

І. М. Бучма

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра комп’ютеризованих систем автоматики

## **КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ІНФРАНИЗЬКОЧАСТОТНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ**

© Бучма І. М., 2015

**Розглянуто проблеми створення цифрових інфранизькочастотних вихрострумів вимірювально-обчислювальних засобів кіберфізичних систем, метрологічні характеристики яких відповідали б сучасним вимогам до діагностичних засобів та пошукових систем.**

**Ключові слова:** пошукові системи, діагностичні системи, цифрове вимірювання фази, кіберфізичні системи.

## **BUILDING CONCEPT LOW FREQUENCY EDDY CURRENT MEASUREMENT AND COMPUTATIONAL TOOLS OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS**

© Buchma I., 2015

**The problems of digital at low frequency eddy current measurement and computational tools of cyber-physical systems, metrological characteristics which meet modern requirements for diagnostic tools and search engines are discussed.**

**Key words:** the search engines, diagnostic systems, digital measurement phase, cyber-physical systems.

### **Вступ**

Сьогодні значні зусилля прикладних наук скеровані на дослідження, пов’язані із створенням та розвитком складних кіберфізичних систем (КФС), у структурі яких важливу роль виконує мережа окремих вимірювально-обчислювальних засобів. Вони, взаємодіючи з фізичним світом, отримують важливу інформацію про його стан. Отримана і зашифрована інформація, опрацьована на різних рівнях КФС, передається стандартними каналами зв’язку на засоби персонального сервісу для аналізу та прийняття рішень [1].

Одним з важливих напрямів створення та розвитку вимірювально-обчислювальних засобів, як окремих складових мережі вимірювально-обчислювальних засобів КФС, є вихроструміві засоби обстеження та діагностики неоднорідних середовищ та об’єктів, до яких можна зарахувати геофізичні системи обстеження земних надр, прибережних зон морів та океанів, діагностичні засоби обстеження корозійного стану великогабаритних сталевих листових конструкцій тощо [2–8].

### **Стан проблеми**

Вихроструміві системи діагностики та обстеження різноманітних вузлів та деталей машин, літальних апаратів широко використовуються у промисловості для вихідного та вхідного контролю виробів та матеріалів на наявність поверхневих тріщин, внутрішніх дефектів та інших пошкоджень. Аналогічно діагностують вироби в процесі експлуатації для встановлення придатності їх до

подальшої експлуатації. Серед таких виробів можна згадати обшивки та гвинти літаків, гелікоптерів, обшивки космічних апаратів, захисні антикорозійні металеві плівки. До них можна зарахувати вимірювання товщини захисних діелектричних плівок провідних матеріалів. При цьому використовуються електромагнітні поля з частотного діапазону від десятків кГц до десятків мГц [2].

У геофізичних системах обстеження земних надр та шельфових зон морів та океанів застосовують переважно електромагнітні поля з діапазону від десятків Гц до одиниць кГц [3–6]. Для приблизного виявлення місцезнаходження об'єктів використовують бортові системи, розташовані на легких літаках. Для уточнювальних деталізаційних робіт на суходолі використовують наземні системи [5, 6].

Глибинність досліджень такими системами збільшується у разі зменшення частоти та збільшення рознесення між збудником та приймачем поля. Тому у відомих нам системах намагалися освоїти електромагнітні поля з частотами, починаючи від одиниць Гц, зокрема, в електророзвідці корисних копалин [7] та в діагностиці корозійного стану великогабаритних сталевих листових конструкцій [8]. Перехід на такі частоти ставить жорсткіші вимоги до вимірювальних засобів, зокрема, щодо зменшення порога чутливості засобів вимірювання та збільшення швидкодії. Згадані засоби фактично були аналоговими, тоді як вимірювально-обчислювальні засоби КФС мають бути цифровими. Тому в засобах КФС опрацювання сигналу, починаючи від попереднього підсилення, має бути інше і підпорядковане основній меті – отримання результату в цифровій формі зі збереженням, а за можливості й покращенням, основних метрологічних характеристик, зокрема, порога чутливості.

### **Постановка задачі та основні параметри вимірювальних засобів КФС**

Вихрострумові засоби, виконані в цифровому варіанті, можуть слугувати складовими частинами мережі вимірювально-обчислювальних засобів КФС, виконуючи важливі завдання на першому рівні. Зокрема, це будуть геофізичні бортові засоби дослідження верхніх шарів землі, шельфових зон морів та океанів, розташовані на пілотованих літальних апаратах тощо [9], наземні деталізаційні геофізичні засоби, а також засоби діагностування корозійного стану сталевих листових конструкцій [8]. Тому основною метою статті є аналіз основних напрямів, принципів та підходів до побудови інфранизькочастотних вихрострумових вимірювально-обчислювальних засобів першого рівня КФС, які б дали змогу, зберігши поріг чутливості, який реалізований відомими засобами на вищих частотах, підвищити глибинність досліджень та діагностики.

**Робоча частота та деякі конструктивні особливості.** Спільним для вищезгаданих вимірювально-обчислювальних засобів КФС є частота електромагнітного поля, яка, для забезпечення потрібних глибин та товщин дослідження, повинна досягати одиниці або навіть часток Гц. В цьому випадку однаковими для цих різних застосувань будуть підходи до побудови засобів генерування та приймання електромагнітного поля, хоч потужність, що споживається від генератора, може відрізнятися для різних систем на порядок і більше. Однаковими будуть і вимірювані параметри та вимоги до параметрів вимірювача, а отже, однаково оброблятимуться сигнали, починаючи від приймальних сенсорів аж до отримання цифрового результату. Основна відмінність буде зумовлена конструктивними особливостями, які можуть полягати в тому, що у деяких системах відстань між збудником та приймачем поля є незмінною (системи з жорсткою базою), тоді як бортові системи, наприклад, з випускною гондолою, є системами зі змінною базою (визначається відстанню між літаком і гондолою), оскільки взаємне розташування збудника поля (розташований на літаку) та приймача поля (розташований у випускній гондолі) можна змінювати дискретно у певному діапазоні, наприклад, від 30 до 120 м. Але тут база системи не є жорсткою через те, що вона може неконтрольовано змінюватися у певних межах під дією дестабілізуювальних факторів. Такі неконтрольовані зміни зумовлюють появу адитивної похибки вимірювання, яка збільшує поріг чутливості. До таких дестабілізуювальних факторів можна зарахувати: хитання гондоли під час польоту в горизонтальній та вертикальній площинах; зміни відстані між гондолою та літаком у разі

потрапляння останнього в повітряні ями, зміни висоти польоту тощо. Крім цього, хитання магнітоприймальних елементів у магнітному полі Землі створюють додаткові завади. Тому для забезпечення метрологічних параметрів вживають різних компенсаційних заходів. Тобто тут завдання забезпечення необхідних метрологічних параметрів є складнішим.

Що стосується наземних засобів геофізичної розвідки, то тут базу між генераторним та приймальним елементами можна також змінювати, змінюючи відстань між генераторним та приймальним вузлами у процесі повторних досліджень [5]. Стабільність встановленої тут відстані є набагато вищою. Змінюючи базу, можна отримувати інформацію про провідність геологічних шарів на різних глибинах. Аналогічний результат одержують і у бортових системах, змінюючи відстань між літаком і гондолою.

**Вимірювані параметри.** Вимірювані параметри згаданих засобів у принципі є однаковими, а тому спрощена структура вимірювально-обчислювальних засобів таких КФС є також однаковою, хоч самі ці засоби можуть мати різне призначення.

Вимірюваним параметром магнітного поля у відомих засобах зазвичай є відношення квадратурної складової вторинного магнітного поля до магнітної складової первинного поля, або відношення малої півосі проєкції еліпса поляризації магнітного поля на площину польоту до його великої півосі. Вимірювання відношення півосей еліпса поляризації забезпечує інваріантність вимірювань бортовими засобами під час хитання гондолою в горизонтальній та вертикальній площинах. За малих значення вимірюваних параметрів, а фактично так воно і є, як відношення квадратурної складової, так і відношення півосей еліпса поляризації є параметрами, ідентичними з фазовим зсувом між магнітною складовою первинного, збудженого генераторною петлею, поля та магнітною складовою сумарного первинного і вторинного, збудженого вихорними струмами у провідному об'єкті, полів.

Тому основним вимірюваним параметром цифрових вимірювально-обчислювальних засобів КФС має бути фазовий зсув. Згадані відомі аналогові геофізичні засоби забезпечують вимірювання параметрів з порогом чутливості близько  $(3 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4})$  рад.

## Виклад основного матеріалу

### 1. Принципи створення цифрових вимірювальних засобів КФС

**Аналіз аналогових низькочастотних вихрострумів засобів.** Під час побудови обчислювально-вимірювальних засобів КФС слід орієнтуватися на цифрові методи вимірювання фазового зсуву, які інколи ще називають алгоритмічними. Для цього доцільно використати методи, які можуть забезпечити найнижчий поріг чутливості, бажано не гірший, ніж у аналогових засобів.

Тому спочатку проаналізуємо, як забезпечується такий низький поріг чутливості у аналогових засобах, для того щоб, за можливості, використати ці підходи для побудови цифрових засобів КФС.

По-перше – це використання сумо-різницевого методу, який вважається найчутливішим під час вимірювання фазового зсуву. Метод перетворює різницю фаз на різницю амплітуд.

По-друге – це застосування методу періодичного порівняння амплітуд гармонічних сигналів (бінарної дискретизації), згідно з яким одноканальний пристрій періодичного порівняння з двох гармонічних сигналів формує амплітудно-фазомодульований сигнал, коефіцієнт амплітудної модуляції якого вимірюється, оскільки він пропорційний до вимірюваного параметра [8].

Такий алгоритм і забезпечує низький поріг чутливості аналоговим засобам вимірювання на робочих частотах, не менших, ніж 20 Гц [6]. Тут частота періодичного перетворення повинна бути меншою від робочої частоти, але не меншою, ніж 10 Гц, тому що в іншому разі на результат вимірювання впливає низькочастотний флікер-шум [6, 12].

Спрощена структурна схема такого вимірювача є універсальною для побудови згаданих тут відомих аналогових низькочастотних вихрострумів засобів [3–6].

Узагальнену структуру такого аналогового вимірювача подано на рис. 1 [11].

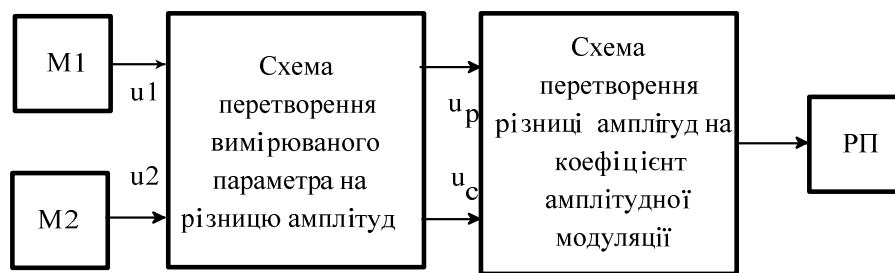


Рис. 1. Узагальнена структура аналогових вимірювальних засобів діагностики середовищ гармонічними полями

На рис. 1 M1 та M2 – сенсорна частина, у яку входять магнітоприймачі (перетворювачі магнітної складової поля на змінну напругу); схема перетворення вимірюваного параметра на різницю амплітуд напруг  $u_p$  та  $u_c$ ; схема одноканального типу для перетворення різниці амплітуд на коефіцієнт амплітудної модуляції; РП – реєструвальний пристрій вимірюваного параметра.

Якщо робочі частоти порівнюваних сигналів становлять одиниці Гц і менше, то для зменшення впливу флікер-шуму порівняння сигналів необхідно здійснювати з частотою, набагато більшою, ніж частота самих сигналів [7, 8]. А підвищення швидкодії, необхідне для бортових систем у разі побудови засобів КФС такого типу, можна забезпечити знову ж таки використанням цифрових методів вимірювання фазового зсуву [13, 14].

**Узагальнена структура цифрових обчислювально-вимірювальних засобів КФС.** Серед цифрових методів є суморізнцеві методи вимірювання фазового зсуву, які можуть забезпечити високу чутливість [14, 15].

Спираючись на ці методи, подамо узагальнену структуру цифрового вимірювально-обчислювального засобу КФС у такому вигляді (рис. 2).

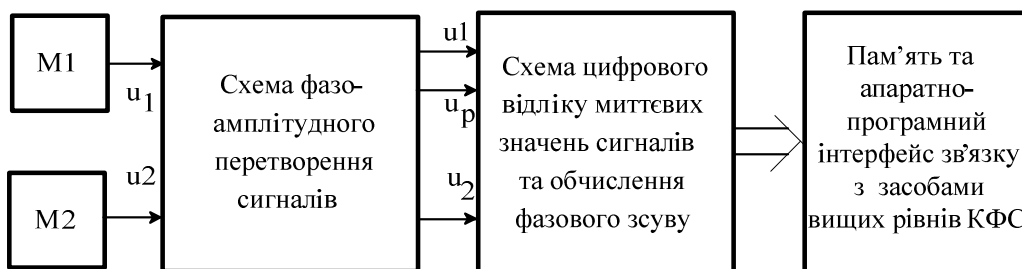


Рис. 2. Узагальнена структура цифрових вимірювальних засобів діагностики середовищ гармонічними полями

На рис. 2 M1 та M2 – магнітоприймачі магнітних складових електромагнітного поля, які, як і в схемі, що на рис. 1, утворюють сенсорну частину вимірювально-обчислювальних засобів КФС; схема фазоамплітудного перетворення реалізує вибраний алгоритм суморізнцевого перетворення сигналів; схема цифрового відліку миттєвих значень сигналів перетворює миттєві значення сигналів на цифровий еквівалент і за цими відліками обчислює фазовий зсув; значення фазового зсуву завантажуються в пам'ять, а потім через інтерфейс зв'язку передаються на рівень 2 КФС, де їх приймають засоби збору та доставки інформації, звідти – на рівні 3 та 4 КФС для опрацювання та прийняття рішень, і далі – на засоби персонального сервісу.

## 2. Підходи до забезпечення граничних параметрів цифрових вимірювальних засобів КФС

**Цифрові методи для реалізації граничних параметрів.** До цифрових методів, які можуть забезпечити високу чутливість, можна зарахувати суморізнцеві методи, що реалізують вимірювання фазових зсувів за формулою [15]

$$\varphi_x \approx \frac{U_{Rm}}{U_m}, \quad (1)$$

де  $U_{Rm}$  – амплітуда різниці порівнюваних сигналів;  $U_m$  – амплітуда порівнюваних сигналів.

Вимірюючи амплітуду порівнюваних сигналів  $U_m$  та амплітуду їх різниці  $U_{Rm}$ , можна за формулою (1) визначити зсув фаз між сигналами. Цю операцію легко виконати у цифровій формі.

Недоліком такого алгоритму є те, що він потребує рівності амплітуд порівнюваних сигналів. Забезпечити цю вимогу нелегко, а нерівність амплітуд буде причиною похибки вимірювань.

Відомі амплітудно-нечутливі методи вимірювання фазового зсуву між гармонічними сигналами, які розглянуті в [14], складні в реалізації.

Тому доцільно проаналізувати похибки від нерівності амплітуд порівнюваних сигналів, виявити методи вимірювання фазового зсуву, у яких вплив нерівності амплітуд на похибку вимірювання найменший, або за необхідності розробити нові, прості в реалізації алгоритмічні методи, які б не потребували вирівнювання амплітуд сигналів.

**Вплив флікер-шуму та методи зменшення його впливу.** Як вже сказано вище, доведеться вживати заходів для зменшення впливу флікер-шумів на результат вимірювання. Спектральну густину потужності флікер-шуму в низькочастотному діапазоні можна оцінити виразом [16]

$$G_{F-N}(f) = G_{W-N}(f) \left[ 1 + \frac{f_c}{f} \right], \quad (2)$$

де  $G_{W-N}(f)$  – спектральна густина потужності білого шуму;  $f_c$  – частота спряження, на якій спектральні густини потужностей білого шуму та флікер-шуму рівні (звичайно це частота з діапазону від 500 до 1500 Гц);  $f$  – поточне значення частоти.

Для прикладу візьмемо, що  $f_c = 1000$  Гц, а робоча частота, на якій працює КФС вихрострумного типу, становить  $f = 1$  Гц. Тоді підрахунок за формулою (2) покаже, що

$$G_{F-N}(f) \approx 1000 G_{W-N}(f). \quad (3)$$

З останнього виразу видно, що на частоті 1 Гц вплив флікер-шуму в 1000 разів більший, ніж вплив білого шуму. Тому під час побудови вимірювально-обчислювальних КФС, які повинні будуть працювати в інфранизькочастотному діапазоні, обов'язково необхідно вживати заходів для зменшення впливу флікер-шуму.

Одним з дієвих методів зменшення флікер-шуму в інфранизькочастотних пристроях з періодичним порівнянням сигналів є метод порівняння сигналів з частотою, набагато більшою, ніж частота самих сигналів. Інколи метод ще називають методом бінарної дискретизації [6, 14]. Очевидно, що його доцільно застосувати для вимірювання фазового зсуву.

### 3. Вимоги до обчислювальних засобів першого рівня та зв'язок з іншими рівнями КФС

Серед вимог, які доцільно поставити до наземних або бортових обчислювальних засобів КФС першого рівня, – це виконання їх на стандартних платформах, наприклад, таких як Arduino чи Wiring або подібних до них. Це дозволить, за наявності модулів GPS та карт пам'яті micro SD, реєструвати положення рухомих засобів у часі, а комплектування їх ще й мережевими картами (модулями), реалізувати під'єднання до Інтернету [17, 18].

Треба зазначити, що модулі платформ Arduino чи Wiring спроектовані так, щоб можна було розташовувати один модуль над іншим, тобто використовувати багато модулів одночасно. Такі платформи можна також комплектувати порожніми друкованими модулями ProtoShield, на яких можна збирати власні нестандартні вузли. Модулі легко з'єднуються між собою та платформою за допомогою виводів, розміщених у відповідних гніздах по краях платформи та модулів [17, 18].

Застосувавши прості й недорогі радіомодулі передавача та приймача (модулі RF) для безпроводового зв'язку, можна реалізувати пересилання даних між двома системами на платформах Arduino або Wiring.

За потреби обчислювальні засоби, збудовані на базі платформи Arduino та подібних, можна під'єднувати до стільникової мережі телефонного зв'язку і реалізувати обмін інформацією між цими засобами та телефонами мобільними та стаціонарними.

Це можна використати для реалізації зв'язку та передавання даних на інші рівні КФС. Все, що буде виконуватися на вищих рівнях КФС, залежатиме від конкретних апаратно-програмних засобів на цих рівнях та загальних вимог, яким мусить відповідати КФС загалом.

## Висновки

1. Інфранизькочастотні вихрострумові вимірювально-обчислювальні засоби КФС є одним з перспективних напрямів науково-технічного розвитку, який дасть змогу створити цифрові геофізичні системи багатофункціонального призначення для безконтактних досліджень земних надр, шельфових зон морів та океанів, діагностичні системи корозійного стану великогабаритних сталевих листових конструкцій тощо.

2. Вимірювальну частину засобів КФС першого рівня доцільно ґрунтувати на цифровому вимірюванні фазового зсуву з порогом чутливості, не гіршим, ніж  $(3 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4})$  рад.

Для цього необхідно:

– проаналізувати метрологічні можливості цифрових, або, як їх ще називають, алгоритмічних, методів вимірювання фазового зсуву, щоб віднайти методи, здатні забезпечити вказаний вище поріг чутливості;

– за необхідності розробити нові або розвинути відомі методи вимірювання фазового зсуву, пристосувавши їх до поставленої задачі.

Очевидно, що метод вимірювання фазового зсуву має бути:

– амплітудно незалежним або з мінімальним впливом різниці амплітуд на результат вимірювання;

– належати до групи суморізницевих методів, які здатні забезпечити найвищу чутливість;

– метод має забезпечувати зменшення впливу фліккер-шуму на результат вимірювання.

3. Обчислювальну частину засобів КФС першого рівня доцільно виконати на стандартних обчислювальних платформах типу Arduino або Wiring, забезпечивши їм зв'язок з іншими рівнями КФС через Інтернет або ж мережу стільникового зв'язку.

1. Мельник А.О. Кібер-фізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2014. – № 806. – С. 154–161. 2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / под ред. В. В. Клюева. – Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1986. – 351 с. 3. Аппаратура для аэрогеофизической разведки с магнитным и электромагнитным информационными каналами / А. А. Вакульский, Л. Я. Мизюк, Р. В. Проць, Ю. Ю. Сикачевский. – К.: Наукова думка, 1985. – 253 с. 4. Мизюк Л. Я., Поджарий В. М., Проць Р. В. Измерение инвариантов магнитного поля при электроразведке. – К.: Наукова думка, 1976. – 231 с. 5. Светов Б. С., Мизюк Л. Я., Поджарый В. М. Рудная электроразведка по методике эллиптически поляризованого поля. – М.: Недра, 1969. – 176 с. 6. Бучма І. М. Засоби вимірювання індуктивної електророзвідки та вихрострумової діагностики. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2008. – 294 с. 7. Брискин А. М., Мизюк Л. Я., Клим Е. И., Родин А. С. Особенности построения измерительного канала инфранизькочастотной электроразведки // Отбор и передача информации. – К.: Наукова думка, 1985. – Вып. 72. – С. 98–103. 8. Бучма І. М., Репетило Т. М. Комп'ютеризована система вимірювання товщини конструкцій з листової сталі // Методи і прилади контролю якості. – 2013. – № 1 (30). – С. 3–7. 9. Сучасний стан оснащення Збройних сил України безпілотними авіаційними комплексами. Інтернет-портал. 10. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці / Бова М. Т., Гойжєвський В. О., Маєвський Є. М., Молебний В. В. – К.: Вища школа, 1972. – 232 с. 11. Бучма І. М. Исследование и разработка высокочувствительных устройств периодического сравнения для измерения низкочастотных гармонических сигналов при электроразведке: дисс. ...канд. техн. наук: 05.11.05. – Львов, 1978. – 230 с. 12. Скрипник Ю. А. Способы построения высокостабильных фазонечувствительных дифференциальных индикаторов // Приборостроение. – К.: Наукова думка, 1961. – № 10. – С. 1–5. 13. Цифровые методы измерения сдвига фаз / Глинченко А. С., Кузнецкий С. С., Фиштейн А. М., Чмых М. К. – Новосибирск: Наука, 1979. – 288 с. 14. Кондратов В. Т. Алгоритмические методы измерения мгновенных значений фазового сдвига инфранизькочастотных сигналов. – К.: Институт кибернетики АН УССР им. Глушкова, 1984. – 40 с. 15. Бучма І. М., Винничек Ю. Г. Метрологічні характеристики алгоритмічних сумо-різницевих методів вимірювання фазових зсувів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" Комп'ютерні системи та мережі. – 2013. – № 773. – С. 16–21. 16. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергия, 1980. – 247 с. 17. John Voxall. Arduino. 65 praktycznych projektów (tłumaczenie z języku ang.). – Gliwice: Wyd-wo Helion, 2014. – 421 st. 18. O'Reilly Media, Inc. Spraw, by rzeczy przemówiły. Programowanie urządzeń elektronicznych z wykorzystaniem Arduino (tłumaczenie z języku ang.). – Gliwice: Wyd-wo Helion, 2011. – 462 st.