

ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ З ІМПЕДАНСНИМИ, ОПТИЧНИМИ ТА ОПТОВОЛОКОННИМИ СЕНСОРАМИ

Ф.Б. Гриневич, акад. НАН України, **З.Я. Монастирський**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Наведено основні результати наукових досліджень, що проводились у відділі електричних і магнітних вимірювань ІЕД НАН України у 2013 р. Розглянуто нові методи і засоби вимірювання параметрів імпедансу, волоконно-оптичні засоби вимірювання і керування регульовально-запірною арматурою АЕС, способи покращення метрологічних характеристик лазерних далекомірних систем. Бібл. 9, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: вимірювання, імпеданс, волоконно-оптичний сенсор, регульовально-запірна арматура, лазерний далекомір.

Удосконалення метрологічних та експлуатаційних характеристик інформаційно-вимірювальних та керуючих систем, їх адаптація до конкретних завдань та умов використання є проблемою, яка не втрачає своєї актуальності. Вирішення цієї проблеми набуває особливого значення у випадку застосування таких систем на крупних енергетичних об'єктах, надійність роботи яких безпосередньо залежить від їхньої точності та безвідмовності.

Основними напрямками роботи відділу з удосконалення вимірювальних систем у 2013 році були наступні:

- Розвиток методів і засобів вимірювання параметрів електричного імпедансу;
- Створення волоконно-оптичних засобів вимірювання та керування для роботи на АЕС;
- Покращення характеристик лазерних далекомірних систем.

1. **Вимірювання параметрів електричного імпедансу.** В дослідженнях за цим напрямком активну участь брали канд. техн. наук Мельник В.Г., докт. техн. наук Новік А.І., канд. техн. наук Василенко О.Д., інженери Семеничева Л.М., Погребняк В.Д. та Сліцький О.В. Робота з удосконалення методів і створення новітніх засобів вимірювання імпедансу, у свою чергу, здійснювалась за такими розділами:

- розвиток комбінованого методу вимірювання, що поєднує переваги методів прямого та зрівноважувального перетворення параметрів імпедансу у цифровий код;
- підвищення завадостійкості;
- розробка уніфікованих базових програмно-апаратних засобів нового покоління для імпедансометричних систем, а також спеціалізованих і універсальних вимірювальних кіл для вирішення прикладних завдань, які відрізняються простотою конструкції та низькою вартістю при конкурентоспроможних метрологічних характеристиках.

Використання імпедансних сенсорів, що працюють на змінному струмі як первинні джерела інформації діагностичних і аналітичних систем, дає можливість застосовувати широке коло різних методів вимірювання, уніфікувати потрібну для цього апаратуру і програмне забезпечення, підняти чутливість і завадостійкість та знизити вартість приладів. Для реалізації цих можливостей було розроблено принципи побудови вимірювального каналу, що забезпечує дуже високу розрізнявальну здатність (24 і більше двійкових розрядів) при високій швидкодії і здатності адаптуватися до змін параметрів сенсорів у широкому діапазоні їх значень та інших умов вимірювання [4].

Суть запропонованих рішень полягає у застосуванні комбінованого перетворення методом порівняння у двох контурах вимірювального пристрою, а саме у мостовому колі змінного струму і в колі обробки його вихідного сигналу. Розглянемо можливі схемотехнічні рішення і обґрунтуємо алгоритм вимірювання з узгодженням шкал цих контурів. Схему вимірювального каналу показано на рис. 1.

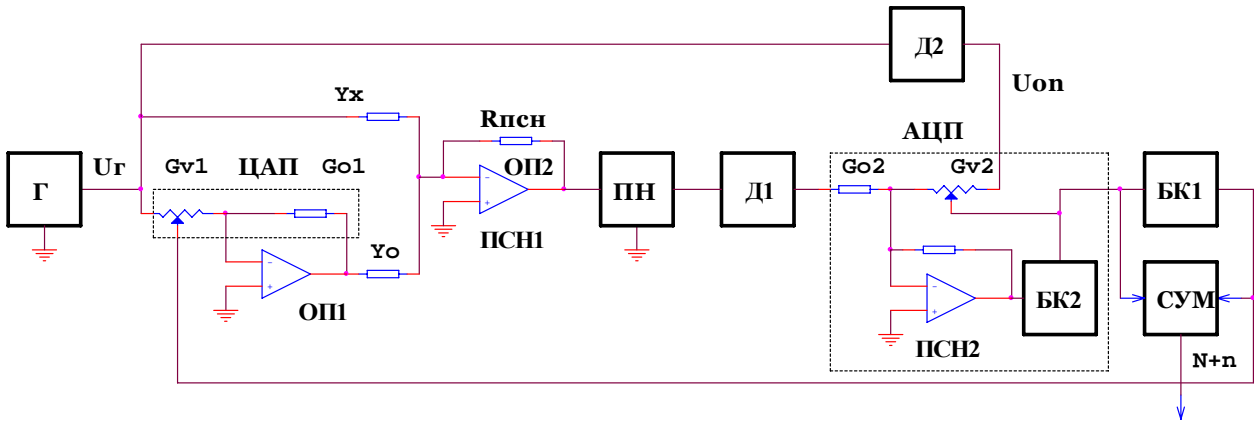


Рис. 1

Зрівноважене компенсаційно-мостове коло (КМК) утворено цифроаналоговим перетворювачем (ЦАП), що містить регульовану G_{v1} і сталу G_{01} провідності, та операційний підсилювач ОП1, опорною зразковою мірою Y_0 та об'єктом вимірювання Y_x . Сигнал нерівноваги моста перетворюється в напругу перетворювачем ПСН на операційному підсилювачі ОП2. Його вихідний сигнал підсилюється з коефіцієнтом $K_{пн}$ підсилювачем сигналу нерівноваги ПН до рівня, достатнього для функціонування системи автоматичного зрівноважування, що складається з АЦП та блока керування БК1, який здійснює регулювання елемента зрівноважування мостового кола (у цьому випадку – ЦАП) для приведення моста до рівноваги. Результатом зрівноваження є код N , що відповідає значенню вимірюваної величини Y_x з дискретністю, яка визначається розрядністю ЦАП. АЦП (з порозрядним зважуванням або з розгортуючим перетворенням) містить ЦАП (G_{02} , G_{v2}), ПСН2 та блок керування БК2, який здійснює вирівнювання струмів через провідності G_{02} та G_{v2} . Результатом цього вирівнювання, дискретність якого визначається розрядністю АЦП, є код n . Випрямлячі (детектори Д1 та Д2) на входах АЦП дають змогу визначати співвідношення напруг змінного струму (в даному випадку – сигналу нерівноваги моста) і напруги U_r генератора живлення мостового кола. Отже, можна бачити, що КМК, ПСН, ПН, Д1, з одного боку, і Д2 з іншого також утворюють компенсаційно-мостове коло, яке зрівноважується за допомогою БК2, що і дає змогу визначати залишкову нерівновагу КМК. Кінцевий результат вимірювання можна отримати додаванням результатів зрівноважування цих двох мостових кіл блоком СУМ. При досягненні зрівноважених станів обох систем виконується співвідношення

$$Y_x = \frac{Y_0 G_{v1p}}{G_{01}} + \frac{G_{v2p}}{R_{псн} G_{02} K_{пн}}. \quad (1)$$

У цьому виразі $G_{v1p}/G_{01} = N$, а $G_{v2p}/G_{02} = n$.

Для узгодження шкал контурів зрівноважування необхідно врахувати коефіцієнт підсилення ПН ($K_{пн}$, що враховує також неідентичність детекторів Д1 та Д2). З цією метою періодично проводиться його нормування за допомогою зразкового тестового впливу на зрівноважувальний елемент моста. Значення n , узгоджене з N , отримують за допомогою виразу

$$p_x = \frac{-\operatorname{Re}[U_x](\operatorname{Im}[U_{xk}] - \operatorname{Im}[U_x]) + \operatorname{Im}[U_x](\operatorname{Re}[U_{xk}] - \operatorname{Re}[U_x])}{(\operatorname{Im}[U_{xk}] - \operatorname{Im}[U_x])^2 + (\operatorname{Re}[U_{xk}] - \operatorname{Re}[U_x])^2} \Delta p, \quad (2)$$

де Δp – відносна зміна (варіація) зрівноважувального параметра N моста; p_x – відповідна їй зміна n , яка визначається за результатами перетворення сигналу нерівноваги моста в АЦП перед варіацією (U_x) і після неї (U_{xk}).

Розглянута структура вимірювального каналу і спосіб виконання вимірювання дають змогу реалізувати прості за конструкцією та технологією виготовлення прилади для використання з імпедансними сенсорами температури, переміщення, ваги, зусилля, тиску, рівня рідини і багатьох інших фізичних величин. Ці прилади мають дуже широкий діапазон вимірю-

вання і одночасно високу розрізнявальну здатність. При цьому досить просто адаптувати канал до необхідного в кожному конкретному випадку поєднання швидкодії, діапазону вимірюваної величини і розрізнявальної здатності. Це може бути здійснено шляхом оптимізації співвідношення розрядності регулювання зрівноважувальних елементів (подільників напруги) у мостовому колі та розрядності перетворення АЦП у каналі визначення сигналу нерівноваги, а також необхідним усередненням отриманих з АЦП даних. Потрібно зазначити, що така адаптація може виконуватися виключно програмними засобами, у тому числі автоматично за допомогою інтелектуальних алгоритмів керування.

Підвищення інформаційної продуктивності є одним з найбільш складних і в той же час актуальних завдань при створенні сенсорних вимірювальних систем, особливо призначених для технологічного контролю, технічної та медичної діагностики, аналітичних досліджень. Це пов'язано з необхідністю отримання високої розрізнявальної здатності і чутливості одночасно з високою швидкістю приладів, що працюють в умовах підвищених завад електричного характеру та неінформативних параметрів вимірювальних перетворювачів, об'єкта контролю та середовища. Чинником, який ускладнює це завдання, є обмежена потужність вимірювальних сигналів, що характерно для сенсорних систем.

Завадостійкість імпедансометричних каналів значною мірою залежить від ефективності виділення сигналів змінного струму на фоні шумових завад та завад промислової частоти. В результаті виконаних досліджень розроблено інтегруючий АЦП з паралельно-последовною обробкою інформативного сигналу змінного струму, що дає змогу втричі підвищити швидкість вимірювального каналу при збереженні співвідношення сигнал/шум або в 1,7 разу покращити його чутливість і розрізнявальну здатність, а також здійснити подавлення мережевих завад при збереженні швидкодії до 50 відліків на секунду. Одночасно суттєво покращена лінійність функції перетворення АЦП (відносна похибка не гірше 0,005 % у декадному діапазоні). Розрядність створеного АЦП складає 20 двійкових розрядів, а чутливість – 1 мкВ.

Ефективним шляхом підвищення завадостійкості приладів в умовах нестабільності неінформативних параметрів об'єкта та середовища є застосування диференціальних методів вимірювання. Однак точність їх є також обмеженою через можливість виникнення адитивної похибки у випадку недостатнього подавлення синфазних завад, що діють на первинні перетворювачі диференціального сенсора. Ступінь подавлення таких завад визначається ідентичністю чутливостей цих перетворювачів. Особливо актуальною ця проблема стає при кондуктометричних вимірюваннях, зокрема в біосенсорних системах. Для підвищення метрологічної надійності кондуктометричних систем з диференціальними сенсорами розроблені й практично реалізовані способи вимірювання та відповідні мостові вимірювальні кола, що забезпечують автоматичну діагностику сенсорів у робочому режимі й оптимальний режим отримання інформативного сигналу, при якому досягається максимальна взаємна компенсація неінформативних впливів на вихідні сигнали перетворювачів.

Дослідження принципів побудови амперметричних аналітичних систем показали можливість застосування диференціальних методів також і в цій сфері. Вперше були розроблені й практично реалізовані два варіанти амперметричних приладів з диференціальним режимом роботи, які призначені для побудови біосенсорних систем. Експериментальні дослідження показали можливість підвищення чутливості вимірювання в 10 разів і більше при збільшенні рівня шумових завад менше ніж у два рази. При цьому подавлення рівня завад, що діють на об'єкт вимірювання, може досягати кількох десятків разів.

Для практичної реалізації нових методів вимірювання необхідно суттєве розширення можливостей для застосування інтелектуальних (адаптивних) функцій вимірювального каналу і можливостей математичної обробки отриманих даних. У зв'язку з цим розроблено концепцію побудови уніфікованого базового модуля нового покоління для імпедансометричних каналів [8]. З використанням новітньої елементної бази створено макетний зразок такого модуля, а також розроблено спеціалізоване програмне забезпечення у середовищі Matlab та C#.NET. Забезпечено значне розширення функціональних можливостей вимірювального каналу, його програмної адаптації до вирішення конкретних завдань, підвищено базові метро-

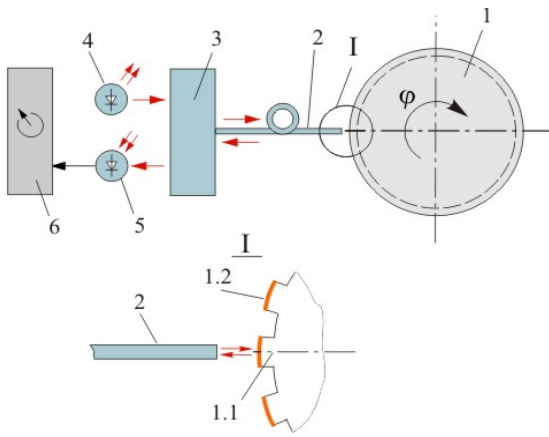


Рис. 2

логічні характеристики. Важливою перевагою нового програмного забезпечення верхнього рівня є можливість для споживача проводити обробку і подання результатів вимірювання в середовищі Matlab.

Для вирішення ряду конкретних прикладних завдань (зокрема створення портативного *RLC*-метра з підвищеними метрологічними характеристиками) проведені теоретичні й експериментальні дослідження похибок нових компенсаційно-мостових вимірювальних кіл з частковим зрівноваженням за абсолютним або відносним параметром. За результатами досліджень похибок, пов'язаних з залишковими параметрами комутуючих елементів,

показано можливість реалізації дешевих, портативних мостів змінного струму з мікроелектронними безконтактними комутаторами класу точності 0,1 % та діапазоном вимірюваних імпедансів від 10^{-3} до 10^9 Ом [7].

2. Волоконно-оптичні засоби вимірювання та сигналізації. В дослідженнях за цим напрямком брали участь кандидати технічних наук Кромплас Б.А. та Левицький А.С. У рамках виконання науково-дослідної теми «Фактор» особливу увагу було приділено створенню контрольних-вимірювальних засобів (КВЗ) регулювально-запірної апаратури (РЗА), що працює в екстремальних умовах експлуатації, а саме в герметичній оболонці реактора. Для такої арматури АЕС, відповідно і для її приводу, ставляться особливі вимоги до надійності та спроможності зберігати свою працездатність в умовах аварійних ситуацій. Так, згідно з чинними нормами, арматура в аварійних умовах «великого витoku» повинна виконувати не менше п'яти циклів роботи при температурі до 150 °С (для реакторів ВВЕР-1000). Крім того, конструктивне виконання всіх вузлів цієї арматури має забезпечувати можливість її дезактивації рідкими речовинами. Ці та інші фактори зовнішнього середовища (передусім підвищений радіоактивний фон), вимоги до обслуговування значно обмежують застосування засобів електроніки для КВЗ РЗА.

Запропоновано принцип побудови КВЗ РЗА, згідно з яким в гермооболонці реактора на РЗА знаходяться лише сенсори, а вся апаратура обробки та аналізу сигналів, формування команд розміщується поза оболонкою. Для реалізації цього принципу необхідне виконання наступних умов:

- сенсори та лінії з'єднання мають задовольняти всім вимогам щодо розміщення в гермозоні;
- кількість ліній з'єднання має бути мінімальною через жорсткий проектний ліміт на кількість кабелів, що йдуть з гермозони;
- довжина ліній зв'язку з сенсором має досягати 100...600 м.

Виходячи з наведених вимог, реалізувати КВЗ на базі магнітних або ємнісних сигналізаторів обертання вала вкрай проблематично. Тому були розроблені варіанти КВЗ на базі волоконно-оптичних сенсорів (ВОС) кута повороту вала з передачею інформативного сигналу по волоконно-оптичному кабелю (ВОК) [9].

За аналогією з магнітними та ємнісними сигналізаторами були розроблені конструкції ВОС, що ґрунтуються на модуляції світлового потоку, з високим рівнем уніфікації механіки цих вузлів.

На рис. 2 зображено структурну схему волоконно-оптичного сигналізатора, побудованого на принципі модулювання світлового потоку. Сенсор складається з зубчатого диска 1, волоконно-оптичного кабелю 2. По ньому на торець диска 1 подається світло від джерела, роль якого виконує світлодіод 4. Частина світлового потоку через оптичний розгалужувач 3 подається на фотоприймач 5, який під дією цього потоку генерує електричний струм. На торці плоских зубців диска 1 нанесено світловідбивальне покриття. Диск посаджено на вал,

який з'єднується із сигнальним (або вихідним) валом приводу регульовально-запірної арматури. Під час обертання диска в ВОК відбувається модуляція світлового потоку внаслідок відбивання його від поверхні зубця. Внаслідок цього змінюється вихідний сигнал фотоприймального пристрою 5.

У пристрої селекції та відліку 6 з цього сигналу формуються імпульси, число яких прямо пропорційне куту повороту диска 1, отже і вала приводу РЗА. З оптичної схеми видно, що для досягнення проектно розрізнявальної здатності, площі зубців і впадин мусять бути, в крайньому разі, однаковими, а їх лінійні розміри (ширина) більші від діаметра оптоволоконна. Це досить суттєво обмежує розрізнявальну здатність такого сигналізатора, оскільки збільшення її за рахунок числа зубців при однакових розмірах можливе тільки за рахунок збільшення діаметра диска, що збільшує габарити сигналізатора. Крім того, операція нанесення відбиваючої поверхні на зубці є технологічно складною, отже, не дешевою.

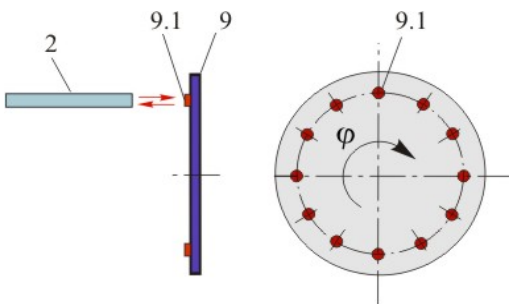


Рис. 3

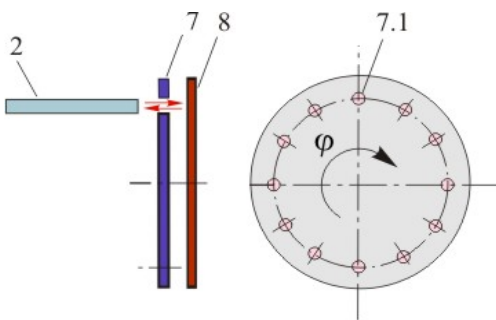


Рис. 4

Варіант виконання сигналізатора, показаного на рис. 3, є значно технологічнішим, оскільки використовує як кодуєчий елемент вузький плоский диск 9 з рівномірно нанесеними по колу світловідбиваючими площадками 9.1. Крім того, внаслідок розміщення жили ВОК перпендикулярно до площини диску, сигналізатор може бути виконано значно компактнішим.

У сигналізаторі, структурна схема якого показана на рис. 4, функцію рефлектора світлового потоку виконує нерухоме плоске дзеркало 8.

Елементом, чутливим до кутового переміщення вала, є плоский диск 7 з розташованими по колу кодуєчими отворами. У цьому сигналізаторі промінь світла з кабеля 2 при проходженні через отвір у диску 7 відбивається від дзеркала 8, що при обертанні колеса 7 також спричиняє модуляцію світлового потоку у ВОК і відповідно на вході фотоприймача. При правильному виборі розмірів елементів сенсора у цьому виконанні можна досягти більшої розрізнявальної здатності за кутом повороту вала, ніж у попередньому. Безсумнівною перевагою всіх розглянутих варіантів є

те, що для передачі сигналу від ВОС до апаратури обробки потрібна лише одна жила ВОК. Простота конструктивного виконання дає змогу помістити ВОС у герметичний корпус, який надійно захищає його від зовнішніх механічних впливів та середовища. Проте варіанти з модуляцією світлового потоку внаслідок відбивання променів мають і суттєвий недолік – значне згасання відбитого сигналу, яке залежить від стану відбивальної поверхні. Враховуючи також і великі відстані, на які повинен передаватися сигнал, це може призвести до суттєвого зниження співвідношення амплітуди модульованого сигналу до фоновому рівню. Може виникнути необхідність у посиленні сигналу безпосередньо на виході з гермозони реактора. Це суттєво ускладнює апаратуру контролера. Крім того, у всіх розглянутих варіантах виконання ВОС досягти розрізнявальної здатності, яка вимагається для однообертової регульовально-запірної арматури, дуже складно, тому основне їхнє призначення – сигналізатори для багатообертової запірної арматури.

У контролері арматури з ВОС, функціональна схема якого зображена на рис. 5, згадані недоліки суттєво зменшені за рахунок розподілу жил ВОК на передавальну і приймальну, а модуляція світлового потоку здійснюється за рахунок повного маскуванню потоку збудження фотоприймача.

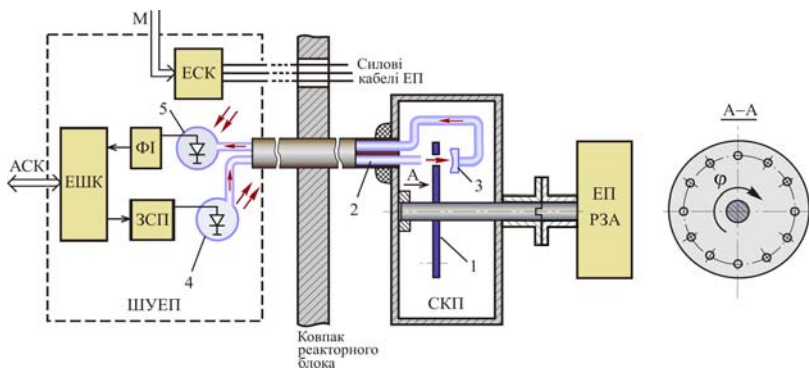


Рис. 5

На валу сигналізатора кута повороту вала СКП, що з'єднаний з валом електропривода арматури ЕПРЗА, кріпиться кодувальний диск 1 з отворами, розміщеними по колу. Світловий потік джерела світла 4, яке збуджується генератором світлового потоку ЗСП, по передавальній жилі 2 надходить на вхід фотоприймача 5 тільки в момент проходження отвору

кодувального диска 1 напроти торця передавальної жили. Лінза 3 служить для фокусування потоку з отвору на приймальну жилу. При обертанні диска на виході фотоприймача формуються імпульси струму без постійної складової, що значно спрощує побудову формувача ФІ лічильних імпульсів для електронного шляхового контролера (ЕШК). У більшості випадків тут буде достатньо звичайного порогового елемента, наприклад тригера Шмідта. ЕШК на основі підрахунку числа імпульсів визначає кут повороту вала приводу і формує відповідні команди для схеми комутації ЕСК, з виходів якої через силові кабелі подається живлення від мережі М на двигун приводу арматури ЕП РЗА.

У запропонованій схемі затухання модульованого сигналу визначається лише параметрами ВОК, і воно є суттєво меншим, ніж у попередніх варіантах. Крім того, амплітуда модульованого сигналу також суттєво вища, що дає змогу передавати сигнал ВОС на значно більші відстані, які можуть задовольнити проектні вимоги до шляхових контролерів спеціалізованих РЗА АЕС [6]. Для кодера кута повороту на просвіт значно послаблюються вимоги до співвідношення розмірів маски і отвору, тому в цьому виконанні ВОС можна реалізувати значно вищу розрізняльну здатність – порядку $0,5^\circ$, що цілком задовольняє вимоги до вимірювачів кута повороту вала однообертової регульовальної арматури гермозони реактора. Сам ВОС має достатньо просту структуру, щоб забезпечити мінімум обслуговування його в гермозоні. Таким чином, побудова КВЗ РЗА із застосуванням ВОС дає змогу: усунути вплив електромагнітних полів, побічне електромагнітне випромінювання, перехресні завади в лініях зв'язку, проблеми, пов'язані з контурним заземленням і напругами зміщення в місцях з'єднання різнорідних провідників, проблеми утворення дуги та виникнення іскор; забезпечити високу стійкість до екстремальних параметрів, у тому числі й високого рівня радіації; застосувати більш тонкий, отже, і легший та міцніший від електричного, кабель, або ж збільшити число жил кабелю, не змінюючи кабельний гермовід у зону реактора; підвищити ступінь електробезпеки внаслідок того, що оптокабелі виготовляються з діелектричних матеріалів, тому через них немає шляхів для проходження електричного струму.

3. Лазерні далекомірні системи з підвищеними завадостійкістю і швидкістю

У проведеному дослідженні з цього напрямку брали участь докт. техн. наук Ніженський А.Д., кандидати технічних наук Масюренко Ю.О., Кононенко О.Г., Брагинець І.О., Зайцев Є.О.

Технічна діагностика цілої низки об'єктів може бути проведена за допомогою лазерних вимірювачів лінійних переміщень і вібрацій, побудованих на базі фазових світлодалекомірив. У цьому випадку, як правило, передбачається вимірювання відстані до дифузновідбивальних поверхонь цих об'єктів. Тому на точність вимірювання переміщень і вібрацій впливає низький рівень відношення сигнал-шум ρ на виході фотоприймача відбитого світлового сигналу. Через це виникає випадкова похибка вимірювання, обумовлена дією як білого шуму, так і низькочастотного (флікер).

Випадкова похибка, спричинена дією білого шуму з рівномірною спектральною щільністю потужності, некорельована, і тому може бути істотно зменшена за рахунок усереднення результатів багаторазових вимірювань. Флікер-шум, спектральна щільність потужності якого на відміну від білого шуму не є постійною та істотно зростає з пониженням частоти,

обмежує можливість підвищення точності вимірювання фазових зсувів шляхом усереднення. Разом з тим серед різних видів діагностики особливе місце займає вібродіагностика великогабаритних об'єктів з низькочастотним спектром коливань (0,5...10 Гц), наприклад гідрогенераторів ГЕС, будівельних конструкцій. У цьому випадку основним параметром віброконтролю об'єктів з низькочастотним спектром вібрацій є вібропереміщення. Тому на точність вимірювання вібрацій можуть істотно впливати низькочастотні шуми, що виникають в елементах фазовимірювальної апаратури і призводять до короткочасної нестабільності параметрів вимірювача переміщень. Для зменшення впливу останньої на результат вимірювання використовують автоматичне калібрування приладу. При цьому частота комутації оптичних сигналів при проведенні калібрування має складати 3...5 Гц, що значно ускладнює конструкцію приладу, а також знижує його функціональну надійність через застосування електромеханічних комутуючих елементів. Досліджено алгоритмічні методи зменшення впливу низькочастотних шумів без використання режиму автоматичного калібрування.

У фазових світлодалекомірах для корекції систематичних похибок здійснюється ортогональне перетворення досліджуваного сигналу, а фазовий зсув φ_x , пропорційний вимірюваній відстані, визначається за формулою $\varphi_x = \arctg \frac{\sin \varphi_x}{\cos \varphi_x}$. З урахуванням впливу флікер-шуму цю формулу можна подати у вигляді

$$\varphi'_x = \arctg \frac{\sin \varphi_x + \sigma'_{\varphi-\text{ш}}}{\cos \varphi_x + \sigma''_{\varphi-\text{ш}}}, \quad (3)$$

де $\sigma'_{\varphi-\text{ш}}$ і $\sigma''_{\varphi-\text{ш}}$ – середньоквадратичні значення випадкової похибки у відносних одиницях, зумовленої дією флікер-шуму при оцінці синусо- і косинусоїдальної складових досліджуваного сигналу. Враховуючи повільний характер зміни низькочастотної флуктуаційної складової флікер-шуму, на обраній частоті вибірок досліджуваних сигналів, що дорівнює 10 кГц, дотримується рівність $\sigma'_{\varphi-\text{ш}} = \sigma''_{\varphi-\text{ш}} = \sigma_{\varphi-\text{ш}}$.

Як випливає з виразу (3), за однакових значень $\sin \varphi_x$ і $\cos \varphi_x$ вплив флікер-шуму на результат вимірювання фазового зсуву істотно зменшується, оскільки до чисельника і знаменника додаються однакові числа $\sigma_{\varphi-\text{ш}}$. У зв'язку з цим розроблено алгоритм вимірювання фазових зсувів [3], який забезпечує рівність значень $\sin \varphi_x$ і $\cos \varphi_x$ у всьому діапазоні вимірюваних фазових зсувів у межах одного фазового циклу за рахунок введення у вимірювальний або опорний канали далекоміра додаткових фазових кутів, що визначаються на одному з етапів роботи приладу та обліковуються у кінцевому результаті вимірювання. З урахуванням запропонованого алгоритму вимірювання фазових зсувів проведено оцінку випадкової похибки вимірювання відстані, зумовленої дією як флікер-шуму, так і білого шуму. У табл. 1 наведено дані обчислень випадкової похибки у градусах і одиницях довжини при різних значеннях числа вибірок досліджуваного сигналу N , $\sigma_{\varphi-\text{ш}}$ і відношення сигнал-шум на виході фотоприймача.

Таблиця 1

Число вибірок, N	$\sigma_{\varphi-\text{ш}}$	0,01		0,005		-0,01		-0,005	
	ρ	100	300	100	300	100	300	100	300
100	$\Delta\varphi^\circ$	0,055	0,016	0,05	0,02	0,056	0,016	0,046	0,018
	ΔL , мм	0,457	0,131	0,416	0,166	0,47	0,135	0,385	0,147
500	$\Delta\varphi^\circ$	0,02	0,00634	0,023	0,00843	0,021	0,00652	0,022	0,00872
	ΔL , мм	0,166	0,053	0,194	0,07	0,171	0,054	0,181	0,073
1000	$\Delta\varphi^\circ$	0,015	0,00834	0,015	0,0061	0,015	0,00624	0,017	0,0069
	ΔL , мм	0,123	0,07	0,125	0,051	0,128	0,052	0,145	0,058

Отримані при моделюванні дані дають змогу оптимальним чином вибрати параметри перетворювальних процесів у схемі фазового лазерного далекоміра залежно від необхідних точності та швидкодії вимірювання переміщень.

Крім досліджень, спрямованих на підвищення завадостійкості фазових світлодалекомірів, досліджено можливість зменшення впливу низькочастотних завад у частотно-фазових лазерних далекомірах [2]. У цьому випадку запропоновано застосувати фільтрацію вихідного сигналу частотно-фазової системи, частота якого пропорційна вимірюваній відстані. Проведено комп'ютерне моделювання перетворювальних процесів у такій системі, для чого отримано моделі вихідного сигналу в їх аналоговому і дискретному зображеннях. Результати проведеного комп'ютерного моделювання дають змогу вибрати оптимальні параметри застосованого фільтра верхніх частот (ФВЧ) залежно від допустимого значення похибки, яка виникає через перехідні процеси в ньому. Шляхом чисельного моделювання проведено оцінку випадкової похибки запропонованого пристрою, зумовленої впливом широкосмугових завад.

Досліджено також можливість застосування методу оптимальної фільтрації для зменшення випадкової похибки вимірювання через вплив широкосмугових завад у частотно-фазових далекомірних системах з урахуванням застосування в останніх ФВЧ [1]. Запропоновано і описано алгоритм обробки вихідної напруги системи, який реалізує його оптимальну фільтрацію при формуванні сигналу для корекції частоти, пропорційної вимірюваній відстані. Проведено чисельне моделювання для оцінки випадкової похибки вимірювання відстані, для чого розроблено відповідні моделі сигналів, що використовуються в обчислювальних операціях. Проведено порівняльну оцінку випадкових похибок при використанні запропонованого алгоритму оптимальної фільтрації $\Delta L_{\text{opt.ф-р}}$ та методу усереднення результатів багаторазових вимірювань ΔL . Дані обчислень для різних значень ρ наведено в табл. 2, з яких можна оцінити ефективність застосування оптимального фільтра.

Таблиця 2

ρ	10	20	30	100	200	300
$\Delta L_{\text{opt.ф-р}}$, мм	5,5	3,61	1,26	0,408	0,23	0,16
ΔL , мм	14,46	8,82	3,82	1,26	0,80	0,95

Проведено дослідження окремих блоків та вузлів завадостійких частотно-фазових далекомірних систем. Зокрема, розроблено високочастотний генеруючий пристрій на основі інтегральної мікросхеми AD9851, що дало змогу реалізувати керований малогабаритний синтезатор частоти (МСЧ), в якому збільшено діапазон та швидкість переналагодження частоти вихідної напруги МСЧ у порівнянні з гетеродинами, які застосовуються. Запропоновано імітаційну модель синтезатора частоти, за допомогою якої досліджено похибки встановлення заданої частоти [5].

1. Брагинец И.А. Оценка эффективности применения оптимальной фильтрации в лазерных частотно-фазовых дальномерных системах // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 78–83.
2. Брагинец И.А. Уменьшение влияния низкочастотных помех в лазерных частотно-фазовых системах // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 71–75.
3. Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Повышение помехоустойчивости фазовых лазерных дальномерных систем // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 91–96.
4. Василенко А.Д., Мельник В.Г., Новик А.И., Семенчычева Л.Н. Повышение разрешающей способности имитансометрических каналов // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 70–81.
5. Зайцев Е.А. Исследование погрешности установки частоты синтезаторов частотно-фазовых систем с использованием LabView // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 84–88.
6. Кромпляс Б.А., Монастирський З.Я. Уніфікований шляховий контролер регулювально-запірної арматури трубопроводів АЕС // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – № 36. – С. 116–120.
7. Мельник В.Г., Погребняк В.Д. Компенсаційно-мостові вимірювальні кола з покращеними характеристиками для портативних вимірювачів RLC // II-а Міжнар. наук. конф. «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС – 2013): Зб. тез доп. – Вінниця, 29-31 жовтня 2013. – С. 121.

8. Мельник В.Г., Сліцький О.В. Уніфікований базовий модуль нового покоління для реалізації імпедансометричних каналів інтелектуальних систем // II-а Міжнар. наук. конф. «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС – 2013): Зб. тез доп. – Вінниця, 29-31 жовтня 2013. – С. 120.
9. Монастирський З.Я., Левицький А.С., Кромпляс Б.А. Волоконно-оптичні сенсори для регулювально-запірної арматури АЕС // Гідроенергетика України. – 2013. – №3-4. – С. 35–38.

УДК 621.317

Ф.Б. Гриневич, акад. НАН України, **З.Я. Монастирський**, докт. техн. наук

Інститут електродинамики НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Измерительные системы для электроэнергетики с импедансными, оптическими и оптоволоконными сенсорами

Приведены основные результаты научных исследований, проводимых в отделе электрических и магнитных измерений ИЭД НАН Украины в 2013 г. Рассмотрены новые методы и средства измерения параметров импеданса, волоконно-оптические средства измерения и управления регулировочно-запорной арматурой АЭС, способы улучшения метрологических характеристик лазерных дальномерных систем. Библи. 9, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: измерение, импеданс, волоконно-оптический сенсор, регулировочно-запорная арматура, лазерный дальномер.

F.B. Grynevych, Z.Ja. Monastyrskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Measuring systems for electroenergetics with impedance, optic and fiber optic sensors

The main results of research, which made in the department of electrical and magnetic measurements of the Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine in 2013, are presented. The new methods and means of measurement parameters of impedance, fiber-optic measurement and control regulation and stop valve nuclear power plants, ways to improve the metrological characteristics of laser rangefinder systems has been considered. References 9, figures 5, tables 2.

Key words: measurement, impedance, fiber optic sensor, regulation and stop valve, laser range finder.

Надійшла 21.03.2014

Received 21.03.2014