

УДК 621.317

ПОКРАЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Ф.Б. Гриневич, акад. НАН України, **З.Я. Монастирський**, докт. техн. наук, **В.Г. Мельник**, канд. техн. наук, **А.С. Левицький**, канд. 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 протягом 2012 р. Вони стосуються розробки, вдосконалення та випробувань сенсорів неелектричних величин та їхнього узгодження з вторинними вимірювальними перетворювачами. Зокрема, розглянуто біосенсорні вимірювальні канали, елементи діагностичних систем потужних генераторів з ємнісними та оптичними сенсорами, а також гібридні вимірювальні системи з оптоволоконними лініями зв'язку. Бібл. 8, рис. 9.

Ключові слова: вимірювання, діагностика, потужний генератор, біосенсор, ємнісний сенсор, оптичні вимірювальні системи.

Електричні методи вимірювання різного роду фізичних величин вимагають у першу чергу, створення та дослідження первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) цих величин в електричні. При цьому точність вимірювання електричних величин на цей час є значно вищою від точності вимірювання неелектричних. Отже, причина полягає у недосконалості сенсорів як вимірювальних перетворювачів та методів обробки їх вихідних сигналів. Саме тому основним напрямком наукових досліджень протягом 2012 року були розробка та вдосконалення сенсорних вимірювальних систем. Цей напрямок охоплював такі розділи: удосконалення вимірювальних каналів біосенсорних систем; дослідження ємнісних сенсорів для діагностики потужних турбо- та гідрогенераторів; дослідження оптичних та оптоволоконних вимірювальних систем; удосконалення адаптивних лазерних вимірювальних систем; створення сенсорних вимірювальних систем з елементами прямого цифрового керування.

1. Удосконалення вимірювальних каналів біосенсорних систем

У біосенсорних приладах кондуктометричного типу використовується диференціальний спосіб вимірювання за допомогою мостових кіл змінного струму, який дає змогу визначати з високою чутливістю зміни різниці активних складових (R) вихідних імпедансів диференціального сенсора, пов'язаних з локальними змінами концентрації досліджуваного розчину. При цьому значно зменшується вплив на результати вимірювання неінформативних параметрів: температури, фонові електропровідності, рН та ін. У кондуктометричних біосенсорних системах, що існували раніше, гостро стояла проблема нестабільної чутливості мостових кіл з двоелектродними сенсорами. Ця проблема частково була розв'язана шляхом застосування пристроїв зі спеціальним балансуванням мостового кола.

До складу цих пристроїв (рис. 1) входять: цифровий генератор Γ синусоїдального тестового сигналу U_{Γ} , вторинний перетворювач ВП інформативних параметрів диференціального сенсора в активну електричну величину (напругу) і векторний вольтметр на основі аналого-цифрового перетворювача АЦП з синхронним детектором СД. Вторинний перетворювач реалізовано на основі компенсаційно-мостової схеми, що має гілки активного B_A (робочого) і пасивного B_P (референсного) перетворювачів. У кожній з гілок включено один з елементів диференціального кондуктометричного сенсора. Кожен з елементів відображено еквівалентною схемою заміщення, що містить послідовно з'єднані ємність і активний опір: C_{SA} і

R_{SA} , C_{SP} і R_{SP} відповідно. Виходи гілок з'єднуються в точці підсумовування струмів, якою є вхід перетворювача струм-напруга ПСН. ВП увімкнено між генератором Γ і входом векторного вольтметра.

На вході гілки ВП з активним перетворювачем є інтегратор $I_{нт}$, що виконує функцію фазообертача напруги U_{Γ} на кут $-\pi/2$,

а також суматор напруги U_{Γ} з вихідною напругою інтегратора, яка регулюється за амплітудою з допомогою масштабного перетворювача МП1. Ці вузли дають змогу сформувати та подати на сенсори напругу U_S , що містить складову, яка є квадратурною до U_{Γ} і може компенсувати падіння напруг на ємностях C_S . У цьому випадку спади напруг на інформативних складових імпедансу сенсорів R_S дорівнюють U_{Γ} . Таким чином, міст може бути збалансований за квадратурною складовою його вихідного струму. У гілці пасивного перетворювача, яка підключається ключем K , встановлено регульований інвертуючий масштабний перетворювач МП2, що забезпечує протифазність струмів у гілках і можливість балансування моста за синфазною складовою сигналу нерівноваги. Виділення з сигналу нерівноваги моста синфазної або квадратурної до U_{Γ} складової проводиться з допомогою СД при відповідній фазі опорного сигналу, що подається на СД від генератора. Випрямлений сигнал нерівноваги перетворюється з допомогою АЦП у цифровий код, який передається в мікропроцесорний контролер для обробки і керування процесом зрівноважування.

Процес вимірювання в біосенсорній системі ґрунтується на додаванні до нормованого обсягу буферного розчину нормованого обсягу аналіту. Досліджуваний компонент аналіту, реагуючи з селективним компонентом (фермент) в мембрані активного перетворювача, створює інформативну зміну електропровідності розчину поблизу його поверхні, в результаті чого змінюються R_{SA} і відповідно I_{SA} на інформативне значення ΔI_{SA} . Опір R_{SP} пасивного елемента і струм I_{SP} при цьому залишаються незмінними. Приріст ΔI_{SA} різницевого струму гілок, пропорційний зміні електропровідності, є вихідним сигналом моста. За допомогою СД з нього виділяють синфазну складову, яка потім перетворюється в код N за допомогою АЦП.

Дослідження, виконані в процесі розробки кондуктометричної системи, показали, що крутизна характеристики перетворення приладів з мостовим вимірювальним колом дуже залежить від тангенса фазового кута. При наявності компенсації падіння напруги на ємностях сенсорів ця залежність суттєво зменшується. Однак отримати достатньо стабільний коефіцієнт перетворення кондуктометричної системи в процесі її експлуатації зі змінними сенсорами все одно не вдається. Ця обставина вимагає регулярного калібрування вимірювального каналу за зразковими розчинами, що істотно ускладнює експлуатацію приладів. Крім того, якщо при виконанні вимірювань питома електропровідність розчину змінюється більше ніж на 10 %, то виникає нелінійність характеристики перетворення понад 5 %, пов'язана зі змінною тангенса фазового кута.

Для підвищення надійності та достовірності вимірювання було розроблено вдосконалену мостову схему вторинного перетворювача кондуктометричного каналу і новий алгоритм його роботи, що дають змогу автоматично контролювати відповідність електричних параметрів диференціальних сенсорів встановленим нормам безпосередньо в процесі вимірювання. На рис. 2 зображено спрощену функціональну схему вимірювача, який може працювати як в

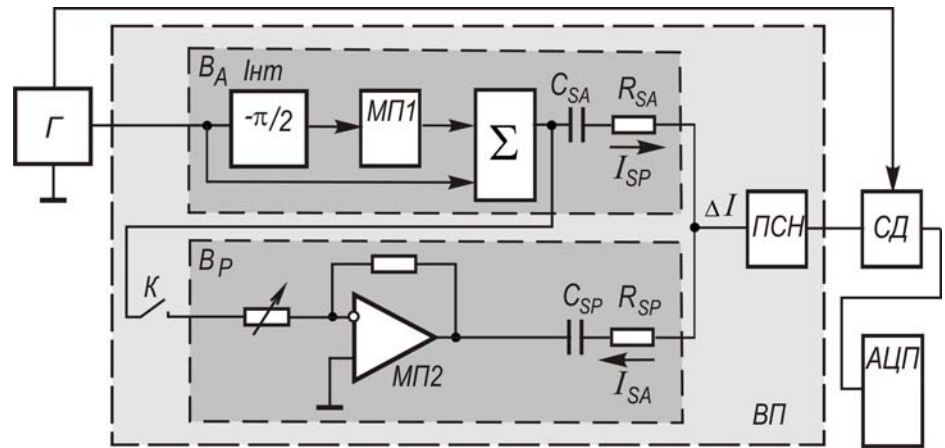


Рис. 1

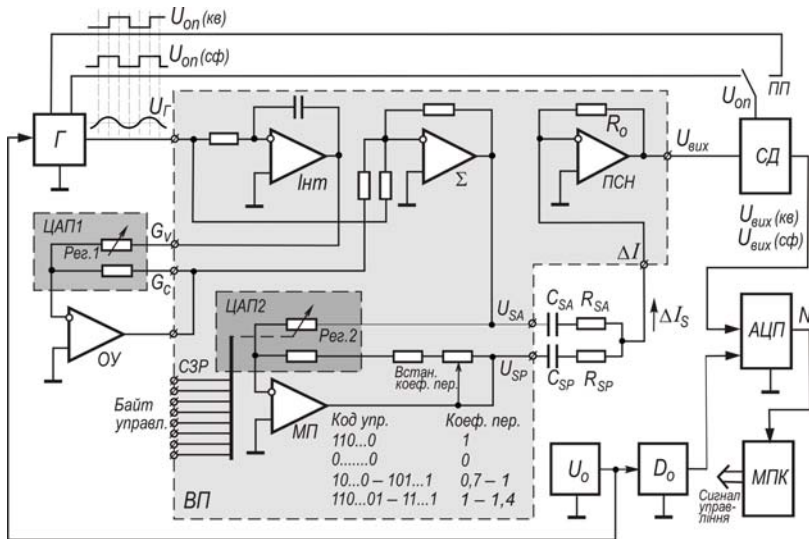


Рис. 2

описаному вище біосенсорному режимі, так і в режимі самодіагностики, при якому визначаються параметри послідовної схеми заміщення активного перетворювача і відмінності від них параметрів пасивного перетворювача.

Цифровий генератор Г, синхронний детектор СД з перемикачем ПП вимірюваних параметрів, АЦП, джерело опорної напруги U_0 з подільником напруги D_0 , мікропроцесорний контролер МПК, а також операційний підсилювач ОУ з

цифроаналоговим перетворювачем ЦАП1 є блоками базового модуля приладу, а вторинний перетворювач ВП служить змінним блоком (адаптером), який встановлюється в базовий модуль для його узгодження з сенсорами.

Принцип дії удосконаленого ВП дещо відрізняється від описаного раніше. Перед вимірюванням балансують компенсаційно-мостове коло. Для цього за допомогою інтегратора $I_{нт}$ і суматора Σ з напруги $U_{Г}$ генератора формують напругу $U_{СА}$, яка забезпечує синфазність $U_{Г}$ зі струмом $I_{СА}$ в активному перетворювачі при відключеній (за рахунок нульового значення коду керування ЦАП2) гілці пасивного перетворювача. Якщо вибрати елементи інтегратора такими, щоб його вихідна напруга за модулем дорівнювала $U_{Г}$, то тангенс фазового кута напруги $U_{СА}$ буде визначатися кодом управління ЦАП1. Одночасно можна визначити і параметр $R_{СА}$ сенсора. Напруга на цьому елементі схеми заміщення після завершення компенсації напруги на ємності дорівнює $U_{Г}$, а струм $I_{СА}$ пов'язаний через опір R_0 ПТН з вихідним сигналом $U_{Вих}$ адаптера, який вимірюється за допомогою АЦП. З цього випливає співвідношення $U_{Вих} / U_{Г} = R_0 / R_{СА}$. При необхідності за параметрами $\text{tg } \varphi$ і $R_{СА}$ схеми заміщення активного перетворювача можна розрахувати і його ємність $C_{СА}$.

На наступному етапі включають гілку пасивного перетворювача, подаючи код керування 1100000 (при такому коді коефіцієнт передачі МП дорівнює одиниці), та остаточно балансують мостову схему за модулем синфазної складової вихідного струму ΔI_S , змінюючи цей код. При цьому діапазон регулювання напруги $U_{СП}$ щодо $U_{СА}$ складає від -40 до +40 %. Після повного балансування моста можна визначити відмінності параметрів активного і пасивного перетворювачів. Відношення коду управління ЦАП 2 після досягнення балансу до коду управління МП при його одиничному коефіцієнті передачі дорівнює співвідношенню модулів імпедансів пасивного та активного перетворювачів. Тангенс різниці фазових кутів φ_A і φ_P можна визначити шляхом вимірювання квадратурної складової залишкового сигналу нерівноваги моста (різниці $I_{СА}$ і $I_{СП}$).

Наявність у розробленому приладі діагностики параметрів кондуктометричних перетворювачів дає змогу додатково стабілізувати чутливість вимірювального каналу, підвищити його точність і отримати результат вимірювання безпосередньо в одиницях електропровідності – сіменс (См) або в одиницях питомої електропровідності – См/см без виконання калібрувань за допомогою зразкових розчинів. Для цього при першому калібруванні вимірювального каналу виробником або користувачем замість кондуктометричного сенсора підключають зразкові резистори, а коефіцієнт передачі каналу регулюють таким чином, щоб отримане значення $R_{СА}$ збігалось з опором цих резисторів. При вимірюванні змін електропровідності розчинів відгук вимірювального каналу множиться на коригуючий коефіцієнт $K = (1 + \text{tg} \varphi)^{1/2}$, де φ – фазовий кут кондуктометричного перетворювача, отриманий у режимі діагностики його параметрів. Використання описаного методу корекції характеристики перетворення

кондуктометричної системи забезпечує відтворюваність і порівняність результатів вимірювання, отриманих з використанням різних приладів, у різний час і за різних умов.

2. Дослідження ємнісних сенсорів для діагностики потужних турбо- та гідрогенераторів

2.1 Ємнісний вимірювач биття вала. У результаті виконання науково-дослідної роботи „Моніторинг-ЕМ” було створено ємнісні вимірювачі биття з підвищеними метрологічними характеристиками для їх застосування на потужних гідро- та турбогенераторах.

Основні результати цієї роботи:

1. Уперше обґрунтовано застосування і аналітично визначено функції перетворення (з урахуванням кривизни вала) ємнісних сенсорів биття з різними формами електродів [7]: а) плоскої круглої; б) плоскої прямокутної; в) у вигляді фрагмента бічної поверхні циліндра, обмеженої круглим контуром [5]; г) у вигляді фрагмента бічної поверхні циліндра, обмеженої прямокутним контуром [5]; д) прямокутних паралельних компланарних електродів [3].

Встановлено, що похибка вимірювання відстаней, обумовлена кривизною вала, зростає зі зменшенням відстані між поверхнею активного електрода і поверхнею вала (зазор). Ця обставина накладає вимоги на вибір початкового, тобто мінімального зазору сенсора. Його варто вибирати, виходячи із заданої допустимої похибки вимірювання. З іншого боку, ця ж похибка зростає зі збільшенням радіуса активного електрода і зменшенням радіуса контрольованого вала. Для зменшення похибки, зумовленої кривизною вала, необхідно зменшувати поперечний розмір сенсора. При цьому цей розмір вибирається залежно від якості обробки поверхні, биття якої вимірюється, радіуса вала і діапазону вимірювання.

2. Визначено аналітичні та графічні залежності для розрахунку ширини охоронного електрода плоских ємнісних сенсорів биття. За допомогою отриманих результатів та заданої похибки вимірювання можна розрахувати ширину охоронного електрода.

3. Запропоновано і обґрунтовано методи розрахунку похибок ємнісних сенсорів биття, обумовлені неточністю установки на машині плоских сенсорів з активним круглим і активним прямокутним електродами. Визначено аналітичні та графічні залежності похибок від розмірів вала машини і геометричних розмірів сенсорів. Встановлено, що найбільшу похибку вносить перекис активних плоских електродів, причому похибка від перекоосу при вимірюванні биття на одному контрольованому валу зі зменшенням поперечної ширини активного електрода зменшується і мало залежить від радіуса вала.

Вплив ексцентриситету (при вимірюванні одним і тим самим сенсором) більш відчутно позначається при менших значеннях радіуса вала.

4. Запропоновано структурні схеми електронних перетворювачів биття з ємнісним сенсором: а) на основі схеми випрямляча з подвоєнням напруги; б) з використанням пристроїв вибирання-зберігання та екстрематора; в) з використанням цифрової схемотехніки.

На основі отриманих результатів розроблено та випробувано макет ємнісного вимірювача радіального биття циліндричних поверхонь вала з плоским круглим активним електродом сенсора. Алгоритм роботи вимірювача передбачає визначення биття як різниці найбільшої та найменшої відстаней між поверхнями вала та активного електрода, виміряних за один оберт.

Для лабораторних випробувань вимірювача биття і демонстрації його функціональних можливостей було розроблено випробувально-демонстраційний стенд, структурна схема якого показана на рис. 3, а загальний вигляд – на рис. 4. До складу стенда входить: макет генератора 1 з валом 2; ємнісний сенсор 3; сенсор мітки вала 4; вторинний вимірювальний перетворювач 5; пристрій визначення максимуму і мінімуму 6; пристрій віднімання 7; блок індикації 8. Пристрої 5, 6 і 7 об'єднані в один блок. До складу стенда входить також електродвигун 10, від якого через редуктор 11 здійснюється обертання контрольованого вала 2. Вся конструкція змонтована на плиті 9.

Випробування макета вимірювача на стенді здійснюється таким чином. При обертанні вала 2, який встановлено з ексцентриситетом e відносно осі обертання, виникає радіальне биття його циліндричної поверхні, що призводить до зміни зазору в сенсорі 3, тобто відстані

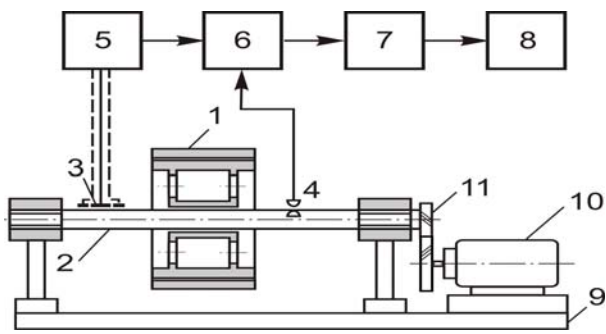


Рис. 3



Рис. 4

між валом 2 і поверхнею активного електрода. У вторинному перетворювачі 5, який містить в собі компенсаційно-мостове вимірювальне коло, виміряна відстань перетворюється в прямо пропорційну постійну напругу U . Далі в пристрої 6 з використанням сигналу від сенсора мітки вала 4 визначаються мінімальна U_{\min} та максимальна U_{\max} напруги. Блок 7 визначає різницю $U_{\max} - U_{\min}$, яка відображає биття. Індикацію здійснює пристрій 8. Вимірне значення биття δ дорівнює подвійному ексцентриситету, тобто $\delta = 2e$.

Проведені випробування засвідчили відповідність реальних характеристик вимірювача розрахунковим. Отримані результати досліджень дають змогу створити сучасні високоточні та високонадійні засоби вимірювання биття циліндричних поверхонь валів потужних електричних машин, зокрема, гідро- і турбогенераторів. Це дає змогу удосконалити системи їх контролю та діагностики, а значить, підвищити надійність машин, своєчасно виявити дефекти та перейти від ремонтів машин за розкладом до ремонтів за їх станом.

НОМ.

2.2. Двопараметровий ємнісний сенсор вимірювання тиску пресування осердя статора потужних генераторів. Зниження тиску пресування осердя статора потужних генераторів призводить до втрати запасу працездатності і є потенційною причиною небезпечних ушкоджень статора. Тому розробка і впровадження в практику ефективних методів контролю та діагностики стану спресованості є важливим і перспективним напрямком підвищення надійності потужних електрогенераторів.

Запропоновано тонкошаровий сенсор для вимірювання тиску пресування осердя, який встановлюється між листами пакета [8]. В сенсорі одночасно використовуються два методи вимірювання – ємнісний і електромагнітний. Ємнісний сенсор забезпечує роботу на зупиненій машині, а електромагнітний – також і в робочому її стані.

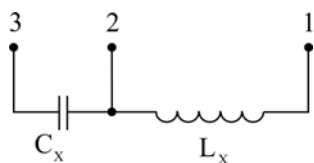


Рис. 5

Електрична схема сенсора показана на рис. 5. Ємність C_X сенсора увімкнена між виводами 2 і 3, а індуктивність – між виводами 1 і 2.

Вимірювальний конденсатор утворений електродами $E1$ і $E2$ (рис. 6) з діелектричним зазором d_0 між ними, причому електрод $E1$ виконано у вигляді плоскої спіралі, а електрод $E2$ – у вигляді круглої площини. Електрична ємність C_X між електродами $E1$ і $E2$ (виводи 2 і 3) змінюється зі зміною тиску стиснення $C_X = f(\sigma)$.

Тиск спресованості σ визначається через ємність C_X сенсора з наступної залежності:

$$\sigma = E_C \left(1 - \frac{1}{C_X} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_C a \pi N [a + (a + c) N]}{d_0} \right) = E_C \left(1 - \frac{C_0}{C_X} \right), \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ – діелектрична проникність вакууму; ε_C – відносна діелектрична проникність ізоляційного прошарку; d_0 – відстань між електродами сенсора; a – ширина стрічки

спіралі; c – відстань між витками спіралі; N – кількість витків спіралі; C_0 – ємність сенсора при відсутності тиску.

У спіральному електроді $E1$, що є, по суті, плоскою котушкою L_X (виводи 1 і 2), індукується напруга, прямо пропорційна аксіальній складовій магнітної індукції B_Z , що у свою чергу функціонально залежить від тиску стиснення $B_Z = f(\sigma)$.

Аксіальну складову магнітної індукції B_{mz} можна визначити через геометричні параметри сенсора a, c, N і напругу U_{12} з виразу

$$B_{mz} = \frac{\sqrt{2}U_{12}}{N\pi[(a+c)N+a]^2 \omega} \quad (2)$$

Тиск спресованості σ визначається за відомою з літератури експериментальною залежністю від B_{mz} .

3. Дослідження оптичних та оптоволоконних вимірювальних систем

Застосування волоконно-оптичного кабеля (ВОК) для передавання сигналів вимірювальної інформації від сенсорів до пристроїв обробки цих сигналів дає змогу суттєво спростити вимірювальну систему та підвищити її завадостійкість [6]. Для вимірювальних систем з оптичними сенсорами використання ВОК є оптимальним. Як приклад слід назвати оптичні системи для вимірювання повітряного зазору між статором і ротором, зокрема, лазерні триангуляційна та з перериванням відбитого променя.

Принцип дії волоконно-оптичного вимірювача биття вала потужного гідрогенератора базується на залежності коефіцієнта відбиття світла в сенсорному елементі від відстані [6].

Сенсор, зображений на рис. 7, складається з трубчастого корпусу 1, один з торців якого жорстко з'єднаний з нерухомою частиною генератора, світлопроводного волокна 2, з допомогою якого здійснюються передача та прийом світлового променя, дзеркала 3, розташованого на відстані z від торця волокна 2, постійного магніта 4, жорстко зв'язаного з корпусом 1 і дзеркалом 3. Магніт 4 знаходиться на відстані d від поверхні вала 5, биття якого контролюється. Магніт 4 притягується до вала 5 з певним зусиллям P , значення якого залежить від відстані d між торцем магніту і валом. Якщо циліндрична поверхня вала 5 при його обертанні має деяке биття, то воно викликає зміну відстані d , що в свою чергу змінює зусилля P :

$$P=kd, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від типу матеріалу, намагніченості й геометричних розмірів магніту. У свою чергу зусилля P , прикладене до корпусу довжиною l , викличе його розтягування на величину

$$\Delta l = Pl/ES, \quad (4)$$

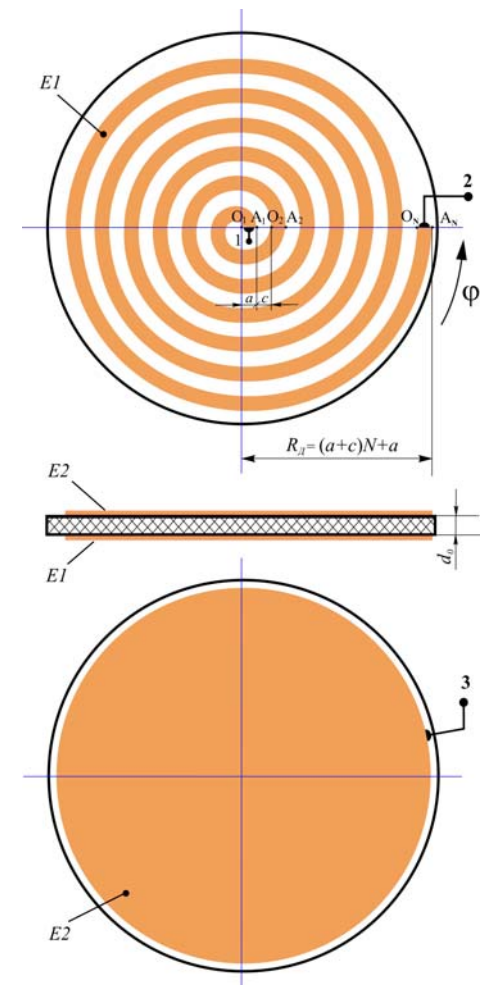


Рис. 6

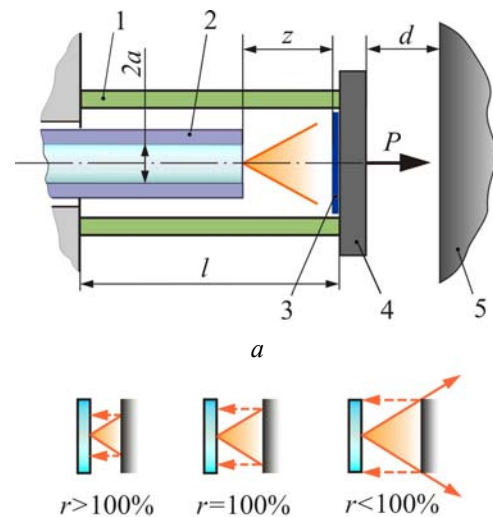


Рис. 7

де E – модуль пружності матеріалу корпусу 1; S – площа поперечного перерізу трубчастої ділянки корпусу. Оскільки корпус 1, дзеркало 3 і магніт 4 жорстко сполучені між собою, то на таку ж величину Δl зміниться і відстань z .

Якщо припустити, що коефіцієнт відбиття світла від дзеркала становить 100 %, а відбиттям від торця світлопроводу можна знехтувати, то частка оптичної потужності r (рис. 7 б), що надходить назад у світлопровід після відбиття від дзеркала, становить

$$r = 2 / \pi \left[1 / p^2 \arcsin(p / 2) + 2 \arccos \left\{ (p + 2)^{1/2} / 2 \right\} - \left\{ (p^2 + 2) \cdot (4 - p^2) \right\} / 8p \right], \quad (5)$$

де $p = 2 \cdot NA \cdot z / a$; NA – числова апертура, що характеризує розбіжність світла на виході із світлопроводу; a – радіус серцевини світлопроводу.

Числова апертура NA волокна – це синус максимального кута падіння променя по відношенню до осі волокна (синус максимального вхідного кута оптоволокна), при якому світло входить у серцевину і далі поширюється по волокну. NA визначається за різницею показників заломлення серцевини і оболонки:

$$NA = \frac{1}{\eta_0} \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}, \quad (6)$$

де η_0 – показник заломлення довкілля (для повітря $=1$); η_1 – показник заломлення серцевини; η_2 – показник заломлення оболонки.

Для одномодового волокна значення NA , як правило, близьке до 0,1, але може варіювати в межах приблизно від 0,05 до 0,4. Багатомодові волокна зазвичай мають більш високу числову апертуру, наприклад, 0,3. Вищі значення NA можливі для фотонно-кристалічних волокон.

Рівняння (3)...(6) визначають функцію перетворення оптичного сенсора. Залежність оптичної потужності відбитого світла r від відстані z між торцем світлопроводу і дзеркалом $r=f(z)$ в інтервалі значень $a < r < 3a$ близька до лінійної. Цю обставину необхідно враховувати при проектуванні сенсора.

На рис. 8 показана структурна схема вимірювальної системи, яка складається з волоконно-оптичного сенсора 1, волоконно-оптичного кабеля 2, волоконно-оптичного розгалужувача 3, світловипромінювального діода 4, світлоприймального пристрою 5, індикатора 6, контрольованого вала 7.

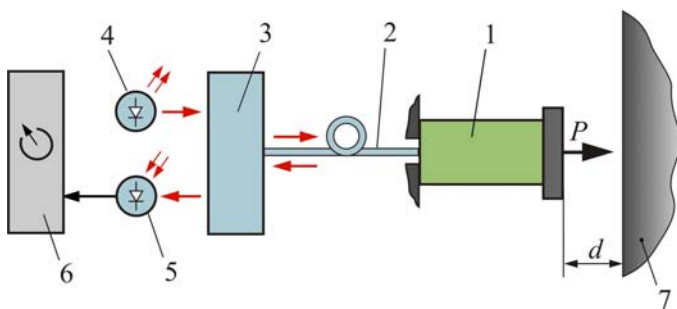


Рис. 8

Від лазерного світловипромінювального діода 4 через волоконно-оптичний розгалужувач 3 і волоконно-оптичний кабель 2 на вхід волоконно-оптичного сенсора 1 надходить світловий сигнал. Сигнал відбитого світла, пропорційний відстані z і відповідно відстані d між сенсором 1 і валом 7, з виходу сенсора 1 через кабель 2, розгалужувач 3 надходить на світлоприймальний пристрій 5.

Перетворений в електричну напругу цей сигнал посилюється і подається на вхід індикатора 6.

Всі компоненти схеми є типовими (окрім сенсора) і серійно випускаються різними фірмами.

Застосуванню оптичних вимірювачів у системах контролю та діагностики перешкоджає дуже висока вартість розробки нових сенсорів, а номенклатура серійних незначна. Через це перспективним напрямком є використання так званих гібридних волоконно-оптичних вимірювачів [4, 6]. Гібридний волоконно-оптичний вимірювач (ГВОПВ), схема якого показана на рис. 3, в основі містить волоконно-оптичний світловод як засіб передачі інформації і традиційні сенсори як первинні перетворювачі. Живлення таких сенсорів може здійснювати-

ся двома способами: а) за допомогою джерел, розташованих поруч із сенсором (рис. 9 а); б) за допомогою енергії, переданої через світловод (рис. 9 б).

Основними складовими частинами ГВОПВ є вторинний вимірювальний перетворювач 1, сенсор 2, блок кодування і передачі інформації 3, напівпровідниковий лазер 4, волоконно-оптичні кабелі 5 і 11, фотодіод 6, декодер 7, блок відображення 8, блок живлення 9, напівпровідниковий лазер 10, блок перетворення світло-напруга 12.

Якщо використати ємнісні сенсори, то за описаним принципом можна побудувати систему для вимірювання параметрів механічних дефектів у потужних генераторах. У цьому випадку одержимо поєднання високої завадостійкості ліній зв'язку між сенсорами і вторинними перетворювачами та простоти і малої вартості ємнісних сенсорів.

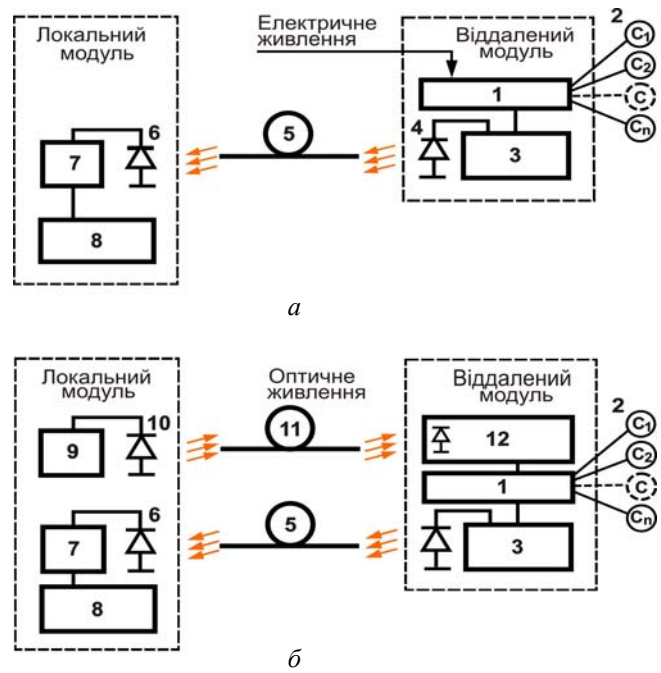


Рис. 9

4. Удосконалення адаптивних лазерних вимірювальних систем

Розробка методів побудови та дослідження адаптивних електровимірювальних систем, оптимальних за швидкістю і точністю (з урахуванням впливу завад), орієнтована в першу чергу на використання у лазерних вимірювачах переміщень і параметрів вібрацій об'єктів різного призначення. У результаті проведених досліджень за вказаним напрямком отримано наступне:

1. При розробці імпульсних далекомірів запропоновано та детально досліджено з використанням методу найменших квадратів систему корекції похибок, обумовлених нелінійністю амплітудних характеристик перетворювальних ланок далекоміра при зміні амплітуди і форми відбитого від контрольованого об'єкта світлового сигналу, а також з урахуванням впливу широкосмугових завад [1]. Запропонована система корекції дає змогу в 2...3 рази зменшити результуючу похибку вимірювання відстані. Результати досліджень використано для поліпшення технічних характеристик оптичного вимірювача відстаней до кромки хмар „Промінь”, який випускається невеликими серіями для оснащення аеродромів.

2. Розроблено нові методи побудови фазових лазерних далекомірних систем, в яких як генератори модуляційної напруги використовуються сучасні цифрові синтезатори частоти [8]. У поєднанні з перетворенням Гільберта практична реалізація таких систем дає змогу суттєво зменшити час вимірювання переміщень та параметрів вібрацій. У результаті виконаного аналізу встановлено, що застосування вказаних методів дає змогу розширити діапазон частот вібрацій досліджуваних об'єктів більше ніж у 10 разів (від 1,5 до 15...20 кГц). Розглянуто можливості подальшого підвищення точності фазових лазерних далекомірів. У цьому випадку оцінка відстаней проводиться при досягненні зі зміною частоти модуляції лазерного випромінювання певного значення вихідної величини системи. Оцінено недоліки існуючих технічних рішень, запропоновано новий підхід для підвищення точності таких систем. За результатами досліджень планується оформлення патента.

3. Розроблено методу оцінки динамічної похибки, обумовленої перетворювальними процесами в цифрових синтезаторах частоти, які застосовуються в частотно-фазових системах. Виходячи із заданої похибки вимірювання лінійних переміщень та параметрів вібрацій досліджуваного об'єкта, оцінено часові характеристики фільтра нижніх частот на вході АЦП

для розробленого пристрою (час встановлення вихідного сигналу фільтра становить приблизно 5...10 мкс).

4. Розроблено алгоритми функціонування та програмне забезпечення системи корекції похибок, обумовлених паразитним електричним взаємозв'язком каналів фазометра. Проведено попередні експериментальні дослідження макета фазового лазерного далекоміра, де застосовано вказану систему. Пристрої орієнтовані на вимірювання відстані до дифузно-відбиваючих та нагрітих об'єктів, на результат якого впливають шуми та гармонічні складові завад. За попередньою домовленістю з Інститутом проблем лиття НАН України фазові лазерні далекоміри буде використано для вимірювання рівня рідких металів при виконанні запланованих робіт, які проводяться цим інститутом.

5. Створення сенсорних вимірювальних систем з елементами прямого цифрового керування для об'єктів енергетики

У цьому напрямку проводяться роботи зі створення контрольно-вимірювальних засобів для механізмів трубопровідної арматури електрогенеруючих об'єктів, у тому числі АЕС.

У результаті аналізу технічних характеристик існуючих пристроїв контролю електроприводів запірної арматури АЕС і сучасних вимог до надійності та безпеки експлуатації АЕС запропоновано створення електронних шляхових контролерів арматури з підвищеною точністю встановлення цієї арматури та значно розширеними функціональними можливостями, зокрема, з елементами діагностики.

Для шляхових контролерів багатообертових електроприводів трубопровідної арматури особлива увага приділялась створенню мікроспоживаючих дискретних сигналізаторів кута повороту вала приводу – елемента, що визначає точність позиціонування арматури і час автономного функціонування пристрою при відключеній мережі живлення. У результаті проведеного комп'ютерного 2D-моделювання магнітних полів розробленого магнітного сигналізатора кута повороту вала отримано графіки напруженості магнітного поля для різних варіантів конструкцій, що дало можливість вибрати оптимальні.

Досліджувалися варіанти побудови шляхових контролерів для роботи в екстремальних умовах, зокрема, під ковпаком реактора в зоні з підвищеною радіацією. У цій зоні такі інтегральні схеми, як мікроконтролери, модулі з флеш-пам'яттю та інші, працюють дуже ненадійно. Для роботи з арматурою в цих умовах запропоновано структуру шляхового контролера з територіально рознесеним блоком сигналізатора кута повороту вала і блоком обробки даних, який виноситься за межі реактора, а сигналізатор кута повороту і його інтерфейс з електронним блоком реалізуються за допомогою гібридної волоконно-оптичної системи, перспективи і шляхи застосування якої в обладнанні АЕС проаналізовано в [4].

В однообертовій регульовальній арматурі трубопроводів АЕС точність встановлення кута повороту в основному визначається точністю вимірювання цього кута і визначає точність усієї арматури. Для шляхових контролерів запропоновано застосувати вимірювачі кута повороту на основі ємнісного диференціального сенсора, який забезпечує потрібну точність і відрізняється дуже малою чутливістю до ряду впливних чинників (температура, технологічні похибки, параметри підведеного електричного сигналу та ін.). Отримано аналітичні вирази для функції перетворення декількох конструктивних виконань цих сенсорів, що дає змогу розраховувати сенсори для конкретних технічних завдань.

Для визначення параметрів, за якими можливе діагностування стану арматури, розроблена математична динамічна модель електромеханічного приводу, що включає в себе поєднання передаточної функції, яка зв'язує кут повороту вала з моментом, прикладеним до його осі, передаточної функції редуктора, як безінерційної ланки, та ходового гвинта арматури, як інтегратора. На моделі імітувались різні види несправностей вузлів арматури, які задавались у виді зовнішніх збурень, і досліджувався їхній вплив на швидкість обертання ходового гвинта. Результати досліджень показали диференційований вплив на швидкість обертання вала різних збурень. Отримані дані про рівномірність обертання вала можуть служити діагностичною ознакою для локалізації несправностей і оцінки стану електроприводу, а збір цих даних закладений в набір функцій шляхових контролерів.

Розроблені функціональні та принципові схеми вузлів шляхових контролерів дають змогу реалізувати пристрої, що відповідають сучасним вимогам до апаратури АЕС.

1. Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Масюренко Ю.А., Кононенко А.Г., Ниженский А.Д., Латенко В.И., Орнатский И.А. Коррекция погрешностей в высокоточных импульсных лазерных дальномерах // Техн. электродинамика. – 2012. – № 6. – С. 68–74.
2. Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Масюренко Ю.А., Кононенко А.Г., Ниженский А.Д. Фазовый лазерный измеритель параметров вибраций с расширенным частотным диапазоном // Техн. электродинамика. – 2013. – № 1. – С. 82–85.
3. Гриневич Ф.Б., Монастырский З.Я. Покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик уніфікованих вимірювальних засобів для електроенергетики // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: – Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 32. – С. 54–62.
4. Ключников А.А., Левицкий А.С., Федоренко Г.М. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы – путь к повышению надежности АЭС, ТЭС и ГЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2012. – Вип. 18. – С. 57–65.
5. Левицкий А.С. Измеритель биений вала гидрогенератора с помехозащищенным трактом передачи сигнала // Гідроенергетика України. – 2012. – № 3. – С. 46–47.
6. Левицкий А.С. Ємнісні сенсори биття вала гідрогенератора з активним електродом у формі фрагмента бічної поверхні циліндра // Гідроенергетика України. – 2012. – № 2. – С. 5–9.
7. Новик А.И., Неболюбов Е.Ю., Левицкий А.С. и др. Варианты построения емкостных измерителей радиального биения валов электрических машин // Техн. электродинамика. – 2012. – № 6. – С. 75–78.
8. Пат. на корисну модель 73440 МКІ G01 В 7/16, G01 В 7/22, G01 В 7/24 Україна. Двопараметровий тонкошаровий сенсор вимірювання тиску стиснення осердя статора / А.С. Левицький, Г.М. Федоренко; Заявник і власник Інститут електродинаміки Національної академії наук України – у 2012 02503; Заявл. 02.03.12; Опубл. 25.09.12, Бюл. №18.

УДК 621.317

Ф.Б. Гриневич, акад. НАН України, **З.Я. Монастырский**, докт. техн. наук, **В.Г. Мельник**, канд. техн. наук, **А.С. Левицкий**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы 56, Киев-57, 03680, Украина

Улучшение метрологических характеристик сенсорных измерительных систем

Приведены основные результаты научных исследований, которые проводились в отделе электрических и магнитных измерений в 2012 г. Они касаются разработки, усовершенствования и испытаний датчиков неэлектрических величин, их согласования со вторичными измерительными преобразователями. В частности, рассмотрены биосенсорные измерительные каналы, элементы диагностических систем мощных генераторов с емкостными и оптическими датчиками, а также гибридные измерительные системы с оптоволоконными соединительными линиями. Библиограф. 8, рис. 9.

Ключевые слова: измерения, диагностика, мощный генератор, биосенсор, емкостный датчик, оптические измерительные системы.

F.B. Grynevych, Z.Ya. Monastyrskiy, V.G. Melnyk, A.S. Levytskyi
Institute of Elektrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Improvement of metrology characteristics of sensor measuring systems

Here shown primary results of scientific research activities that have been conducted in the Electrical and Magnetic Measurements Division during 2012. They relate to development, improvement and testing of sensors non-electrical quantities, their adapting with secondary measuring transducers. In particular, biosensor measuring channels, elements of diagnostic system for power generators with capacitive and optical sensors and hybrid measuring systems with fiber interconnecting line. References 8, figures 9.

Key words: measuring, diagnostics, power generator, biosensors, capacity sensor, optical measuring system.

Надійшла 10.04.2013

Received 10.04.2013