

## КЛАСИФІКАЦІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА КОНСТРУКТИВНІ ПАРАМЕТРИ ПЕРКОЛЯЦІЙНО-ФРАКТАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ

*Грабар І. Г., д.т.н, Плужніков О. Б., аспірант*

Системи автоматизації сільськогосподарських машин – це комплекс складного багаторівневого устаткування, орієнтований на забезпечення максимальної продуктивності й високої якості продукції.

У сучасних технологічних установках необхідне регулювання різноманітних технологічних параметрів: температури, тиску, рівня, витрат, якості і складу тощо. Взаємодія систем керування з технологічними процесами при виробництві продукції, контроль за параметрами, кількістю і якістю продукту здійснюють різні датчики, сенсори й аналітичне устаткування. Датчик є найважливішим елементом системи автоматичного регулювання.

Наразі в різних областях науки і техніки залишається необхідність отримання високоточних результатів вимірювання лінійних деформацій. Застосування датчиків дає можливість постійно контролювати хід технологічного процесу й оптимізувати його, що поліпшує якість продукції й підвищує конкурентоспроможність виробництва. Зростання цін на енергоносії й матеріали підвищує вимоги до їхнього обліку й ефективного використання, а отже, виникає потреба в приладах обліку.

Усередині 90-х років почалася активна модернізація виробничого устаткування, розпочалося будівництво нових виробництв із високим рівнем автоматизації технологічних процесів. Стійке зростання промислового виробництва означає в тому числі й збільшення темпів впровадження сучасних технологій і систем керування. Збільшення потреби в датчиках і аналітичному устаткуванні відбувається нині випереджальними темпами

порівняно із загальним розвитком галузей промисловості. Це пов'язане з тим, що крім створення нових виробничих потужностей, відбувається активна модернізація устаткування, яке було встановлене ще 20 або 30 років тому і яке не відповідає сучасним вимогам. Значну частку займає також планова заміна й ремонт датчиків на вже працюючих виробництвах.

**Метою роботи** є огляд сучасної класифікації датчиків і згідно неї характеристика деяких моделей перколяційно-фрактальних датчиків (ПФД), як нового класу, що потребує досконалого вивчення.

**Аналіз останніх публікацій і досліджень.** Класифікують датчики за *принципами дії* (електричних, акустичних і ін.), та за структурними і функціональними ознаками, що характеризують датчики [4].

Активна (енергетична) *вхідна* величина може сприйматися безпосередньо. Для сприйняття ж властивостей пасивної (у енергетичному сенсі) речовини необхідно надати йому енергетичні властивості, впливаючи на цю речовину додатковою енергією. Наприклад, пропустити через опір струм і отримати як параметр речовини напругу, що утворилася на його опорі. Оцінити розмір вхідної величини можна, використовуючи різницю результатів цієї оцінки до і після її дії. Таким чином, відповідно до сказаного можна виділити активні (генераторні) і пасивні (параметричні) датчики.

Класифікаційною ознакою також є характер *вихідного сигналу* датчика. Вихідний вимірювальний сигнал датчиків може бути промодульований різним чином. Можуть бути використані амплітудна (АМ), частотна (ЧМ), фазова (ФМ) модуляції. Сигнал може бути представлений в неперервній, імпульсній і цифровій формі.

Серед аналогових видів модуляції слід виділити частотну. Вона є аналогом модуляції сигналів в рецепторах біологічних аналізаторів, має підвищену перешкодостійкість і декілька інформаційних параметрів (частота, фаза, довжина хвилі, період).

Крім того, принципи побудови датчиків – генераторів частотних сигналів – розроблені досить добре. До частотних датчиків можна віднести датчики резонансного типу, маятникові, струнні, ядерно-магнітні пристрої, *LC* і *RC* генератори, частотно-залежні ланцюги, ультразвукові пристрої, а також датчики, засновані на використанні потоку фотонів, на ефекті Баркгаузена, на термошумах тощо. При використанні електромагнітних, оптичних, звукових частотних сигналів можливі їх бездротова передача, генерація зразкових сигналів в ближній зоні і організація стільникової структури, обслуговуючої одночасні декілька датчиків. Шкала частот, що генеруються, може бути достатньо широкою.

На вході датчиків можуть діяти фізичні величини, що вимірюються безпосередньо, або їх складові (при виконанні непрямих вимірів) [1].

Як вже зазначалось, енергетичні властивості вхідних величин дозволяють поділити датчики на *активні* і *пасивні*. В активних датчиках вхідні величини мають енергетичну природу, в пасивних – неенергетичний (речовинний) параметр.

Активними вхідними величинами є параметри енергії електричної, магнітної, теплової, механічної, акустичної, оптичної, радіаційної і хімічної природи.

Приведемо короткий перелік основних активних вхідних величин:

електрична енергія: напруга; ЕРС; потенціал; струм; заряд; потужність; енергія.

магнітна енергія: магніторушійна сила; магнітний потік; магнітна індукція.

механічна енергія: сила; маса; тиск; механічна напруга; швидкість; прискорення; потужність; енергія.

акустична енергія: акустичний тиск; інтенсивність звука; потужність; енергія.

теплова енергія: температура; тепловий потік; термодинамічний потенціал.

оптична енергія: потужність випромінювання; потік випромінювання; освітленість; яскравість; спектральна щільність; сила світла; світловий потік.

іонізаційна енергія: енергія випромінювання; потужність дози випромінювання; потік випромінювання.

хімічна енергія: молярна енергія; хімічний потенціал.

Пасивні сигнали при сприйнятті потребують перетворення їх в активні, еквівалентні вхідним енергетичні сигнали. Потім, так само як і сигнали активних датчиків, вони сприймаються і перетворюються за допомогою певного фізичного ефекту в речовині чутливого елементу у вимірювальний сигнал.

Приведемо перелік пасивних вхідних величин:

електрична енергія: провідність; опір; діелектрична проникність.

магнітна енергія: магнітна проникність; індуктивність; взаємна індуктивність.

механічна енергія: маса; механічний опір; в'язкість; тертя; твердість; довжина; площа; об'єм; витрата.

акустична енергія: акустичний опір; акустична проникність; коефіцієнти поглинання, віддзеркалення і розсіювання.

теплова енергія: теплоємність; коефіцієнти теплопровідності, теплопередачі.

оптична енергія: коефіцієнти віддзеркалення, розсіювання, пропускання, заломлення; колір; поляризація.

іонізаційна енергія: постійна радіоактивного розпаду; коефіцієнт поглинання.

хімічна енергія: молярний об'єм; дифузія; концентрація; молярна ентропія.

За кількістю сприйнятих і перетворюваних величин можна виділити датчики *одновимірні*, що оперують з однією величиною, і *n-мірні* (багатовимірні), що сприймають декілька ( $n$ ) вхідних величин. Багатовимірні датчики можуть мати спільні елементи і тому можуть бути простіше, ніж сукупність одновимірних датчиків [1].

По кількості виконуваних датчиком функцій їх можна розділити на *однофункціональні* і *багатофункціональні* ( $m = 2,3\dots$ ). Багатофункціональні датчики можуть окрім основної функції (сприйняття величини і формування вимірювального сигналу) виконувати ряд додаткових функцій, таких як, наприклад, функції фільтрації, обробки аналогових сигналів і тому подібне.

У датчиках можуть використовуватися послідовно або паралельно один або декілька фізичних ефектів, тобто вони можуть бути одноступінчастими і багатоступінчастими. В даний час датчики, що сприймають більше трьох величин, а також датчики, що виконують більше трьох функцій і засновані на використанні більше трьох фізичних явищ, досить рідкі.

Отже, датчики можна представити в тривимірному просторі з координатами: кількість величин –  $n$ ; кількість функцій –  $m$ ; кількість ступенів перетворень –  $l$ .

Окрім названих датчиків можна відзначити датчики, що виконують *системні функції*, до яких відносяться сприйняття полів температури, деформацій тощо.

За технологією виготовлення датчики можна умовно розділити на *елементні*, такі що виготовляються з набору окремих елементів, і *інтегральні*, з одночасним виготовленням за інтегральною мікроелектронною технологією всіх складових елементів датчиків. Ця технологія дозволяє забезпечити датчикам видатні характеристики.

Особливо слід виділити *біологічні* датчики, в яких як чутливі елементи використовуються рецепторна частка біологічних органів чуття, ферменти і інші речовини і електронна частка, що формує вимірювальні сигнали.

У біологічних аналізаторах живих організмів бере участь дуже велика кількість рецепторів. Наприклад, рецепторне поле зорового аналізатора включає біля 108 рецепторів, нюхового і слухового аналізаторів – більше 30 тисяч рецепторів, розташованих в невеликому об'ємі. Як відомо, вихідний сигнал рецепторів пропорційний натуральному логарифму інтенсивності дії з боку сприйнятої величини. Сумарний сигнал поля рецепторів залежить від їх кількості. При цьому точність сприйняття градієнтів вхідних величин залежатиме від розмірів рецепторів. Велика, надлишкова кількість рецепторів, окрім підвищення надійності за рахунок багатократного дублювання і інтеграції їх сигналів, дозволяє забезпечити підвищену точність сприйняття вхідної величини. Зменшення розмірів і маси датчиків може привести при сприйнятті вхідної

величини до зростання сумарного вихідного сигналу, зниженню впливу перешкод і, кінець кінцем, до підвищення достовірності отримуваних даних [6, 7].

Переваги мініатюрних датчиків особливо виявляються при дослідженні малогабаритних об'єктів.

Питання про використання надлишкової кількості елементів мають велике значення для вимірювальної техніки, оскільки вони можуть поліпшити якість вимірів. Наявність великої кількості елементів робить доречним застосування статистичного підходу до аналізу і синтезу роботи системи.

*Найважливіше* при аналізі роботи датчиків – це розгляд принципів їх дії, використання фізичних явищ, покладених в основу побудови датчиків.

Потрібно сказати декілька слів про відносно малопоширених датчиках, з *компенсаційним* зворотним зв'язком. Такі датчики досліджені професором М.М. Фетісовим [5]. Компенсаційні датчики застосовувалися в аеродинамічних вагах, а також для усунення впливу початкових опорів тензодатчиків при масовій тензометрії. Розширення діапазону виміру при цьому відбувалося за рахунок того, що компенсація проводилася по піддіапазонах і вимірювалася некомпенсована частка, що залишилася. Компенсаційні датчики потенційно можуть володіти підвищеною точністю. Проте процес врівноваження вимагає тимчасових витрат, отже, компенсаційні датчики більш інерційні.

Відзначимо, крім того, також корисність використання так званих порогових датчиків, що видають сигнал коли вхідна величина досягне заданого рівня. У таких датчиках реалізуються функції власне датчика і пристрою порівняння вхідної величини із зразковою мірою.

Датчики багато в чому визначають якість засобу виміру. Без знань метрологічних характеристик датчик не може бути використаний як вимірювальний перетворювач.

Метрологічні характеристики датчика як засобу виміру визначає ГОСТ 8.009–84 «Нормовані метрологічні характеристики засобів виміру». До основних таких характеристик слід віднести:

- похибку сприйняття і перетворення (бажано знати випадкову, систематичну, статичну, динамічну складові і закон розподілу ймовірностей);
- характеристику (функцію) перетворення датчика, що представляє зв'язок вхідної з вихідною величинами:  $y = f(x)$  і її лінійність;
- діапазон сприйняття і перетворення вхідної величини;
- чутливість;
- частотні і динамічні характеристики (перехідна, амплітудно-фазова, амплітудно-частотна характеристики; час реакції; постійна часу і ін.).

До основних *систематичних* похибок датчика слід віднести наступні похибки.

1. Похибки значення міри. Наприклад, забруднення суміші води з льодом при визначенні «нульової» температури термометра.

2. Похибки при визначенні характеристик датчика. Наприклад, при визначенні функції перетворення тензодатчиків встановлюють її для одного датчика з виготовленої партії. Якийсь конкретний датчик може мати відмінну від випробуваного датчика характеристику.

3. Методичні похибки. До них відносяться, наприклад, спотворення температури об'єкту виміру за рахунок теплопровідності датчика температури, «саморозігрів» термометра опору «вимірювальним» струмом та ін.

В деяких випадках бажано знати розмір складової похибки від впливу кожної зовнішньої («що заважає») величини. Це може бути використано для вживання спеціальних заходів зменшення похибок.

Основні причини виникнення *випадкових* похибок в датчиках:

По-перше, похибки, пов'язані із змінами власних параметрів датчика. Прикладом може слугувати варіація порогу чутливості датчика потенціометра. *Поріг чутливості датчика* визначається як максимальна зміна вимірюваної величини, яка не викликає зміни

вихідного сигналу датчика, що виявляється. Якщо в датчику є елемент з гістерезисними властивостями, то вихідний сигнал залежить від попередніх умов експлуатації.

По-друге, похибки з-за появи у вимірювальному ланцюзі датчиків паразитних сигналів випадкового характеру (теплові шуми, наведення від зовнішніх електромагнітних полів, часовий дрейф сигналів і параметрів елементів датчика і ін.).

Досвід експериментальних досліджень показує, що для введення поправок в результат перетворення корисно використовувати формування одиничних тарувальних сигналів заданого розміру. Цей сигнал може подаватися одночасно з вхідною величиною.

*Характеристика перетворення* датчика повинна визначатися для декількох значень вхідної величини, частіше всього для трьох:  $x = 0$ ;  $x = 1/2$ ;  $x = 1$ . Детальніше представлення характеристик буває необхідне при нелінійному характері [1].

**Характеристика датчиків.** Для конкретизації деяких класифікаційних характеристик за основу був взятий бістабільний датчик дистанційного контролю професора І.Г. Грабара (Патент України № 39401А від 15.06.2001 р.) та тензоперетворювач для вимірювання лінійних та об'ємних деформацій [3].

Створюваний ПФД може мати великі бази вимірювання (від 3–5 мм до 50–100 см) і складатися з двох (або більше) твердих електроізолюваних підкладок, між якими розміщений чутливий елемент, що за допомогою виводів підключений до сполучних проводів вимірювальної схеми.

При деформації змінюється площа підкладки, яка призводить до зміни (перенормування) ефективного значення концентрації  $P$  провідникової компоненти.

Згідно з вище сказаним, перколяційно-фрактальні датчики за енергетичними властивостями вхідних величин відносять до пасивних датчиків, оскільки необхідно вплинути на датчик механічною енергією. Крім того вони є одновимірними датчиками з точки зору узагальнення деформації. Хоча, якщо ділити явище деформації на елементарні складові, такі як вертикальний натиск, або розтяг чи стиск в горизонтальній площині, або кутова деформація відносно деякої осі, тоді ПФД датчики відносимо до багатовимірних, так як є декілька вхідних величин. Враховуючи використання одного фізичного ефекту в подібних датчиках – вони одноступінчасті.

Чутливий елемент датчика являє собою двокомпонентну перколяційно-фрактальну суміш не взаємодіючих мікрочастинок типу «провідник-діелектрик», що наносяться тонким шаром і закріплюються на деформованій підкладці. Концентрація провідникової компоненти суміші повинна бути більше критичної величини  $P^*$ . Найбільш чутливими є сенсори з ймовірністю заповнення електропровідним компонентом  $P$ , близько до  $P^*$ .

Як електропровідна компонента в чутливих елементах датчиків використовуються електропровідні порошки та сипучі матеріали, такі як металева стружка, металеві порошки, суміші на основі графітових матеріалів та ін. Найкраще для даних цілей себе зарекомендували терморозширений графіт (ТРГ) та шунгіт.

ПФД можуть мати деяку особливість яка проявляється в чутливості ТРГ до поперечного стискування, так при деформаціях, більших ніж  $5 \text{ Н/см}^2$ , деформації ТРГ є незворотними. Датчик під дією зусилля, перпендикулярного до площини датчика, стрибкоподібно змінює опір з початкового стабільного значення  $R_0$  до залишкового стабільного значення  $R_1$ . У свою чергу залишковий опір  $R_1$  як завгодно довго зберігатиме пам'ять про діюче навантаження і форму плями контакту після зняття навантаження. При дії навантаження на датчик змінюються параметри структури перколяційно-фрактальної системи з переходом у новий стабільний стан. Для даного датчика співвідношення  $R_0/R_1$  знаходиться в діапазоні 5–10, що не є межею, тому що теоретично чутливість можна підвищити до нескінченно великих значень. Тобто існує можливість контролювати коефіцієнт чутливості через зміну концентрації електропровідної компоненти.

В залежності від значення опору можна говорити про ступінь навантаження на датчик.

Отже, ПФД – однофункціональні з огляду на те, що в датчику безпосередньо відбувається перенормування матеріалу (чутливого елементу) і відповідне перетворення цього процесу в електричний сигнал, крім того розглядається один фізичний ефект – перколяція, з цього випливає що ПФД одноступінчасті.

При деформації підкладки в наближенні квазінезв'язаних мікрочастинок залежність опору від концентрації провідникової компоненти та величини деформації матиме вигляд:

$$\frac{R_\varepsilon}{R_0} = \left( \frac{1 - P^*}{P - P^* \cdot (1 + \varepsilon) \cdot (1 - \mu \varepsilon)} \cdot (1 + \varepsilon) \cdot (1 - \mu \varepsilon) \right)^\nu \quad (1),$$

де  $R_0$  і  $R_\varepsilon$  електричний опір перколяційної суміші мікрочастинок «провідник-діелектрик» при ймовірності  $P$  заповнення провідникової компоненти та при деформації  $\varepsilon$  відповідно,  $R_0$  – електричний опір провідникової компоненти,  $P^*$  – критичне ймовірнісне заповнення провідникової компоненти,  $\varepsilon$  – деформація підкладки,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу підкладки,  $\nu$  – критичний індекс перколяційної системи (для двовимірної перколяції).

Схема контролю не вимагає постійного спостереження за датчиком. Опитування датчиків проводиться по черзі по заданому алгоритму, з будь-якою частотою опитування і за допомогою лише одного ПК, що значно зменшує собівартість вимірів. У будь-який момент контроль опору датчика показує: був ( $R_1$ ) чи не був ( $R_0$ ) несанкціонований доступ.

Таким чином, при деформації шару ТРГ бістабільного пристрою несанкціонованого доступу зміна критичної концентрації провідникової компоненти відбувається в межах  $P^* \in [0,31;1]$ , застосування пропонованого пристрою з базою від кількох міліметрів до кількох метрів відповідно з вимірами навантажень від кількох міліньютон до  $10^5$  Н, з похибкою, не гірше 0,1 %.

Запропоновані датчики можуть використовуватись для запобігання терористичних актів, в охоронних системах, авіації і космонавтиці (для контролю граничних параметрів), машинобудуванні, для облаштуваності прикордонних смуг тощо.

Аналізуючи технологію виготовлення ПФД можна віднести до елементних. Розроблений ПФД знімає обмеження чутливості та недостатність бази тензоперетворювачів. ПФД взмозі при зміні довжини на 1 % збільшувати опір на 500 % і більше [2, 3].

**Висновок.** Визначення характеристик датчиків – важлива область роботи проектувальників, виробників і користувачів датчиків. Ці характеристики формуються не лише відразу після виготовлення, але і в процесі зберігання, а також використання датчиків. Для виконання цієї роботи необхідно створити спеціальне устаткування і розробити методику його використання. Наприклад: генератори вхідних величин в заданих динамічному і частотному діапазонах із заданою точністю (створення джерела вхідної величини з похибкою не більш за третину допустимої часто є важким завданням); генератори впливаючих величин (вони можуть бути менш точні). Найбільш кваліфіковані роботи за визначенням характеристик датчиків виконують в спеціальних лабораторіях, наприклад, теплових, оптичних, акустичних і ін. Деякі з них відрізняються досконалістю оснащення і глибиною методичного підходу до досліджень, що проводяться.

#### **Використані джерела інформації**

1. Алейников А.Ф., Гридчин В.А., Цапенко М.П. Датчики (перспективныє направления развития): Учеб. пособие / Под ред. проф. М.П. Цапенко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с.
2. Грабар І.Г., Гутніченко О.А., Кубрак Ю.О., Грабар О.І. Перколяційно-фрактальні матеріали: моделювання, властивості, технології, застосування. – Житомир: ЖДТУ, 2007.
3. Кубрак Ю.О. Проектування тензоперетворювачів для систем автоматики та контролю: Вісник ЖДТУ № 4 (43). – Житомир: ЖДТУ, 2007.

4. Датчики измерительных систем: В 2 кн. Кн. 1 / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др.; Пер. с франц. – М.: Мир, 1992.
5. Фетистов М.М. Новые автоматические компенсационные приборы для измерения неэлектрических величин. – Л.: Изд-во ЛДНТП, 1960.
6. Карандеев К.Б., Охотская В.Н., Пучкин Б.И., Цапенко М.П. Бионические аспекты автометрии // Автометрия. – 1967. - № 5. – С. 119–128.
7. Глезер В.Д., Цукерман И.И. Информация и зрение. – М.: Л.: Наука, 1961.