параметрами в структуру САК процесу ХФ введено два контури. Один контур відповідає за керування товщиною заготовки, що є важливим для забезпечення відповідності кінцевої продукції заданим стандартам якості. Другий контур системи керує температурою, гарантуючи стабілізацію температурного режиму травлення, що підвищує енергоефективність процесу ХФ. Ця двоконтурна конфігурація системи дає змогу виконувати точне та незалежне керування температурою (отже і швидкістю процесу травлення) та товщиною виробу. Система включає обчислювальні та керувальні пристрої, засоби отримання, перетворення, збереження, відображення і реєстрації інформації. Організаційно-технічна структури системи наведена на рис. 5.3.

В наведеній на рис. 5.3 структурі прецизійне визначення фазових зсувів сигналів ВСП відбувається в блоці ВВП, на виході якого формується значення $\varphi_h(t)$ як результат вимірювання фазових зсувів від одного екранного ВСП або як результату усереднення отриманих фазових зсувів всіх n ВСП.

На технологічний об'єкт керування (ТОК) монтують вимірювальні перетворювачі (ВП, ВСП1..ВСП_g), які відповідають за виявлення кількісних значень параметрів процесу, таких як температура розчину та товщина заготовки. Регулювальні органи (РО) здійснюють керувальні впливи, витягуючи заготовку та нагрів розчину, що дозволяє адаптувати процеси до поточних виробничих потреб.

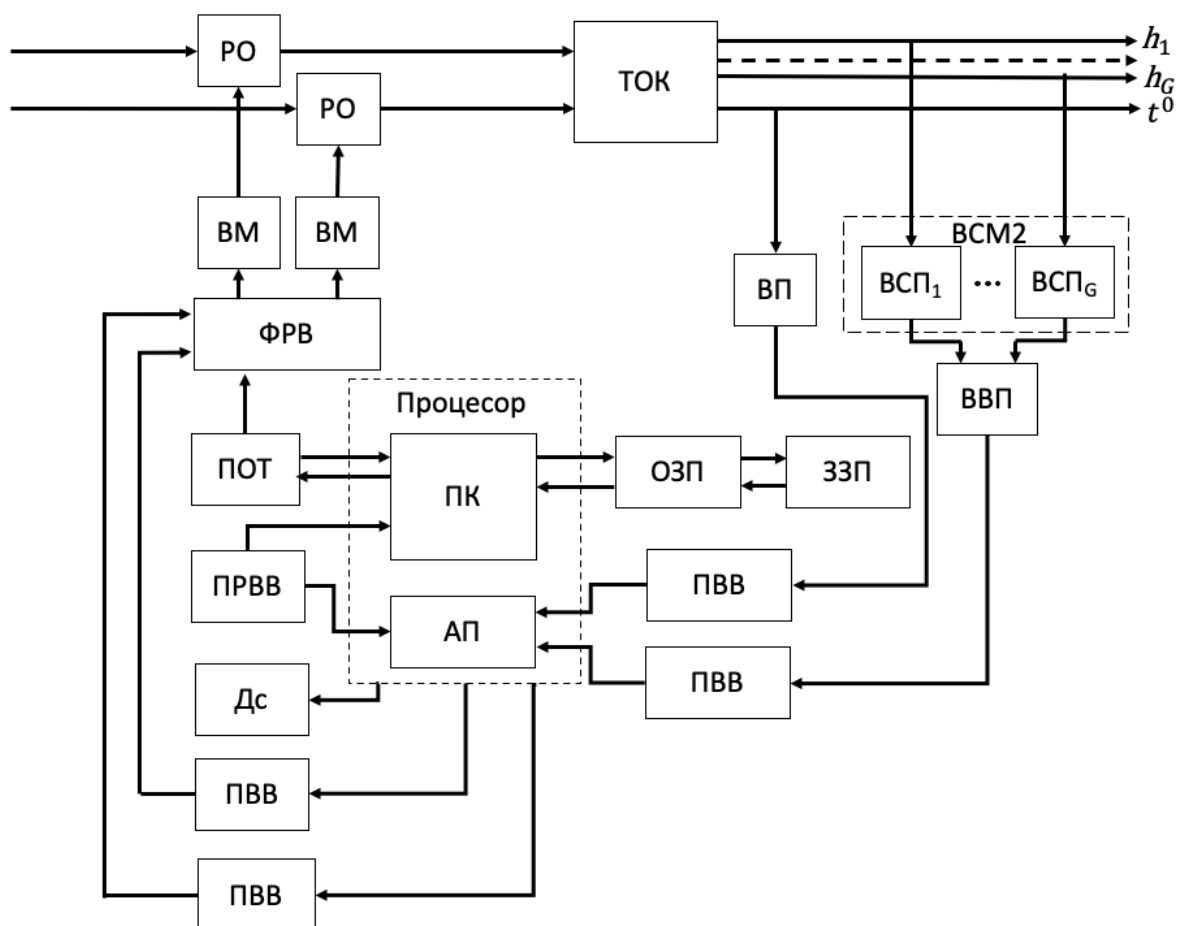


Рис. 5.3. Організаційно-технічна структура АСКТП ХФ виробів з алюмінієвих сплавів

Система містить щити керування обладнані регуляторами та вторинними приладами, які необхідні для місцевого керування процесом. Пульта оператора-технолога (ПОТ) містить щити з засобами автоматизації та зв'язку, а також принтер для реєстрації параметрів.

На ПОТ змонтований дисплей для відображення інформації, сигнальні табло, що видають оператору рекомендації щодо керування процесом, задавачі значень керованих параметрів та клавіатура пристрою ручного введення/виведення (ПРВВ).

Оператор з ПОТ має можливість не тільки спостерігати за поточними показниками системи, але й активно втручатися в процес керування. Зокрема оператор має можливість виконувати наступні дії.

1. Змінювати температурний режим відповідно до потреб процесу ХФ з метою адаптації до змінюваних умов виробництва.

2. Налаштовувати критерії зупинки процесу за мінімальною, максимальною або середньою товщиною заготовки. Це дає змогу більш точно контролювати якість продукції, враховуючи специфічні вимоги до кожного окремого виробничого завдання.

3. Враховувати нерівномірність процесу травлення по поверхні заготовки, коригуючи параметри ТП на основі даних, отриманих від матричних вихрострумових перетворювачів. Ця опція розширює можливості забезпечення високої адаптивності системи до складних виробничих ситуацій.

4. У випадку аварійної ситуації, оператор має змогу негайно зупинити процес травлення за допомогою систем аварійного реагування, які інтегровані в ПОТ. Це критично важливо для гарантування безпеки обладнання та персоналу.

Перелічені вище можливості оператора щодо керування та контролю процесу ХФ підвищують ефективність технічної експлуатації системи та знижують ризики, пов'язані з виробничим процесом ХФ.

Формувач регулюючих впливів (ФРВ) є необхідним компонентом АСКТП ХФ, оскільки він забезпечує формування сигналів на виконавчі механізми.

Керувальний обчислювальний комплекс включає пристрої інформаційної підсистеми, такі як комутатори сигналів, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), пристрої масштабування, а також пристрої керувальної системи, включаючи арифметичний пристрій (АП), оперативний (ОЗП) та зовнішній запам'ятовувальні пристрої (ЗЗП), а також цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП).

Пристрої введення/виведення (ПВВ) утворюються з комутаторів сигналів і АЦП і забезпечують керування виконавчими механізмами (ВМ) та регулювальними органами (РО).

Інтеграція такої системи забезпечує високу адаптивність та ефективність управління, дозволяючи оператору реагувати на зміни виробничих умов в режимі реального часу. Завдяки модульному принципу побудови системи, оператор має змогу вибирати режими вимірювання товщини заготовки за мінімальним, максимальним, або середнім значенням. Це додає гнучкості в процес управління, враховуючи різні технологічні потреби та вимоги до якості продукції.

Таким чином, автоматизована система керування технологічним процесом являє собою комплексне рішення, що дозволяє ефективно інтегрувати різноманітні технічні засоби та підсистеми для управління складними виробничими процесами, забезпечуючи високу продуктивність, точність виробництва.

5.3.1. Контур визначення інтервалу часу експозиції деталі в травнику

Цей контур САК процесу ХФ призначено для зупинки процесу травлення по досягненню необхідної товщини оброблюваної деталі. Його структура наведена на рис. 5.4.

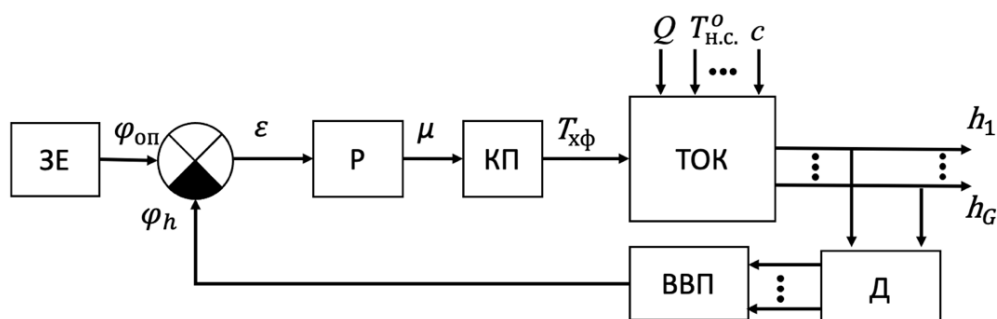


Рис. 5.4. Структурна схема САК товщиною заготовки в процесі ХФ

На рис. 5.4 позначено: КП – керувальний пристрій, ТОК – технологічний об’єкт керування, Д – вихрострумові перетворювачі екранного типу, що входять до складу ВСМ, ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач, ЗЕ – задаючий елемент, Р – регулятор позиційного типу (двопозиційний регулятор). Система працює наступним чином. За сигналом «Старт», який надходить на КП у момент часу t_1 , оброблювана деталь разом з ВСМ занурюється у травник, починається процес травлення. З часом деталь стоншується, її товщина $h(t)$ наближається до номінального значення $h_{\text{ном}}$. ВСП1...ВСП n формують електричні гармонічні сигнали, фазові зсуви яких лінійно залежать від товщини деталі в зоні контролю. Блок ВВП визначає поточне значення усередненого фазового зсуву $\varphi_h(t)$, яке відповідає усередненій по всім n зонам контролю товщині виробу (можливий варіант формування $\varphi_h(t)$ за мінімальним чи максимальним значенням товщини виробу). Отримане значення $\varphi_h(t)$ поступає на перший вхід компаратора К, на

другий вхід якого надходить визначене на етапі калібрування системи значення опорного фазового зсуву $\varphi_{\text{оп}}$, яке відповідає номінальній товщині виробу і зберігається в блоці ЗЕ.

Вхідний сигнал $\varepsilon(t)$ на регулятор, який дорівнює відхиленню значення усередненого фазового зсуву від значення опорного фазового зсуву:

$$\varepsilon(t) = \varphi_{\text{оп}}(t) - \varphi_h(t) \quad (5.2)$$

Двопозиційний регулятор Р формує керувальний вплив $\mu(\varepsilon)$, який поступає на КП і зупиняє процес травлення. Статична характеристика двопозиційного регулятора та описується:

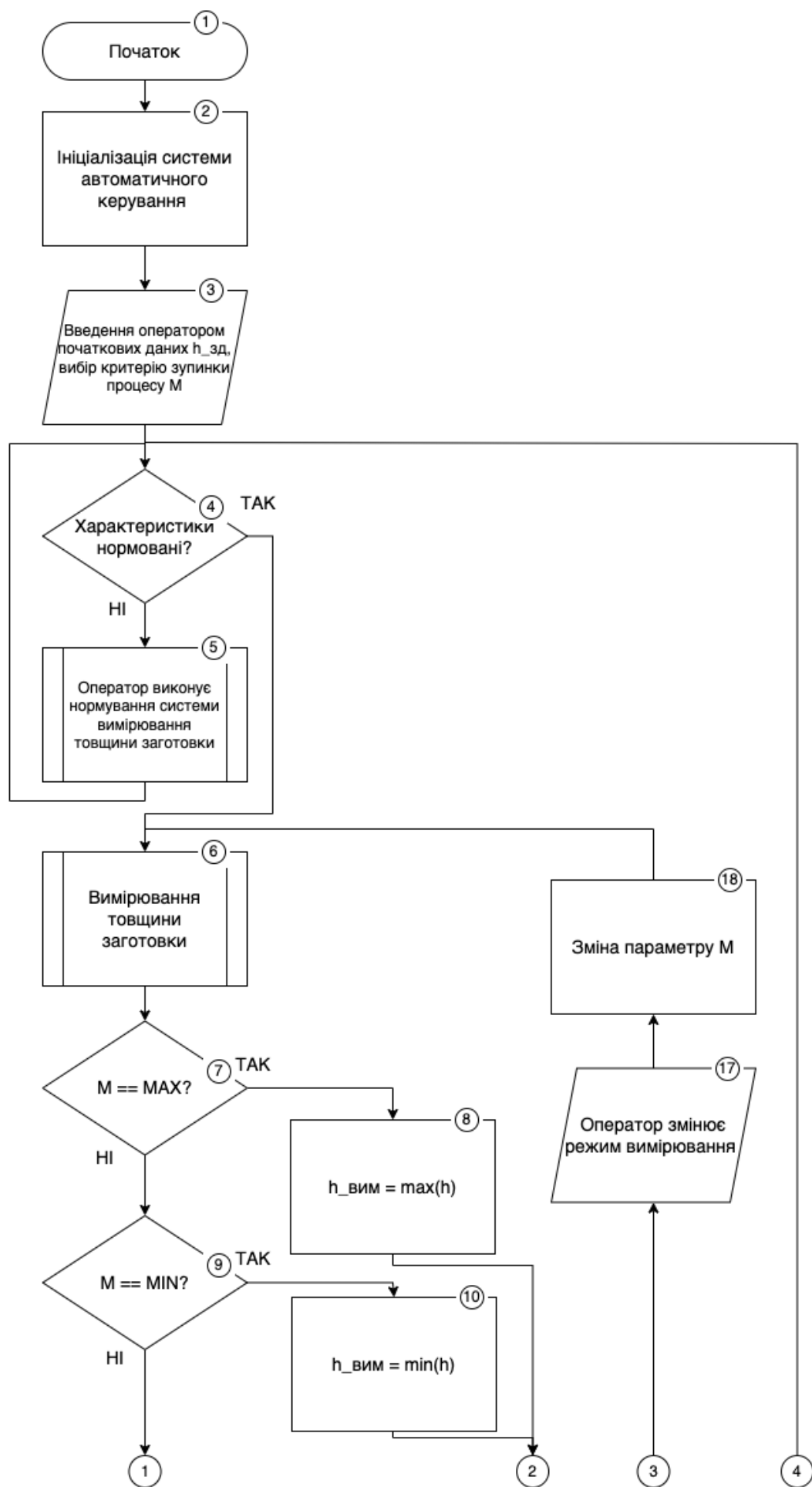
$$\mu(\varepsilon) = \begin{cases} 0, & \varepsilon < 0 \\ \mu_1, & \varepsilon = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

За цим сигналом виконавчий механізм, який входить до складу КП, піднімає деталь та ВСМ з ванни з розчином травника і передає для виконання наступної операції – змивання залишків травника. Отже операція хімічного фрезерування відбувається впродовж часу $T_{\text{хф}} = t_2 - t_1$, який визначається з урахуванням впливу на швидкість травлення всіх можливих чинників.

Алгоритм (рис. 5.5) описує процес керування товщиною заготовки в автоматичній системі, який починається з етапу ініціалізації (блок 1, 2), на якому відбувається підготовка системи до роботи, встановлення необхідних параметрів.

Після ініціалізації оператор вводить початкові дані про товщину заготовки $h_{\text{зд}}$, вибирає критерій зупинки процесу М (блок 3), та проводить нормування системи для підвищення точності вимірювань (блок 4,5).

Наступний крок полягає у вимірюванні товщини заготовки за допомогою вихрострумових перетворювачів, що дозволяє виконувати безконтактний вимір товщини в агресивному середовищі (блок 6). Отримані дані про товщину порівнюються з заданим значенням (блок 7-13). Якщо виміряна товщина відповідає заданій, то відбувається виведення результатів вимірювання на дисплей та формування керуючого впливу для витягнення заготовки з резервуару, що свідчить про відповідність продукту встановленим параметрам.



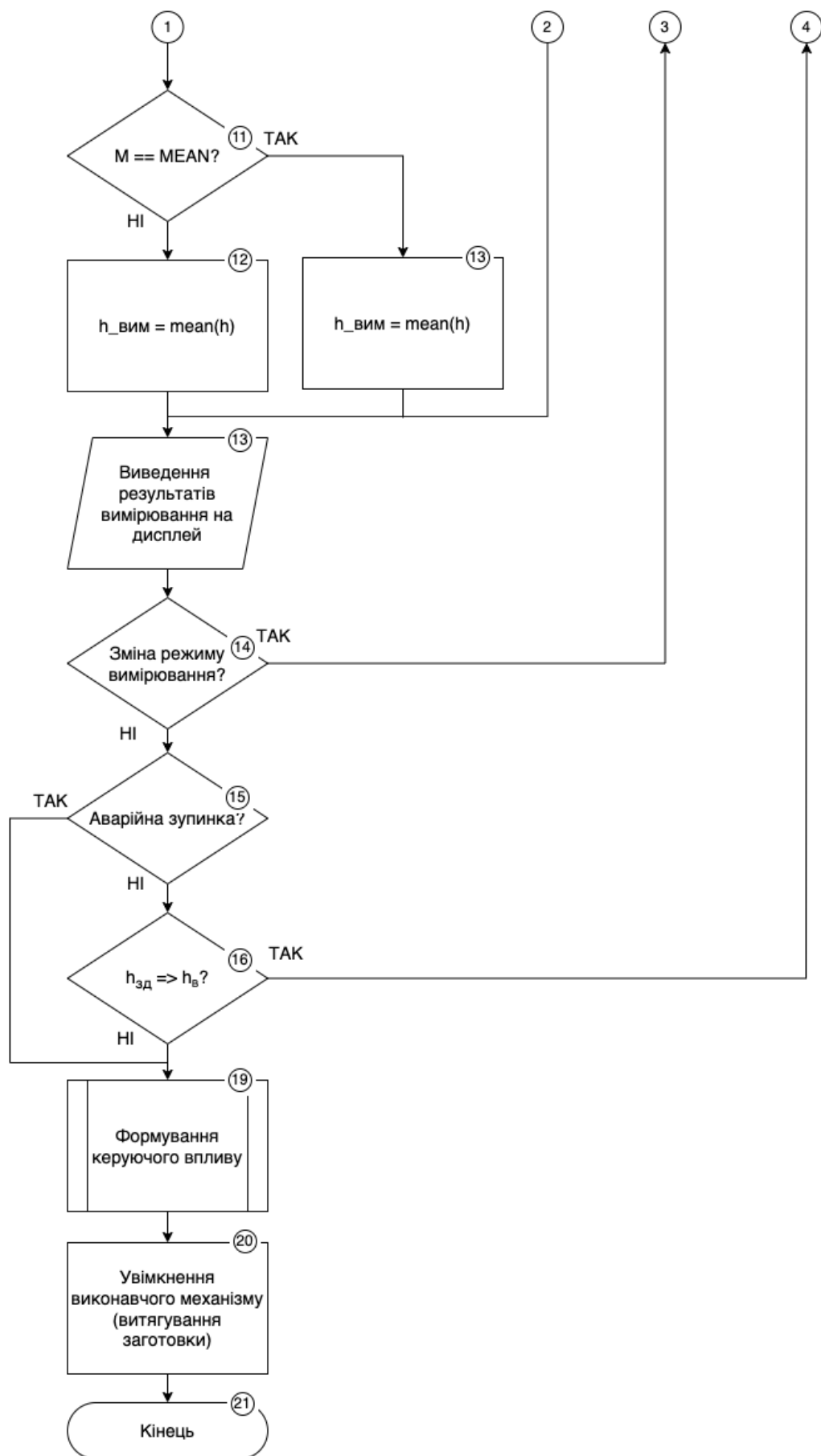


Рис. 5.5. Блок-схема алгоритму керування товщиною заготовки.

У випадку, коли виміряна товщина не відповідає заданому критерію, система ініціює повторне вимірювання, що є частиною замкнутого циклу алгоритму вимірювання (блок 16). Це дає змогу забезпечити безперервний контроль товщини виробу в процесі травлення і дозволяє уникнути появи браку внаслідок неконтрольованого стоншення виробу. Під час цього етапу оператор має можливість змінювати критерій зупинки процесу М (блок 14, 17, 18), а у разі необхідності виконати аварійну зупинку процесу травлення (блок 15). Якщо вимірювання підтверджує, що виміряна товщина відповідає заданій, то включається виконавчий механізм підйому виробу із травильного розчину, процес травлення завершено (блок 19, 20, 21). Після цього деталь передається для виконання наступної технологічної операції. У випадку невідповідності, процес повертається до операції вимірювання товщини.

Завершення алгоритму настає після виконання команди на витягнення заготовки, що відповідає вимогам. Такий підхід дозволяє ефективно управляти якістю продукції, мінімізувати ризик виробництва дефектної продукції та оптимізувати виробничий процес.

5.3.2. Контур керування температурою травника

Структурна схема система керування температурою в резервуарі для хімічного травлення представлена на (рис. 5.6).

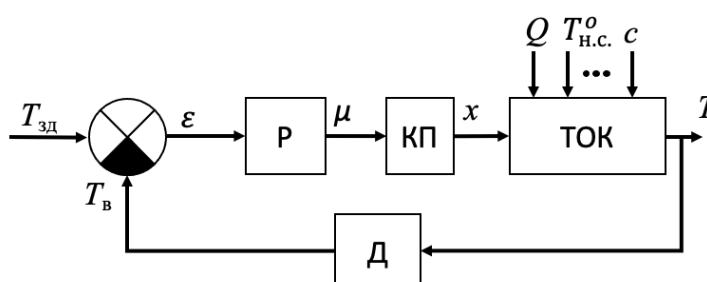


Рис. 5.6. Структурна схема САК температурою розчину в резервуарі

Моделювання системи керування для підтримки заданої температури в резервуарі здійснюється з використанням комплексного підходу, який охоплює встановлення параметрів контролю, вимірювальних пристроїв та виконавчих

механізмів. Система необхідна для стабілізації температури в середині резервуару, відповідно до заздалегідь заданих значень, що вимагає точного вимірювання та ефективного реагування на будь-які відхилення температури.

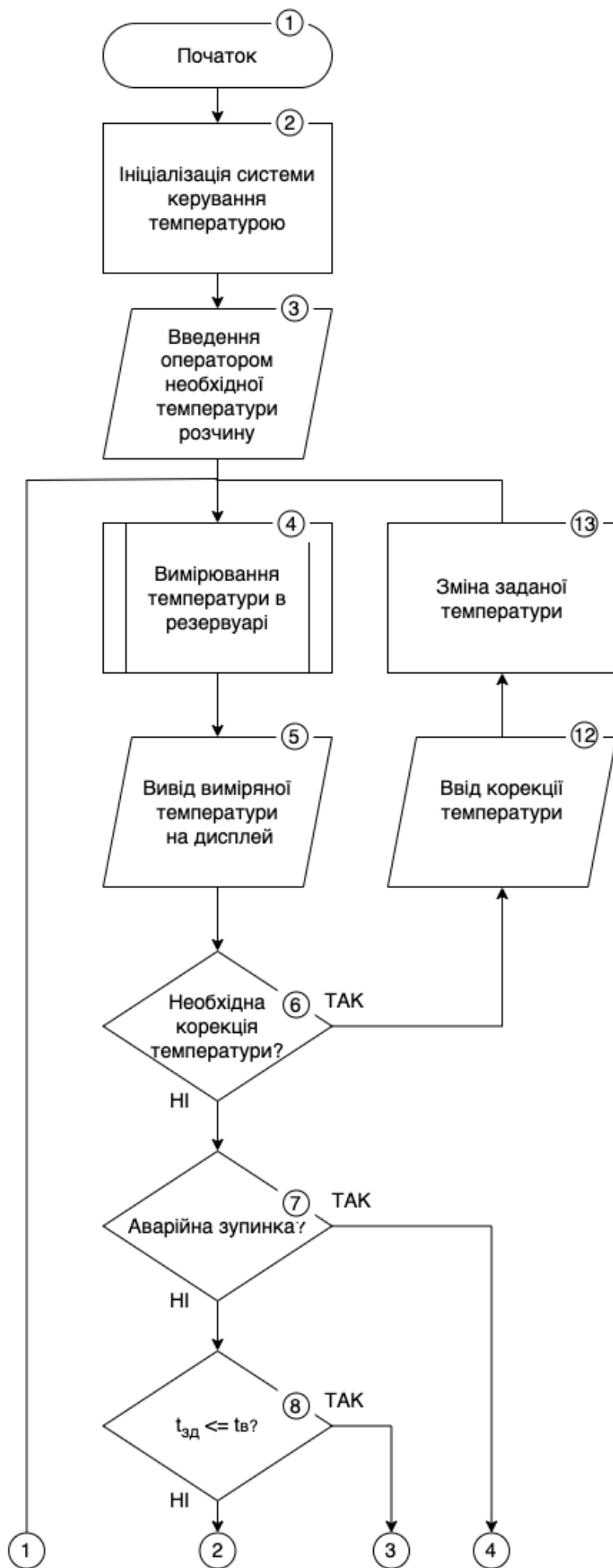
Задана температура травника ($T_{зд}$) встановлюється у контролері системи (наприклад, IDEC FC6A-C16R1CE). За допомогою температурного датчика (Д, наприклад типу NT-PT100), систематично проводиться вимірювання фактичної температури ($T_{в}$) всередині резервуару. Датчик має забезпечувати високу точність вимірювань, що є критично важливим для надійного функціонування системи.

Отримані дані про температуру аналізуються контролером, який визначає величину відхилення температури від заданого рівня. На основі цього аналізу контролер розраховує необхідний керуючий вплив для корекції температури шляхом активації нагрівальних елементів.

Керуючий пристрій системи (нагрівач), забезпечує динамічну реакцію на команди контролера, підтримуючи температуру в межах заданих параметрів. Ефективність системи залежить від швидкості реагування на температурні відхилення, а також від точності вимірювальних та виконавчих компонентів.

Реалізований у системі алгоритм керування температурою (рис. 5.7) розпочинається з етапу ініціалізації, під час якого система налаштовується на початкові умови (блок 1, 2). Після ініціалізації оператор вводить необхідну температуру розчину (блок 3). Далі система вимірює температуру всередині резервуару, що необхідно для підтримання певної швидкості травлення (блок 4).

Отримані дані про температуру виводяться на дисплей (блок 5), що дозволяє оператору здійснити перевірку поточного стану температури. Якщо виявляється потреба у корекції температури, оператор здійснює таку корекцію, що призводить до зміни заданої температури у системі керування (блок 6, 12, 13). Цей процес порівняння заданої та виміряної температур визначає подальші дії системи залежно від результату порівняння. Якщо виміряна температура є меншою за задану (блок 8), система формує керуючий вплив та увімкнення нагрівального елемента для нагрівання травника в резервуарі до необхідного рівня (блок 9, 10).



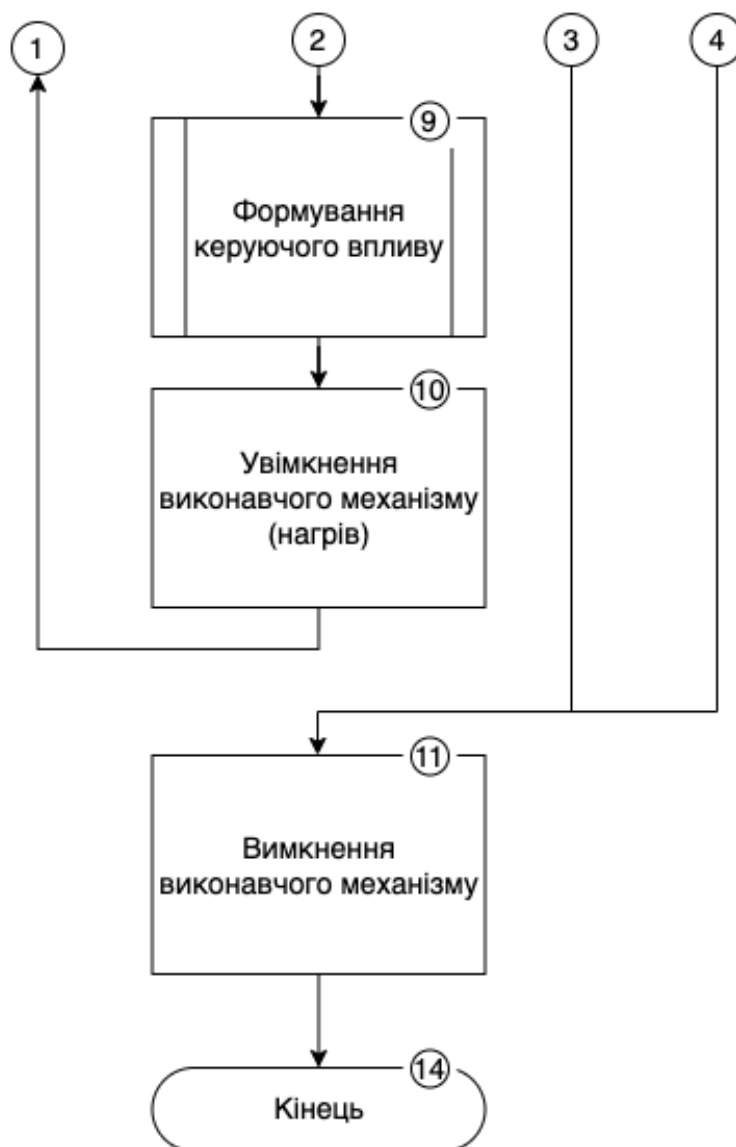


Рис. 5.7. Блок-схема алгоритму керування температурою травника

У випадку, коли виміряна температура вже відповідає або перевищує задане значення, система виконує команду на вимкнення нагрівача (блок 11), щоб запобігти надмірному нагріванню. Такий підхід спрямований на оптимізацію енергоспоживання та підтримку заданого температурного режиму без непотрібних витрат енергії. Також передбачено можливість аварійної зупинки процесу (блок 7), якщо системні показники виходять за межі безпечного функціонування, забезпечуючи додатковий захист обладнання та персоналу.

Висновки до розділу 5

1. У розділі було сформульована та розглянута задача автоматизації процесу хімічного фрезерування виробів з алюмінієвих сплавів, що спрямована на підвищення якості обробки виробів. Для досягнення цієї мети було запропоновано використання двох незалежних контурів САК: товщиною заготовки та температури травника.

2. Розроблена автоматизована система керування технологічним процесом хімічного фрезерування демонструє здатність забезпечувати високу повторюваність технологічного процесу за рахунок адаптації до поточних змін параметрів процесу травлення. Це підвищує якість кінцевих виробів та знижує відсоток браку.

3. Розроблено контур керування товщиною заготовки, який відповідає за формування тривалості експозиції деталі в травнику, дає змогу досягти однорідного видалення матеріалу з поверхні виробу з урахуванням його початкової товщини та забезпечує високу повторюваність процесу ХФ.

4. Розроблено контур керування температурою травника, який забезпечує стабілізацію температурних умов, що є важливим для досягнення заданої швидкості травлення, зменшуючи вплив на неї зовнішніх перепадів температур та інших дестабілізуючих факторів.

5. Впровадження вихрострумового засобу вимірювання з матричними перетворювачами у складі контуру керування товщиною виробу дало змогу реалізувати безконтактне визначення товщини виробу, що сприяє забезпеченню сталої швидкості травлення по всій його поверхні.

Список використаних джерел до розділу 5

1. P. Walker та W. H. Tarn, Ред., CRC Handbook of Metal Etchants. CRC Press, 1990. Дата звернення: 3 берез. 2024. [Онлайн].
Доступно: <https://doi.org/10.1201/9780367803087>
2. M.C. Sanz, US Patent No: 2739047, 1956.
3. O. Çakır, “Chemical etching of aluminium,” J. Mater. Process. Technol., vol. 199, no. 1–3, pp. 337– 340, 2008.D. Allen, Photochemical Machining and Photoforming, London 2015, p. 129.
4. B. Chambers, Met. Finish. 98, 26 (2000).
5. O. Çakır, A. Arat, M.S. Akgün, M. Kahraman, K. Kazan, T. Sis, Y. Uyar, İ.H. Yıldız, in: Proc. 15th Int. Conf. on Machine Design and Production, Denizli (Turkey) 2012, p. 1239.
6. B. Chatterjee, R.W. Thomas, Trans. Inst. Met. Finish. 54, 17 (1976).
7. Y. Okinaka, Etch procedure for aluminum alloys, US Patent No: 4349411, Madison (NJ) 1982.
8. H. Win, T.J. Mori, Plat. Surf. Finish. 67, 53 (1980).
9. D.M. Allen, in: Proc. 2nd Int. & 23rd All India Machine Tool Design Research Conf. (AIMTDR), India 2008, pp. 37.
10. Chemical Machining for Stainless Steel, Aluminum and Copper Sheets at Different Etchant Conditions
11. Etchants for Chemical Machining of Aluminium and Its Alloys
12. Дорофеев А.Л. Индукционная толщинометрия / Дорофеев А.А., Никитин А.И., Рубин А.Л. – М., Энергия, 1978. – 184 с.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-технічну задачу розроблення методів та засобів керування процесом хімічного фрезерування виробів з електропровідних матеріалів на основі технології ВСК з перетворювачами матричного типу.

Отримано такі основні результати:

1. Базуючись на виконаному аналізу процесу хімічного фрезерування встановлено, що технологія матричного ВСК має значний потенціал для використання в АСКТП ХФ виробів з електропровідних матеріалів для отримання вимірювальної інформації про їх товщину. Запропонований формалізований опис процедури вимірювання товщини об'єкту керування в процесі ХФ дав можливість коректно використати технологію матричного ВСК в складі АСКТП ХФ.

2. Запропоновано структуру двоконтурної САК процесу ХФ з контуром керування температурою травника та контуром контролю товщини виробу, перший з яких призначений для підтримання сталої швидкості процесу ХФ, а другий, до складу якого включено засіб ВСК з матричним перетворювачем, забезпечує зупинку процесу ХФ при досягненні виробом необхідної товщини, що в сукупності забезпечує отримання високих показників якості готової продукції.

3. Вперше запропоновано САК з використанням засобів ВСК з матричними перетворювачами, яка включає: концепцію використання матричної технології ВСК; моделі інформаційних сигналів ВСМ; методику опрацювання сигналів ВСМ за допомогою дискретного перетворення Гільберта; методику отримання вторинних інформативних ознак з дискретних фазових характеристик сигналів ВСМ та стратегію їх використання в САК процесу ХФ, що в сукупності забезпечує високу якість та повторюваність процесу хімічного фрезерування електропровідних виробів. Такий підхід може бути використаний і для керування іншими технологічними процесами з обробки електропровідних виробів

4. Запропоновано нові для ВСК інформативні характеристики сигналів ВСМ у вигляді векторів кругових статистик, отриманих з фазової характеристики

сигналів ВСП, що дає змогу враховувати більші обсяги інформації про керований параметр – товщину виробу, і на цій основі зменшити не менше ніж у 2 рази похибку її визначення.

5. Запропоновано математичну модель сигналів ВСМ з гармонічним збудженням її елементів, яка уявляє упорядкований набір одномірних сигналів і відрізняється врахуванням додаткових амплітудних і фазових спотворень сигналів, що дало змогу поглибити розуміння процесу формування сигналів ВСМ та запропонувати операцію їх нормалізації.

6. Розроблена методика та алгоритмічно-програмне забезпечення опрацювання сигналів ВСМ, що ґрунтується на можливостях дискретного перетворення Гільберта, дає змогу отримувати вибірки фази сигналів ВСМ значних обсягів і на цій основі проводити, по-перше, їх статистичне опрацювання з метою підвищення точності фазового методу оцінювання товщини виробу, по-друге, отримувати з фази сигналів нові інформативні ознаки сигналів ВСМ які можуть бути використані для формування керувальних впливів в САК процесу ХФ. В результаті дослідження було розроблено два варіанти структурно-логічних схем автоматизованих систем нормування каналів ВСМ, що містять фільтр Гільберта та синхронні детектори для вирівнювання амплітуднофазових характеристик цих каналів. Це дає змогу підвищити точності формування керуючих сигналів в САК процесу ХФ що забезпечує підвищення загальної якості і надійності процесу.

7. Виготовлено та експериментально досліджено прототип чотириелементного ВСМ з метою врахування отриманих даних в процесі нормалізації характеристик ВСМ. Розбіжність теоретичних та експериментальних характеристик перетворювачів ВСМ не перевищувала 7%. Застосування системи нормалізації зменшувало цю розбіжність до 1%. Розроблено та експериментально досліджено лабораторний зразок системи ВСК на базі платформи Red Pitaya. З'ясовано, що запропонована апаратно-програмна реалізація засобу ВСК дає змогу визначати товщину керувальних об'єктів з розширеною невизначеністю $\sim 6...7$ мкм за рівня довіри 0,95, що достатньо для забезпечення вимог

вимірювання товщини. Засіб ВСК з ВСМ може бути інтегрований в інші АСКТП, сприяючи зниженню браку та збільшенню продуктивності виробництва.

8. Результати теоретичних та експериментальних досліджень засобів вихрострумового контролю з перетворювачами матричного типу впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), а також використані у навчальному процесі кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Технологія електромагнітного неруйнівного контролю».

Додаток А. Акт впровадження від ТОВ «Луцький ремонтний завод «Мотор»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник управління розвитку
підприємства
ТОВ «ІРЗ» «Мотор»



Юрій ГУСЄВ
2023 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційної роботи

Ми, що нижче підписались, головний технолог Михайло КОТИК, заступник директора підприємства з виробництва Олександр МЕЛЬНИЧУК, заступник директора підприємства з якості Олександр ТРЕГУБ складає цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Левченка Олександра Едуардовича використовуються при проведенні відновлення виробів авіаційної техніки на ТОВ «Луцький ремонтний завод «Мотор».

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Оцінювання амплітудних і фазових характеристики сигналів вихрострумів матриць з перетворювачами накладного типу з метою подальшого їх використання для автоматизованого виявлення дефектів виробів авіаційної техніки.	Методика нормування сигналів вихрострумів матриць та їх опрацювання з метою визначення нових для вихрострумової дефектоскопії інформаційних ознак, які обчислюються з фазових характеристик сигналів.

Головний технолог

Михайло КОТИК

Заступник директора
підприємства з виробництва

Олександр МЕЛЬНИЧУК

Заступник директора
підприємства з якості

Олександр ТРЕГУБ

Додаток Б. Акт впровадження в навчальний процес НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

д.т.н., професор Григорій ТИМЧИК

« 17 » 10 2023 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

в навчальному процесі матеріалів дисертаційної роботи
Левченка Олександра Едуардовича

В навчальному процесі кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці бакалаврів зі спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології) (освітня програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні») та в ході розроблення силабусу, конспекту лекцій та практичних робіт з дисципліни «Технологія електромагнітного неруйнівного контролю» були використані такі матеріали кандидатської дисертації О.Е. Левченка:

- принципи організації та конструкції вихрострумових перетворювачі матричного типу та особливості їх використання в автоматизованих системах вихрострумової дефектоскопії;
- структури засобів вихрострумової дефектоскопії з матричними перетворювачами;
- методика та програмне забезпечення, яке реалізує отримання інформаційних ознак сигналів вихрострумових перетворювачів з їх дискретної фазової характеристики, що отримується за допомогою дискретного перетворення Гільберта.

Завідувач кафедри АСНК
д.т.н., доцент

Заступник декана ПБФ
к.т.н., доцент

Доцент кафедри АСНК
к.т.н., доцент

Доцент кафедри АСНК
к.т.н.

Юрій КИРИЧУК

Марина ФІЛІППОВА

Роман ГАЛАГАН

Галина БОГДАН

Додаток В. Код програмного забезпечення засобу ВСК

```

classdef app1 < matlab.apps.AppBase

% Properties that correspond to app components
properties (Access = public)
    UIFigure matlab.ui.Figure
    TabGroup matlab.ui.container.TabGroup
    ComConfigTab matlab.ui.container.Tab
    IPEditField matlab.ui.control.EditField
    IPEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    RPConnectButton matlab.ui.control.Button
    PortEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    PortEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    ScannerconnectionPanel matlab.ui.container.Panel
    StatusLabel matlab.ui.control.Label
    USBSerialportDropDown matlab.ui.control.DropDown
    USBSerialportDropDownLabel matlab.ui.control.Label
    BaudrateDropDown matlab.ui.control.DropDown
    BaudrateDropDownLabel matlab.ui.control.Label
    ConnectButton matlab.ui.control.Button
    RefreshButton matlab.ui.control.Button
    ConnectionStatusLabel matlab.ui.control.Label
    RedPitayaconnectionPanel matlab.ui.container.Panel
    Label4 matlab.ui.control.Label
    Label3 matlab.ui.control.Label
    BoardmodelLabel matlab.ui.control.Label
    BoardnameLabel matlab.ui.control.Label
    Label2 matlab.ui.control.Label
    Label matlab.ui.control.Label
    SCPIstandardversionLabel matlab.ui.control.Label
    RedPitayaSCPIserverIDLabel matlab.ui.control.Label
    MotionConfigTab matlab.ui.container.Tab
    CurrentpositionPanel matlab.ui.container.Panel
    UIAxes3 matlab.ui.control.UIAxes
    ScanareapreviewPanel matlab.ui.container.Panel
    UIAxes matlab.ui.control.UIAxes
    ScannerInfoPanel matlab.ui.container.Panel
    CommandsentEditField matlab.ui.control.EditField
    CommandsentEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    CurrentpositionEditField matlab.ui.control.EditField
    CurrentpositionEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    NumberofremainingpointsEditField matlab.ui.control.EditField
    NumberofremainingpointsLabel_2 matlab.ui.control.Label
    TotalnumberofpointsEditField matlab.ui.control.EditField
    TotalnumberofpointsLabel matlab.ui.control.Label
    ScanareaparametersPanel matlab.ui.container.Panel
    ScanningtypeDropDown matlab.ui.control.DropDown
    ScanningtypeDropDownLabel matlab.ui.control.Label
    IncYEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    IncYEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    IncXEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    IncXEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
    MaxYEditField matlab.ui.control.NumericEditField
    MaxYEditFieldLabel matlab.ui.control.Label

```

```

MaxXEditField matlab.ui.control.NumericEditField
MaxXEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
MeasTab matlab.ui.container.Tab
InputConfigPanel matlab.ui.container.Panel
NoofperiodsEditField matlab.ui.control.NumericEditField
NoofperiodsEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
NosamplesperiodEditField matlab.ui.control.NumericEditField
NosamplesperiodEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
SignalGeneratorConfigPanel matlab.ui.container.Panel
AmplitudeVEditField matlab.ui.control.NumericEditField
AmplitudeVEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
FrequencyHzEditField matlab.ui.control.NumericEditField
FrequencyHzEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
FilePathEditField matlab.ui.control.EditField
FilePathEditFieldLabel matlab.ui.control.Label
SelectfilepathButton matlab.ui.control.Button
StopXYScanButton matlab.ui.control.Button
StartXYScanButton matlab.ui.control.Button
UIAxes2 matlab.ui.control.UIAxes
ManualControlTab matlab.ui.container.Tab
RedPitayamanualcontrolPanel matlab.ui.container.Panel
SendButton_2 matlab.ui.control.Button
CommandInputEditField_2 matlab.ui.control.EditField
CommandInputEditFieldLabel_2 matlab.ui.control.Label
TerminalDisplayTextArea_2 matlab.ui.control.TextArea
TerminalDisplayTextAreaLabel_2 matlab.ui.control.Label
ScannermanualcontrolPanel matlab.ui.container.Panel
SendButton_3 matlab.ui.control.Button
CommandInputEditField_3 matlab.ui.control.EditField
CommandInputEditFieldLabel_3 matlab.ui.control.Label
TerminalDisplayTextArea_3 matlab.ui.control.TextArea
TerminalDisplayTextArea_3Label matlab.ui.control.Label
end

```

```

properties (Access = private)
cncSerial % Description
readTimer % Description
redPitaya
currentPos % Description
filePath = "/Users/oleksandr/Documents"% Description
end
methods (Access = private)
function updateUSBPorts(app)
% Get the list of available serial ports
ports = serialportlist("available");
% Check if there are available ports
if isempty(ports)
app.USBSerialportDropDown.Items = {'No available USB ports'};
app.USBSerialportDropDown.Enable = 'off'; % Disable the dropdown if no ports
are available
else
app.USBSerialportDropDown.Items = ports;
app.USBSerialportDropDown.Enable = 'on'; % Enable the dropdown
end
end
end

```

```

function connectToCNC(app)
% Get the selected port
selectedPort = app.USBSerialportDropDown.Value;
baudRate = str2double(app.BaudrateDropDown.Value);
% Try to establish a connection
try
% Create a serial object
app.cncSerial = serialport(selectedPort, baudRate, 'Timeout', 120); % Baud
rate might vary, adjust as needed
configureTerminator(app.cncSerial, 'CR/LF')

% Send an initial command to check connection (e.g., request GRBL version)
write(app.cncSerial, "$I" + newline, "string");
pause(0.5); % Wait for a response
response = readline(app.cncSerial);
response = readline(app.cncSerial);
% Check if the response contains 'GRBL 1.1f' to verify the connection
if contains(response, '1.1f')
app.ConnectionStatusLabel.Text = 'Connected successfully to GRBL 1.1f';
app.ConnectionStatusLabel.Visible = true;
else
app.ConnectionStatusLabel.Text = 'Connected, but not to GRBL 1.1f';
app.ConnectionStatusLabel.Visible = true;
end

catch ME
app.ConnectionStatusLabel.Text = ['Error: ' ME.message];
end
end
function readSerialData(app)
% Check if app.cncSerial exists and is valid
if ~isfield(app, 'cncSerial') || ~isvalid(app.cncSerial)
disp('app.cncSerial is either non-existent or invalid.');
```

```

return;
end
if app.cncSerial.NumBytesAvailable > 0
response = readline(app.cncSerial);
app.TerminalDisplayTextArea.Value = [app.TerminalDisplayTextArea.Value;
{'Received: ' response}];
end
end
function updatePlot(app, currentPos)
plot(app.UIAxes3, currentPos(1), currentPos(2), 'ro');
axis(app.UIAxes3, [0 app.MaxXEditField.Value 0 app.MaxYEditField.Value]); %
set axes limits
grid(app.UIAxes3, 'on'); % show grid
xlabel(app.UIAxes3, 'X');
ylabel(app.UIAxes3, 'Y');
drawnow;
end
function initCnc(app)
command = 'G21';
app.CommandsentEditField.Value = command;
writeread(app.cncSerial, command)

```

```

pause(0.5)
command = 'G90';
app.CommandsEditField.Value = command;
writeread(app.cncSerial, command)
pause(0.5)
command = 'G92 X0 Y0';
app.CommandsEditField.Value = command;
writeread(app.cncSerial, command)
pause(0.5)
command = 'G01 F2000';
app.CommandsEditField.Value = command;
writeread(app.cncSerial, command)
pause(0.5)
end
function results = readSignal(app)
flush(app.redPitaya);
% Reset Generation and Acquisition
writeline(app.redPitaya, 'GEN:RST'); % Reset Generator & Acquisition
writeline(app.redPitaya, 'ACQ:RST');
%% GENERATION
writeline(app.redPitaya, 'SOUR1:FUNC SINE');
writeline(app.redPitaya, 'SOUR1:FREQ:FIX 1000000'); % Set frequency of output
signal
writeline(app.redPitaya, 'SOUR1:VOLT 1'); % Set amplitude of output signal
writeline(app.redPitaya, 'SOUR1:BURS:STAT BURST'); % Set burst mode to BURST
writeline(app.redPitaya, 'SOUR1:BURS:NCYC 3'); % Set 3 pulses of sine wave
%% ACQUISITION
writeline(app.redPitaya, 'ACQ:DEC 1');
writeline(app.redPitaya, 'ACQ:TRIG:LEV 0');
writeline(app.redPitaya, 'ACQ:TRIG:DLY 0');
%% Start gen % acq

writeline(app.redPitaya, 'ACQ:START');
pause(1);
writeline(app.redPitaya, 'ACQ:TRIG AWG_PE');
writeline(app.redPitaya, 'OUTPUT1:STATE ON'); % Set output to ON
pause(1);
writeline(app.redPitaya, 'SOUR1:TRIG:INT');
%% Wait for trigger
while 1
trig_rsp = writeread(app.redPitaya, 'ACQ:TRIG:STAT?')
if strcmp('TD', trig_rsp(1:2))
break;
end
end
% wait for fill adc buffer
while 1
fill_state = writeread(app.redPitaya, 'ACQ:TRIG:FILL?')
if strcmp('1', fill_state(1:1))
break;
end
end
signal_str = writeread(app.redPitaya, 'ACQ:SOUR1:DATA?');
signal_num = str2num(signal_str(1, 2:length(signal_str) - 3));
results = signal_num;

```

```

end
function isValid = isValidCoordinate(app, x, y)
isValid = x >= 1 && x <= 15 && y >= 1 && y <= 15;
end
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Code that executes after component creation
function AppStartup(app)
ScanningTypeChangedFcn(app);
updateUSBPorts(app);
app.FilepathEditField.Value = app.filePath;
end

% Value changed function: MaxXEditField
function MaxXEditFieldValueChanged(app, event)
ScanningTypeChangedFcn(app, event);
end

% Value changed function: MaxYEditField
function MaxYEditFieldValueChanged(app, event)
ScanningTypeChangedFcn(app, event);
end

% Button pushed function: RefreshButton
function RefreshButtonPushed(app, event)
updateUSBPorts(app);
end

% Button pushed function: ConnectButton
function ConnectButtonPushed(app, event)
connectToCNC(app);
end

% Close request function: UIFigure
function UIFigureCloseRequest(app, event)
if isfield(app, 'cncSerial') && isValid(app.cncSerial)
fclose(app.cncSerial);
delete(app.cncSerial);
end
%if isValid(app.readTimer)
% stop(app.readTimer);
% delete(app.readTimer);
%end
clear app.redPitaya;
delete(app)
end

```

```

% Button pushed function: SendButton_3
function SendButtonPushed(app, event)
% Get command from EditField
command = app.CommandInputEditField.Value;
% Send command to CNC via serial port
try
write(app.cncSerial, command + newline, "string");
% Append command to TerminalDisplay
app.TerminalDisplayTextArea.Value = [app.CommandInputEditField.Value; {'Sent: '
' command'}];
catch ME
% Handle errors (e.g., if the serial port is not open)
app.TerminalDisplayTextArea.Value = [app.CommandInputEditField.Value;
{'Error: ' ME.message}];
end
% Clear the CommandInput field
app.CommandInputEditField.Value = '';
end

% Button pushed function: StartXYScanButton
function StartXYScanButtonPushed(app, event)
maxX = app.MaxXEditField.Value;
maxY = app.MaxYEditField.Value;
incX = app.IncXEditField.Value;
incY = app.IncYEditField.Value;
signalLength = pow2(14);
data = struct();
initCnc(app);
% Generate snake trajectory
y = 0;
count = 1;
while y <= maxY
if mod(y, (2*incY)) == 0 % Even rows
for x = 0:incX:maxX
command = sprintf('G01 X%.2f Y%.2f', x, y)
app.CommandsentEditField.Value = command;
writeread(app.cncSerial, command)
count = count + 1;
pause(0.1)
app.currentPos = [x, y];
app.CurrentpositionEditField.Value = sprintf('X%.2f Y%.2f', x, y);
updatePlot(app, app.currentPos)
% Read signal from RedPitaya
signal = readSignal(app);
data(x+1,y+1).signal = signal;
end
else % Odd rows
for x = maxX:-incX:0
command = sprintf('G01 X%.2f Y%.2f', x, y)
app.CommandsentEditField.Value = command;
writeread(app.cncSerial, command)
count = count + 1;
pause(0.1)

```

```

app.currentPos = [x, y];
app.CurrentpositionEditField.Value = sprintf('X%.2f Y%.2f', x, y);
updatePlot(app, app.currentPos)
% Read signal from RedPitaya
signal = readSignal(app);
data(x+1,y+1).signal = signal;
end
end
y = y + incY;
end
save('scanData.mat', 'data');
% Зчитування даних з файлу
loadedData = load('scanData.mat');
% Відображення C-скану (приклад)
cScanImage = zeros(maxX, maxY);
for x = 1:maxX
for y = 1:maxY
% Визначення значення для C-скану (може варіюватися в залежності від аналізу
сигналу)
cScanImage(x, y) = mean(loadedData.data(x,y).signal); % Наприклад,
використання середнього значення сигналу
end
end

% Візуалізація C-скану
imagesc(app.UIAxes2, cScanImage);
%colorbar(app.UIAxes2);
colormap(app.UIAxes2, jet); % Apply a colormap
app.UIAxes2.XLim = [1 maxX];
app.UIAxes2.YLim = [1 maxY];
app.UIAxes2.Title.String = 'Eddy current C-image';
app.UIAxes2.XLabel.String = 'X (mm)';
app.UIAxes2.YLabel.String = 'Y (mm)';
end

% Button pushed function: SelectfilepathButton
function SelectFilePathButtonPushed(app, event)
[file,path,indx] = uiputfile('scanData.m');
app.FilepathEditField.Value = path;
end

% Button pushed function: RPConnectButton
function RpConnectButtonPushedFnc(app, event)
IP = '169.254.12.111'; % Input IP of your Red Pitaya...
port = 5000;
app.redPitaya = tcpclient(IP, port);
app.redPitaya.ByteOrder = "big-endian";
configureTerminator(app.redPitaya, 'CR/LF');
app.Label.Text = writeread(app.redPitaya, '*IDN?');
app.Label.Visible = true;
app.Label2.Text = writeread(app.redPitaya, 'SYSTem:VERSion?');
app.Label2.Visible = true;
app.Label3.Text = writeread(app.redPitaya, 'SYSTem:BRD:Name?');

```

```

app.Label3.Visible = true;
app.Label4.Text = writeread(app.redPitaya, 'SYSTEM:BRD:ID?');
app.Label4.Visible = true;
end

% Value changed function: ScanningtypeDropDown
function ScanningTypeChangedFcn(app, event)
maxX = app.MaxXEditField.Value;
maxY = app.MaxYEditField.Value;
incX = app.IncXEditField.Value * 10;
incY = app.IncYEditField.Value * 10;
% Generate grid of points based on user input
switch app.ScanningtypeDropDown.Value
case 'Raster Scan'
% Call function for Raster Scan
X = reshape(repmat((0:incX:maxX)', 1, ceil((maxY+1)/incY)), [], 1);
Y = reshape(repmat(0:incY:maxY, ceil((maxX+1)/incX), 1), [], 1);
case 'Column-major Order'
% Call function for Column-major Order
X = reshape(repmat(0:incX:maxX, ceil((maxY+1)/incY), 1), [], 1);
Y = reshape(repmat((0:incY:maxY)', 1, ceil((maxX+1)/incX)), [], 1);
case 'Boustrophedon'
% Call function for Boustrophedon
numRows = maxY / incY;
numCols = maxX / incX;
X = [];
Y = [];
for i = 0:incY:maxY
if mod(i/incY, 2) == 0
X = [X; ((0:incX:maxX)')];
Y = [Y; repmat(i, [numCols+1, 1])];
else
X = [X; ((maxX:-incX:0)')];
Y = [Y; repmat(i, [numCols+1, 1])];
end
end
otherwise
error('Unknown selection');
end
% Plot the grid on the axes
plot(app.UIAxes, X, Y, '-o'); % blue dots for each point
axis(app.UIAxes, [0 maxX 0 maxY]); % set axes limits
grid(app.UIAxes, 'on'); % show grid
xlabel(app.UIAxes, 'X');
ylabel(app.UIAxes, 'Y');
title(app.UIAxes, 'Scanned Area Preview');
end

% Button down function: MotionConfigTab
function MotionConfigTabButtonDown(app, event)
ScanningTypeChangedFcn(app, event);
end

```

```

% Button down function: MeasTab
function MeasTabButtonDown(app, event)
% Define the dimensions of the heatmap
xMax = 100;
yMax = 100;
maxVoltage = 12; % maximum voltage
randomVoltageData = rand(yMax, xMax) * maxVoltage;
% Interpolate data for a smoother effect
[x, y] = meshgrid(1:xMax, 1:yMax);
newRes = 300; % New resolution
[xq, yq] = meshgrid(linspace(1, xMax, newRes), linspace(1, yMax, newRes));
smoothVoltageData = interp2(x, y, randomVoltageData, xq, yq, 'cubic');
    % Create the heatmap in the UI axes
    imagesc(app.UIAxes2, smoothVoltageData);
    colormap(app.UIAxes2, jet); % Apply a colormap

    % Add a color bar to the UI axes
    colorbar(app.UIAxes2);

    % Update UI Axes properties
    app.UIAxes2.XLim = [1 newRes];
    app.UIAxes2.YLim = [1 newRes];
    app.UIAxes2.Title.String = 'Eddy current C-image';
    app.UIAxes2.XLabel.String = 'X (mm)';
    app.UIAxes2.YLabel.String = 'Y (mm)';
end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

    % Create UIFigure and components
    function createComponents(app)

        % Create UIFigure and hide until all components are created
        app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
        app.UIFigure.Position = [100 100 759 478];
        app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';
        app.UIFigure.CloseRequestFcn = createCallbackFcn(app,
@UIFigureCloseRequest, true);

        % Create TabGroup
        app.TabGroup = uitabgroup(app.UIFigure);
        app.TabGroup.Position = [1 0 759 479];

        % Create ComConfigTab
        app.ComConfigTab = uitab(app.TabGroup);
        app.ComConfigTab.Title = 'Com. Config';

        % Create Label4
        app.Label4 = uilabel(app.RedPitayaconnectionPanel);

```

```

app.Label4.Visible = 'off';
app.Label4.Position = [414 10 267 22];
app.Label4.Text = 'Label4';

% Create ScannerconnectionPanel
app.ScannerconnectionPanel = uipanel(app.ComConfigTab);
app.ScannerconnectionPanel.Title = 'Scanner connection';
app.ScannerconnectionPanel.Position = [12 321 730 112];

% Create ConnectionStatusLabel
app.ConnectionStatusLabel = uilabel(app.ScannerconnectionPanel);
app.ConnectionStatusLabel.Visible = 'off';
app.ConnectionStatusLabel.Position = [425 41 250 20];
app.ConnectionStatusLabel.Text = 'ConnectionStatusLabel';

% Create RefreshButton
app.RefreshButton = uibutton(app.ScannerconnectionPanel, 'push');
app.RefreshButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@RefreshButtonPushed, true);
app.RefreshButton.Position = [297 59 100 22];
app.RefreshButton.Text = 'Refresh';

% Create ConnectButton
app.ConnectButton = uibutton(app.ScannerconnectionPanel, 'push');
app.ConnectButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ConnectButtonPushed, true);
app.ConnectButton.Position = [298 21 100 22];
app.ConnectButton.Text = 'Connect';

% Create BaudrateDropDownLabel
app.BaudrateDropDownLabel = uilabel(app.ScannerconnectionPanel);
app.BaudrateDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.BaudrateDropDownLabel.Position = [47 21 55 22];
app.BaudrateDropDownLabel.Text = 'Baudrate';

% Create BaudrateDropDown
app.BaudrateDropDown = uidropdown(app.ScannerconnectionPanel);
app.BaudrateDropDown.Items = {'250000', '230400', '115200',
'57600', '38400', '19200', '9600'};
app.BaudrateDropDown.Position = [117 21 156 22];
app.BaudrateDropDown.Value = '115200';

% Create USBSerialportDropDownLabel
app.USBSerialportDropDownLabel = uilabel(app.ScannerconnectionPanel);
app.USBSerialportDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.USBSerialportDropDownLabel.Position = [13 59 89 22];
app.USBSerialportDropDownLabel.Text = 'USB/Serial port';

```

```

% Create USBSerialportDropDown
app.USBSerialportDropDown = uiddropdown(app.ScannerconnectionPanel);
app.USBSerialportDropDown.Position = [117 59 156 22];

% Create StatusLabel
app.StatusLabel = uilabel(app.ScannerconnectionPanel);
app.StatusLabel.Position = [424 59 43 22];
app.StatusLabel.Text = 'Status: ';

% Create PortEditFieldLabel
app.PortEditFieldLabel = uilabel(app.ComConfigTab);
app.PortEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PortEditFieldLabel.Position = [35 231 28 22];
app.PortEditFieldLabel.Text = 'Port';

% Create PortEditField
app.PortEditField = uieditfield(app.ComConfigTab, 'numeric');
app.PortEditField.Limits = [0 Inf];
app.PortEditField.Position = [78 231 100 22];
app.PortEditField.Value = 5000;

% Create RPConnectButton
app.RPConnectButton = uibutton(app.ComConfigTab, 'push');
app.RPConnectButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@RpConnectButtonPushedFcn, true);
app.RPConnectButton.Position = [206 260 100 22];
app.RPConnectButton.Text = 'RP Connect';

% Create IPEditFieldLabel
app.IPEditFieldLabel = uilabel(app.ComConfigTab);
app.IPEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.IPEditFieldLabel.Position = [38 260 25 22];
app.IPEditFieldLabel.Text = 'IP';

% Create IPEditField
app.IPEditField = uieditfield(app.ComConfigTab, 'text');
app.IPEditField.Position = [78 260 100 22];
app.IPEditField.Value = 'rp-f0698a.local';

% Create MotionConfigTab
app.MotionConfigTab = uitab(app.TabGroup);
app.MotionConfigTab.Title = 'Motion Config.';
app.MotionConfigTab.ButtonDownFcn = createCallbackFcn(app,
@MotionConfigTabButtonDown, true);

% Create ScanareaparametersPanel
app.ScanareaparametersPanel = uipanel(app.MotionConfigTab);
app.ScanareaparametersPanel.Title = 'Scan area parameters';

```

```
app.ScanareaparametersPanel.Position = [18 314 353 126];
```

```
% Create MaxXEditFieldLabel
```

```
app.MaxXEditFieldLabel = uilabel(app.ScanareaparametersPanel);
app.MaxXEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MaxXEditFieldLabel.Position = [12 75 39 22];
app.MaxXEditFieldLabel.Text = 'Max X';
```

```
% Create MaxXEditField
```

```
app.MaxXEditField = uieditfield(app.ScanareaparametersPanel, 'numeric');
app.MaxXEditField.Limits = [0 Inf];
app.MaxXEditField.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@MaxXEditFieldValueChanged, true);
app.MaxXEditField.Position = [66 75 100 22];
app.MaxXEditField.Value = 30;
```

```
% Create MaxYEditFieldLabel
```

```
app.MaxYEditFieldLabel = uilabel(app.ScanareaparametersPanel);
app.MaxYEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MaxYEditFieldLabel.Position = [13 42 40 22];
app.MaxYEditFieldLabel.Text = 'Max Y';
```

```
% Create MaxYEditField
```

```
app.MaxYEditField = uieditfield(app.ScanareaparametersPanel, 'numeric');
app.MaxYEditField.Limits = [0 Inf];
app.MaxYEditField.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@MaxYEditFieldValueChanged, true);
app.MaxYEditField.Position = [68 42 100 22];
app.MaxYEditField.Value = 30;
```

```
% Create IncXEditFieldLabel
```

```
app.IncXEditFieldLabel = uilabel(app.ScanareaparametersPanel);
app.IncXEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.IncXEditFieldLabel.Position = [180 75 32 22];
app.IncXEditFieldLabel.Text = 'Inc X';
```

```
% Create IncXEditField
```

```
app.IncXEditField = uieditfield(app.ScanareaparametersPanel, 'numeric');
app.IncXEditField.Position = [227 75 100 22];
app.IncXEditField.Value = 1;
```

```
% Create IncYEditFieldLabel
```

```
app.IncYEditFieldLabel = uilabel(app.ScanareaparametersPanel);
app.IncYEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.IncYEditFieldLabel.Position = [180 42 33 22];
app.IncYEditFieldLabel.Text = 'Inc Y';
```

```
% Create IncYEditField
```

```

app.IncYEditField = uieditfield(app.ScanareaparametersPanel, 'numeric');
app.IncYEditField.Position = [228 42 100 22];
app.IncYEditField.Value = 1;

% Create ScanningtypeDropDownLabel
app.ScanningtypeDropDownLabel = uilabel(app.ScanareaparametersPanel);
app.ScanningtypeDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ScanningtypeDropDownLabel.Position = [13 11 82 22];
app.ScanningtypeDropDownLabel.Text = 'Scanning type';

% Create ScanningtypeDropDown
app.ScanningtypeDropDown = uidropdown(app.ScanareaparametersPanel);
app.ScanningtypeDropDown.Items = {'Raster Scan', 'Column-major Order',
'Boustrophedon'};
app.ScanningtypeDropDown.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@ScanningTypeChangedFcn, true);
app.ScanningtypeDropDown.Position = [110 11 215 22];
app.ScanningtypeDropDown.Value = 'Boustrophedon';

% Create ScannerInfoPanel
app.ScannerInfoPanel = uipanel(app.MotionConfigTab);
app.ScannerInfoPanel.Title = 'Scanner Info';
app.ScannerInfoPanel.Position = [388 304 354 136];

% Create TotalnumberofpointsLabel
app.TotalnumberofpointsLabel = uilabel(app.ScannerInfoPanel);
app.TotalnumberofpointsLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TotalnumberofpointsLabel.Position = [44 92 129 22];
app.TotalnumberofpointsLabel.Text = 'Total number of points: ';

% Create TotalnumberofpointsEditField
app.TotalnumberofpointsEditField = uieditfield(app.ScannerInfoPanel, 'text');
app.TotalnumberofpointsEditField.Editable = 'off';
app.TotalnumberofpointsEditField.Position = [188 92 151 22];
app.TotalnumberofpointsEditField.Value = '10000';

% Create NumberofremainingpointsLabel_2
app.NumberofremainingpointsLabel_2 = uilabel(app.ScannerInfoPanel);
app.NumberofremainingpointsLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.NumberofremainingpointsLabel_2.Position = [14 65 158 22];
app.NumberofremainingpointsLabel_2.Text = 'Number of remaining points: ';

% Create NumberofremainingpointsEditField
app.NumberofremainingpointsEditField = uieditfield(app.ScannerInfoPanel,
'text');
app.NumberofremainingpointsEditField.Editable = 'off';
app.NumberofremainingpointsEditField.Position = [187 65 152 22];
app.NumberofremainingpointsEditField.Value = '10000';

```

```

% Create CurrentpositionEditFieldLabel
app.CurrentpositionEditFieldLabel = uilabel(app.ScannerInfoPanel);
app.CurrentpositionEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.CurrentpositionEditFieldLabel.Position = [78 38 95 22];
app.CurrentpositionEditFieldLabel.Text = 'Current position: ';

% Create CurrentpositionEditField
app.CurrentpositionEditField = uieditfield(app.ScannerInfoPanel, 'text');
app.CurrentpositionEditField.Editable = 'off';
app.CurrentpositionEditField.Position = [188 38 151 22];
app.CurrentpositionEditField.Value = 'X0 Y0';

% Create CommandsentEditFieldLabel
app.CommandsentEditFieldLabel = uilabel(app.ScannerInfoPanel);
app.CommandsentEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.CommandsentEditFieldLabel.Position = [83 9 91 22];
app.CommandsentEditFieldLabel.Text = 'Command sent: ';

% Create CommandsentEditField
app.CommandsentEditField = uieditfield(app.ScannerInfoPanel, 'text');
app.CommandsentEditField.Editable = 'off';
app.CommandsentEditField.Position = [189 9 150 22];
app.CommandsentEditField.Value = 'G21';

% Create ScanareapreviewPanel
app.ScanareapreviewPanel = uipanel(app.MotionConfigTab);
app.ScanareapreviewPanel.Title = 'Scan area preview';
app.ScanareapreviewPanel.Position = [18 14 355 284];

% Create UIAxes
app.UIAxes = uiaxes(app.ScanareapreviewPanel);
title(app.UIAxes, 'Title')
xlabel(app.UIAxes, 'X')
ylabel(app.UIAxes, 'Y')
zlabel(app.UIAxes, 'Z')
app.UIAxes.XGrid = 'on';
app.UIAxes.YGrid = 'on';
app.UIAxes.Position = [13 11 312 248];

% Create CurrentpositionPanel
app.CurrentpositionPanel = uipanel(app.MotionConfigTab);
app.CurrentpositionPanel.Title = 'Current position';
app.CurrentpositionPanel.Position = [387 14 355 284];

% Create UIAxes3
app.UIAxes3 = uiaxes(app.CurrentpositionPanel);
title(app.UIAxes3, 'Current position')
xlabel(app.UIAxes3, 'X')
ylabel(app.UIAxes3, 'Y')

```

```

zlabel(app.UIAxes3, 'Z')
app.UIAxes3.XGrid = 'on';
app.UIAxes3.YGrid = 'on';
app.UIAxes3.Position = [7 11 312 248];

% Create MeasTab
app.MeasTab = uitab(app.TabGroup);
app.MeasTab.Title = 'Meas';
app.MeasTab.ButtonDownFcn = createCallbackFcn(app, @MeasTabButtonDown, true);

% Create UIAxes2
app.UIAxes2 = uiaxes(app.MeasTab);
title(app.UIAxes2, 'Title')
xlabel(app.UIAxes2, 'X')
ylabel(app.UIAxes2, 'Y')
zlabel(app.UIAxes2, 'Z')
app.UIAxes2.Position = [285 116 412 324];

% Create StartXYScanButton
app.StartXYScanButton = uibutton(app.MeasTab, 'push');
app.StartXYScanButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@StartXYScanButtonPushed, true);
app.StartXYScanButton.Position = [26 218 100 22];
app.StartXYScanButton.Text = 'Start XY Scan';

% Create StopXYScanButton
app.StopXYScanButton = uibutton(app.MeasTab, 'push');
app.StopXYScanButton.Position = [153 218 100 22];
app.StopXYScanButton.Text = 'Stop XY Scan';

% Create SelectfilepathButton
app.SelectfilepathButton = uibutton(app.MeasTab, 'push');
app.SelectfilepathButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@SelectFilePathButtonPushed, true);
app.SelectfilepathButton.Position = [330 79 100 22];
app.SelectfilepathButton.Text = {'Select file path'; ''};

% Create FilepathEditFieldLabel
app.FilepathEditFieldLabel = uilabel(app.MeasTab);
app.FilepathEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.FilepathEditFieldLabel.Position = [16 79 52 22];
app.FilepathEditFieldLabel.Text = 'File path';

% Create FilepathEditField
app.FilepathEditField = uieditfield(app.MeasTab, 'text');
app.FilepathEditField.Eitable = 'off';
app.FilepathEditField.Position = [83 79 235 22];
app.FilepathEditField.Value = '/Users/oleksandr/Documents';

```

```

% Create SignalGeneratorConfigPanel
app.SignalGeneratorConfigPanel = uipanel(app.MeasTab);
app.SignalGeneratorConfigPanel.Title = 'Signal Generator Config';
app.SignalGeneratorConfigPanel.Position = [18 260 247 83];

% Create FrequencyHzEditFieldLabel
app.FrequencyHzEditFieldLabel = uilabel(app.SignalGeneratorConfigPanel);
app.FrequencyHzEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.FrequencyHzEditFieldLabel.Position = [16 6 86 22];
app.FrequencyHzEditFieldLabel.Text = 'Frequency (Hz)';

% Create FrequencyHzEditField
app.FrequencyHzEditField = uieditfield(app.SignalGeneratorConfigPanel,
'numeric');
app.FrequencyHzEditField.Limits = [0 62500000];
app.FrequencyHzEditField.Position = [117 6 100 22];
app.FrequencyHzEditField.Value = 1000;

% Create AmplitudeVEditFieldLabel
app.AmplitudeVEditFieldLabel = uilabel(app.SignalGeneratorConfigPanel);
app.AmplitudeVEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.AmplitudeVEditFieldLabel.Position = [25 32 77 22];
app.AmplitudeVEditFieldLabel.Text = 'Amplitude (V)';

% Create AmplitudeVEditField
app.AmplitudeVEditField = uieditfield(app.SignalGeneratorConfigPanel,
'numeric');
app.AmplitudeVEditField.Limits = [-1 1];
app.AmplitudeVEditField.Position = [117 32 100 22];
app.AmplitudeVEditField.Value = 1;

% Create InputConfigPanel
app.InputConfigPanel = uipanel(app.MeasTab);
app.InputConfigPanel.Title = 'Input Config';
app.InputConfigPanel.Position = [15 356 250 86];

% Create NosamplesperiodEditFieldLabel
app.NosamplesperiodEditFieldLabel = uilabel(app.InputConfigPanel);
app.NosamplesperiodEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.NosamplesperiodEditFieldLabel.Position = [14 35 108 22];
app.NosamplesperiodEditFieldLabel.Text = 'No samples/period';

% Create NosamplesperiodEditField
app.NosamplesperiodEditField = uieditfield(app.InputConfigPanel, 'numeric');
app.NosamplesperiodEditField.Position = [137 35 100 22];
app.NosamplesperiodEditField.Value = 30;

% Create NoofperiodsEditFieldLabel

```

```

app.NoofperiodsEditFieldLabel = uilabel(app.InputConfigPanel);
app.NoofperiodsEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.NoofperiodsEditFieldLabel.Position = [45 8 78 22];
app.NoofperiodsEditFieldLabel.Text = 'No of periods';

% Create NoofperiodsEditField
app.NoofperiodsEditField = uieditfield(app.InputConfigPanel, 'numeric');
app.NoofperiodsEditField.Position = [138 8 100 22];
app.NoofperiodsEditField.Value = 15;

% Create ManualControlTab
app.ManualControlTab = uitab(app.TabGroup);
app.ManualControlTab.Title = 'Manual Control';

% Create ScannermanualcontrolPanel
app.ScannermanualcontrolPanel = uipanel(app.ManualControlTab);
app.ScannermanualcontrolPanel.Title = 'Scanner manual control';
app.ScannermanualcontrolPanel.Position = [23 313 466 119];

% Create TerminalDisplayTextArea_3Label
app.TerminalDisplayTextArea_3Label = uilabel(app.ScannermanualcontrolPanel);
app.TerminalDisplayTextArea_3Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.TerminalDisplayTextArea_3Label.Position = [14 72 93 22];
app.TerminalDisplayTextArea_3Label.Text = 'Terminal Display';

% Create TerminalDisplayTextArea_3
app.TerminalDisplayTextArea_3 = uitextarea(app.ScannermanualcontrolPanel);
app.TerminalDisplayTextArea_3.Position = [122 45 324 51];

% Create CommandInputEditFieldLabel_3
app.CommandInputEditFieldLabel_3 = uilabel(app.ScannermanualcontrolPanel);
app.CommandInputEditFieldLabel_3.HorizontalAlignment = 'right';
app.CommandInputEditFieldLabel_3.Position = [19 8 92 22];
app.CommandInputEditFieldLabel_3.Text = 'Command Input';

% Create CommandInputEditField_3
app.CommandInputEditField_3 = uieditfield(app.ScannermanualcontrolPanel,
'text');
app.CommandInputEditField_3.Position = [124 8 214 22];

% Create SendButton_3
app.SendButton_3 = uibutton(app.ScannermanualcontrolPanel, 'push');
app.SendButton_3.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @SendButtonPushed,
true);
app.SendButton_3.Position = [347 8 100 22];
app.SendButton_3.Text = 'Send';

```

```

% Create RedPitayamanualcontrolPanel
app.RedPitayamanualcontrolPanel = uipanel(app.ManualControlTab);
app.RedPitayamanualcontrolPanel.Title = 'Red Pitaya manual control';
app.RedPitayamanualcontrolPanel.Position = [24 179 466 119];

% Create TerminalDisplayTextAreaLabel_2
app.TerminalDisplayTextAreaLabel_2 = uilabel(app.RedPitayamanualcontrolPanel);
app.TerminalDisplayTextAreaLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.TerminalDisplayTextAreaLabel_2.Position = [8 66 93 22];
app.TerminalDisplayTextAreaLabel_2.Text = 'Terminal Display';

% Create TerminalDisplayTextArea_2
app.TerminalDisplayTextArea_2 = uitextarea(app.RedPitayamanualcontrolPanel);
app.TerminalDisplayTextArea_2.Position = [116 39 324 51];

% Create CommandInputEditFieldLabel_2
app.CommandInputEditFieldLabel_2 = uilabel(app.RedPitayamanualcontrolPanel);
app.CommandInputEditFieldLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.CommandInputEditFieldLabel_2.Position = [11 9 92 22];
app.CommandInputEditFieldLabel_2.Text = 'Command Input';

% Create CommandInputEditField_2
app.CommandInputEditField_2 = uieditfield(app.RedPitayamanualcontrolPanel,
'text');
app.CommandInputEditField_2.Position = [116 9 214 22];

% Create SendButton_2
app.SendButton_2 = uibutton(app.RedPitayamanualcontrolPanel, 'push');
app.SendButton_2.Position = [340 9 100 22];
app.SendButton_2.Text = 'Send';

% Show the figure after all components are created
app.UIFigure.Visible = 'on';
end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = app1

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer

```

```
registerApp(app, app.UIFigure)

% Execute the startup function
runStartupFcn(app, @AppStartup)

if nargin == 0
clear app
end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.UIFigure)
end
end
end
```