

Зав. каф., д.т.н., проф.

П.Г. Столярчук

Автор:

В.М. Ванько

УДК 621.317:681.2:621.5

**В.М. Ванько**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ СЕНСОРІВ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

*© В.М. Ванько, 2011*

На основі аналізу стану розвитку сучасних сенсорів фізичних величин запропоновано їх модифіковану узагальнену структуру, котра забезпечує широкі функціональні можливості за допомогою нових мікроелектронних схем. Детально розглянуто особливості виконання завдань та алгоритмів двома основними частинами наведеної структури сенсора шляхом максимальної уніфікації переліку його вузлів.

The proposed modified and generalized structure of modern sensors of physical values is based on the analysis of their nowadays' development state and provides great functional possibilities by the employment of new microelectronic schemes. The peculiarities of tasks and algorithms performance with the help of the two main parts of the notified sensor structure by maximal unifying its knots are considered in detail.

### **Вступ**

Особливості проходження різноманітних технологічних процесів під час виробництва продукції пов'язані із необхідністю отримання вимірювальної інформації про фізичні величини (ФВ), що характеризують властивості та стан процесів, об'єктів чи технічних пристроїв. Основним джерелом такої інформації слугують сенсори ФВ (СФВ), котрі входять до складу автоматизованих систем управління як первинні перетворювачі інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) – технічних засобів для контролю та забезпечення виробничих процесів.

Відповідно до сучасних тенденцій науково-технічного прогресу до СФВ висувуються наступні вимоги:

- високі метрологічні характеристики;
- широкі функціональні можливості з контролю не лише одної, а й інколи групи однорідних ФВ;
- мале споживання енергії;
- здатність до первинного аналізу отриманої інформації;

- мініатюрні розміри.

Завдяки таким СФВ можна реалізувати нові функції в ІВС автоматизованих систем управління технологічними процесами. При цьому не лише отримуватимуть повнішу інформацію про виконання виробничих операцій, але й аналізуватимуть дані і орієнтуватимуть на необхідні корегувальні дії чи їх здійснення, що призводить до поліпшення управління якістю виготовлення продукції.

Тому, проблема вдосконалення СФВ вважається актуальною та концептуальною з т. з. розвитку теорій вимірювального експерименту та управління технологічними процесами.

### **Стан розвитку сучасних сенсорів фізичних величин**

На даному етапі широко ведуться роботи з проектування покращаних СФВ, котрі базуються на нових перетвореннях одних видів енергії в інші, застосуванні нових технологій та матеріалів, т. п. Це дозволяє створювати ефективні різновиди СФВ, котрі забезпечують збільшення об'єму інформації та розширення можливостей з її тлумачення стосовно досліджуваних технологічних процесів та об'єктів.

Поряд з цим варто брати до уваги, що будь-який СФВ доцільно розглядати у вигляді поєднання первинного перетворювача або чутливого елемента (ЧЕ) та вторинної схеми уніфікації (СУ). Розроблення сучасних модерних СФВ полягають як у розвитку відомих принципів побудови ЧЕ та СУ, так і знаходженні нових підходів до проектування цих складових СФВ. На даний момент найперше можна говорити про нові перспективи з покращання СУ, що представляють собою спеціальні електронні схеми.

Як відомо, на СУ покладаються не лише завдання створення вихідного сигналу СФВ у вигляді величини, зручної для подальшого використання, але й – корегування функції перетворення сенсора, наприклад шляхом застосування допоміжного ЧЕ. За допомогою останнього створюється корегувальна схемна дія, рівень якої залежить від значення впливального неінформативного параметра. Завдяки цій дії реалізується відповідна зміна функції перетворення СФВ, що призводить до підвищення його точності.

Через різноманітність видів неінформативних параметрів існують різні форми реалізації СУ, що не сприяє їх стандартизації та уніфікації. А відмінності у виконанні СУ призводять до потреби застосування різних типів функціональних елементів або до пошуку нових підходів з побудови вторинних схем СФВ.

### **Модифікація структури сенсорів фізичних величин на основі застосування перспективних схемних вузлів та перерозподілу їх функціональних завдань**

Завдяки розвитку сучасної інтегральної техніки можна говорити про появу нових схемних та функціональних вузлів електронних схем: аналогових та цифрових.

У галузі цифрової техніки давно спостерігається тенденція щодо виникнення спеціальних елементів, котрі мають вузьке спеціалізоване призначення: виконання логічних функцій (елементи Булевої алгебри), перетворення та опрацювання інформації (дешифратори, лічильники, цифрові комутатори), запам'ятовування та пересилання даних (реєстри, шинні формувачі), т. п. Логічним завершенням такої тенденції стала поява таких складних структур для роботи з цифровою інформацією як електронно-обчислювальні

машини. Їх мікротехнологічним варіантом реалізації на даний момент є однокристальні мікроконтролери (ОМК).

В аналоговій схемотехніці також можна спостерігати подібну тенденцію – до утворення функціонально закінчених вузлів – у виконанні єдиного чіпа: прецизійні підсилювачі, аналогові комутатори, схеми виборки-зберігання, ізоляційні підсилювачі, перемножувачі сигналів, фільтри, т.п.

Останнім часом до деякої міри відбувається процес поєднання таких аналогових та цифрових функціональних вузлів. Яскравим прикладом цього є останні розробки ОМК, що містять аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП), аналогові комутатори, керовані підсилювачі сигналів, модуляційні схеми, тощо. Слід сподіватись, що перелік та види таких схем, додаткових до ОМК, буде розширюватись і надалі. На нашу думку, найперше, можна орієнтуватись на появу нових схем перетворення, наприклад напруга-частота, що з одного боку вважається варіантом АЦП, а з іншого – схемою, зручною для перетворення виду інформації.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що доцільно модифікувати схеми СФВ, наприклад будувати їх у вигляді узагальненої структури мікросенсора, відображеної на рис. 1, де ЧЕСП – основний ЧЕ із схемою підключення, ФС – функціональна схема, АК – аналоговий комутатор, СТ – схема тестування, ЕЗП – енергонезалежний запам'ятовуючий пристрій, СЖЗК – схема життєзабезпечення та контролю сенсора.

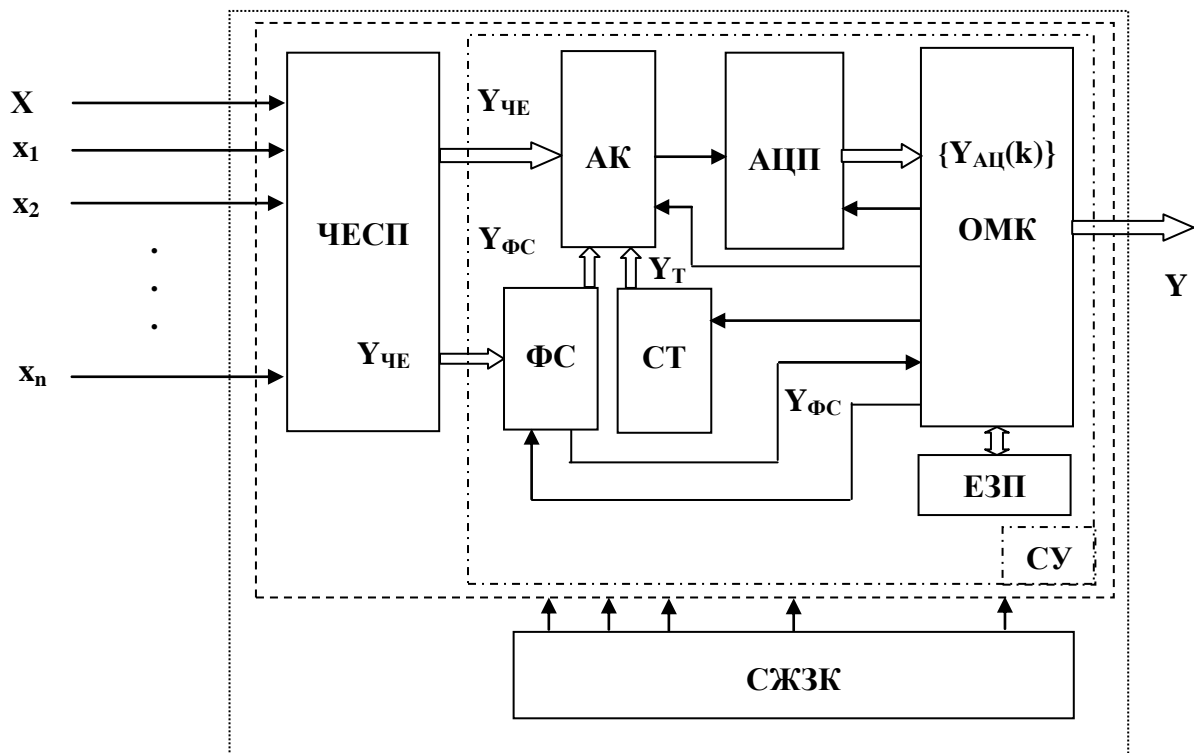


Рис. 1. Узагальнена структура мікросенсора

У наведеній структурі виділяються дві частини: первинна (ЧЕСП) та вторинна (СУ).

При цьому на ЧЕСП діють інформативний  $X$  та неінформативні  $x_1, x_2, \dots, x_n$  параметри, що спричиняють появу вихідного сигналу  $Y_{\text{ЧЕ}} = f_{\text{ЧЕ}}(X, x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Отже,

ЧЕСП здійснює перетворення вимірюваної  $X$  у величину іншого виду, здебільшого електричну. Одночасно може виконуватись масштабування останньої (підсилення чи послаблення рівня) та зрештою утворення сигналу  $Y_{ЧЕ}$ .

Варто зазначити, що у ЧЕСП може утворюватись не тільки один сигнал  $Y'_{ЧЕ} = f_{ЧЕ}(X)$ , але й набір інших – у вигляді функцій  $y_{ЧЕ}(x_1), y_{ЧЕ}(x_2), \dots, y_{ЧЕ}(x_n)$  – від кожного з неінформативних параметрів. На основі останніх структура ЧЕСП будується таким чином, що вихідний сигнал формується як результат опрацювання

$$Y_{ЧЕ} = F_{ЧЕ}[f_{ЧЕ}(X), y_{ЧЕ}(x_1), y_{ЧЕ}(x_2), \dots, y_{ЧЕ}(x_n)], \quad (1)$$

завдяки чому мінімізується вплив неінформативних параметрів на метрологічні характеристики СФВ.

Надалі,  $Y_{ЧЕ}$  надходить у СУ, щоб здійснилось його відповідне перетворення у вихідний сигнал  $Y = F(X)$ .

Залежно від завдань та алгоритмів, що повинні бути реалізовані структурою мікросенсора (рис. 1), у даній частині СФВ мають виконуватись:

- функціональні операції  $(f_{\Phi C})_{\Phi}$  над  $Y_{ЧЕ}$  (логарифмування, тригонометричні функції, возведення у ступінь, інтегрування, диференціювання, збереження миттєвих значень величини, т.п.);
- необхідні перетворення даних  $(f_{\Phi C})_{\Pi}$   $Y_{ЧЕ}$  (напруга-частота, фільтрування, випрямлення, синхронне детектування, тощо);
- додаткове опрацювання  $(f_{\Phi C})_{O}$  сигналу  $Y_{ЧЕ}$  з іншим (тестовим) сигналом (модуляція, кореляційна обробка, т.д.).

Ці завдання у наведеній структурі СФВ здійснюються за допомогою безпосередньо ФС або за її участю та з використанням ОМК.

Наприклад, в якості самостійного застосування, ФС можна сприймати як схему аналогового пасивного ( $RC$ -ланка) чи активного (операційний підсилювач з  $RC$ -ланкою) інтеграторів, вихідний сигнал яких

$$Y_{\Phi C} = (f_{\Phi C})_{\Phi}[Y_{ЧЕ}] = \int Y_{ЧЕ} dt. \quad (2)$$

Поєднання ФС та ОМК може слугувати для створення схем випрямлення або амплітудного детектування. У першому випадку реалізується протягом періоду повторення  $T$  (чи інтервалу усереднення) визначення середнього за модулем значення

$$Y_{\Phi C} = (f_{\Phi C})_{\Pi}[Y_{ЧЕ}] = \frac{1}{T} \int_T |Y_{ЧЕ}| dt. \quad (3)$$

Інколи за потреби до наведених вузлів можуть долучатись АК, СТ та/або АЦП. Завдяки такому поєднанню вузлів структури (рис. 1) максимально спрощується апаратна частина мікросенсора, що зрештою дозволяє покращувати метрологічні та експлуатаційні характеристики СФВ.

Таким прикладом може бути відтворення алгоритму амплітудної модуляції, коли отримують вихідний сигнал

$$Y_{\Phi C} = (f_{\Phi C})_{O}[Y_{ЧЕ}] = Y_{ЧЕ} \cdot (Y_T)_m \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_T), \quad (4)$$

де  $Y_{qE} = (Y_{qE})_m \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ;  $Y_T$  – тестовий сигнал від СТ із постійними амплітудою  $(Y_T)_m$ , круговою частотою  $\omega_T$  та початковою фазою  $\varphi_T$ ; змінна амплітуда  $(Y_{qE})_m$  та  $\omega_0$  та  $\varphi_0$  – сталі параметри вхідного сигналу  $Y_{qE}$ , причому  $\omega_T > \omega_0$ .

Враховуючи наявність у схемах сучасних ОМК модуляційних схем, можливе виконання і інших видів модуляції  $Y_{qE}$ , наприклад широтно-імпульсної.

Отриманий після описаних трансформацій сигнал  $Y_{\Phi C}$  у разі потреби надходить на АЦП (рис. 1), після чого здійснюється процедура утворення послідовності  $k$  значень дискретного сигналу

$$\{Y_{AC}(k)\} = |f_{AC}[Y_{\Phi C}]_k|, \quad (5)$$

де  $k = 1, 2, \dots, N$ .

За допомогою ОМК над цією послідовністю виконуються необхідні опрацювання :

- за відповідними алгоритмами, котрі дозволяють обчислити певні інтегральні характеристики сигналу  $\{Y_{AC}(k)\}$ , наприклад середньоквадратичне значення (СКЗ) –  $Y_{CK}$ ;
- корегування результатів вимірювань на предмет мінімізації похибок СФВ;
- як і вище, запам'ятовування масивів кодів миттєвих значень  $\{Y_{AC}(k)\}$  в ЕЗП (рис. 1) з можливістю подальшого пересилання по вихідній шині  $Y$  – наприклад для дослідження на комп'ютері;
- реалізації певних часових залежностей досліджуваної величини (чи величин) для дослідження її динамічної поведінки.

Таким чином, найпершим можливе альтернативне визначення енергії вхідної  $X$ , котра попередньо була трансформована у  $\{Y_{AC}(k)\}$ , за виразом СКЗ

$$Y_{CK} = (f_{OM})_{CK} [\{Y_{AC}(k)\}] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k \{Y_{AC}(k)\}^2}. \quad (6)$$

Під час вимірювання інтегральних характеристик сигналів, наприклад  $Y_{CK}$ , також варто додатково здійснювати опрацювання зразкових (стабільних) сигналів, завдяки чому підвищується точність вимірювання та перевіряється правильність функціонування даного СФВ. Наприклад, після АЦП отримуємо послідовно в часі потік цифрових кодів  $\{Y_{AC}(k)\}$ , котрі пропорційні миттєвим значенням досліджуваної функції

$$\{Y_{AC}(t)\}_{\Delta\delta} = \{Y_{AC}(k)\} \cdot q_{an} \cdot (1 + \delta_{f\Sigma}) + \Delta_{f\Sigma} \quad (7)$$

та містять сумарні адитивну  $\Delta_{f\Sigma}$  та мультиплікативну  $\delta_{f\Sigma}$  похибки від ЧЕСП, АК, АЦП (у випадку невикористання вузла ФС), причому  $q_{an}$  – крок квантування.

Якщо безпосередньо виконувати в ОМК алгоритм (6), то матимемо СКЗ досліджуваної функції

$$(Y_{CK})_{\Delta\delta} = (f_{OM})_{CK} [\{Y_{AC}(k)\}, \Delta_{f\Sigma}, \delta_{f\Sigma}, t_{on}], \quad (8)$$

де  $t_{on}$  – інтервал часу виконання.

З метою мінімізації впливу зазначених похибок доцільно здійснювати, додатково з обробкою  $\{Y_{AC}(k)\}$ , наведене вище перетворення зразкових сигналів, наприклад отриманих від вузла СТ структури СФВ (рис. 1). Внаслідок цього, одночасно з отриманням дискретної

послідовності вимірюваних сигналів за (5) виконується перетворення зразкових сигналів  $\{Y_{зр}(k_{зр})\}$ , що призводить до появи масиву  $k_k$  кодових значень  $\{y_{АЦ}(k_k)\}$ . Над ними проводиться відповідне опрацювання в ОМК, завдяки чому знаходять та зберігають поправки

$$P = f'_{OM} [\{y_{АЦ}(k_k)\}] = -\Delta_{f\Sigma} \quad (9)$$

і корегувальні коефіцієнти

$$K_{кор} = f''_{OM} [\{y_{АЦ}(k_k)\}] = f_{OM}(\delta_{f\Sigma}). \quad (10)$$

При виконанні алгоритму (6) також здійснюється корекція адитивної  $\Delta_{f\Sigma}$  та мультиплікативної  $\delta_{f\Sigma}$  похибок шляхом врахування знайдених  $P$  та  $K_{кор}$ . Тобто, СКЗ досліджуваної фізичної величини знаходять у вигляді

$$Y_{СК} = (f_{OM})_{СК} [\{Y_{АЦ}(k)\} + P] \cdot K_{кор} \cdot t_{он}. \quad (11)$$

Внаслідок цього, можна гарантувати рівень граничної абсолютної некомпенсованої інструментальної похибки зазначених вузлів структури даного СФВ не вище одиниці молодшого розряду шини даних ОМК.

Так само, як в [1], наведений на рис. 1 СФВ може бути частиною складнішої вимірювальної системи, а саме – слугувати пристроєм збирання інформації про об'єкт дослідження. При цьому, в ОМК поступово формується масив даних  $\{Y_{АЦ}(k)\}$  або СКЗ  $\{Y_{СК}(k_{СК})\}$ , що накопичується та надалі зберігається в ЕЗП. Отже, такий СФВ забезпечує певний об'єм попередньої вимірювальної інформації у реальних умовах експлуатації об'єкта, котру пізніше можна аналізувати, наприклад на персональному комп'ютері, використовуючи потужне програмне забезпечення : Matlab, Mathcad, Simulink, Labview, тощо.

Слід зауважити, що на практиці для аналізу метрологічних характеристик СФВ в динаміці застосовують вирази *граничних похибок*:

*абсолютної*

$$[\Delta_{\delta}(t)]_{\max} = [Y(t) - Y_i(t)]_{\max} \quad (12)$$

*та зведеної*

$$\gamma_{\max} = \frac{[\Delta_{\delta}(t)]_{\max}}{[Y_{im}(t)]}, \quad (13)$$

де  $Y_i(t)$  – ідеальна крива вихідного сигналу  $Y(t)$ , котрий мав би бути за ідеальних динамічних властивостей сенсора,  $[Y_{im}(t)]$  – значення амплітуди ідеального  $Y_i(t)$ .

За даними [2] динамічну похибку СФВ можна трактувати як амплітудно-частотну

$$\delta_{д\omega} = \frac{K(\omega)}{K_i(\omega)} - 1 \quad (14)$$

та фазо-частотну

$$\Delta\varphi_{д\omega} = \varphi(\omega) - \varphi_i(\omega) \quad (15)$$

складові, що свідчать про амплітудне та фазове відхилення реальної передавальної функції від ідеальних  $K_i(\omega)$  та  $\varphi_i(\omega)$ , відповідно.

Одним із способів мінімізації цих похибок є застосування конструкторсько-технологічних прийомів, зокрема, використання нових матеріалів, спеціальної технології

виготовлення ЧЕСП або спеціального конструктивного виконання елементів або вузлів СФВ. Проте цей спосіб не завжди дозволяє отримати прецизійні динамічні властивості СФВ. Тому у багатьох випадках доводиться вдаватися і до інших, наприклад, структурних методів отримання потрібної передавальної функції.

Широко застосовується корекція динамічних характеристик СФВ шляхом зміни його передавальної функції  $K_{СФ}$  за допомогою додаткової корегувальної ланки ДЛ з відповідною  $K_{ДЛ}$ . При цьому, передбачається їх послідовне ввімкнення, а результативна функція сенсора матиме вигляд

$$K_p(j\omega) = K_{СФ}(j\omega) \cdot K_{ДЛ}(j\omega). \quad (16)$$

Очевидно, що ідеально зкорегований за динамічною характеристикою СФВ повинен мати постійну передавальну функцію –  $K_p(j\omega) = K_0$ . Дана умова виконуватиметься у разі, коли ДЛ матиме згідно (16) передавальну функцію, зворотну передавальній функції коректованого сенсора:

$$K_{ДЛ}(j\omega) = \frac{K_0}{K_{СФ}(j\omega)}. \quad (17)$$

Дане рівняння є умовою ідеальної корекції СФВ, котра передбачає відповідні зміни його амплітудно- та фазочастотної характеристик, тобто

$$K_{ДЛ}(j\omega) = \frac{K_0}{|K_{СФ}(j\omega)|} \cdot e^{-j\varphi(\omega)}. \quad (18)$$

У заданому частотному діапазоні повна корекція динамічних характеристик СФВ можлива лише теоретично. Через наявні різноманітні перешкоди, паразитні витoki, неминучий шум елементів корегувальної ланки обмежується частотний діапазон, в якому реально здійснюється корекція динамічних характеристик СФВ.

## Висновки

За допомогою розробленої узагальненої структури з використанням перспективних схемних вузлів можна максимально мінімізувати конструктивне виконання сенсора, забезпечуючи його широкі функціональні можливості з опрацювання вимірювальної інформації. Така структура сенсорів фізичних величин дозволить здійснювати нові завдання у складі автоматизованих систем управління технологічними процесами.

1. *Цифровий аналізатор коливань напруги в електричних мережах. Пат. 80553. Україна, МПК G01R19/165, G01R19/00 / П.Г. Столярчук, В.І. Гудим, В.М. Ванько, Т.Б. Юзьків, В.В. Гудим – №20041109050; Заявл. 05.11.2004; Опубл. 10.10.2007. Бюл. №16. – 8 с.*

2. *Метрологія та вимірювальна техніка / Під ред. Є.С. Поліщука / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко – Львів: Бескид-біт. – 2003. – 544 с.*