

УДК 621.1

**КОМПЕНСАЦІЙНО-ТЕСТОВИЙ МЕТОД КОРЕКЦІЇ ДРЕЙФОВИХ
ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ**

Ю.О. СКРИПНИК, В.В. ГОРКУН, К.Л. ШЕВЧЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

У статті розглянуто питання корекції адитивної і мультиплікативної складових похибки вимірювальних каналів. Розроблена математична модель та алгоритм компенсаційно-тестового методу, суть якого полягає в одночасному введенні мультиплікативного і адитивного тестів і компенсації одного тесту іншим. В результаті вказаних дій розв'язується система двох лінійних рівнянь

В системах автоматичного контролю найбільшу небезпеку становлять систематичні похибки вимірювання, які поволі змінюються в часі (дрейфові похибки). Через випадковий нестационарний характер зміни цих похибок в процесі експлуатації засобів автоконтролю істотно знижується точність і достовірність контролю. Це обумовлено тим, що ці похибки не усуваються калібруванням через непостійність їх у часі і усереднюванням через невизначеність математичного сподівання ряду вимірювань [1].

Об'єкти та методи дослідження

За залежністю від вимірюваної величини дрейфові похибки поділяють на адитивні, які не залежать від вимірюваної величини і мультиплікативні - пропорційні вимірюваній величині [2]. У роботі [3] показано, що ефективним методом корекції адитивної і мультиплікативної складових похибки є метод періодичного порівняння, при якому порівняння фізичних величин здійснюється в одноканальному вимірювальному тракті з почерговим періодичним перетворенням порівнюваних величин. Частота перемикачів визначається частотно-часовими характеристиками вимірюваної і зразкової величин. За зразкову величину в системах автоконтролю використовують норму у вигляді фізичної величини, однорідної з вимірюваною із заданими розмірами.

Виключення адитивної складової похибки досягається за рахунок виділення змінної складової напруги або струму на виході сенсора після почергового первинного вимірювального перетворення. Придушення мультиплікативної складової похибки здійснюється шляхом функціональної обробки пакетів (часових відрізків) напруг, пропорційних порівнюваним величинам. Проте, через різний зв'язок складових похибки з вимірюваною величиною одночасна корекція обох складових похибки розглянутими алгоритмами утруднена. Тому описані раніше прийоми обробки вимірювальних сигналів доцільні для випадків, коли переважає одна з складових похибки вимірювання (адитивна або мультиплікативна).

Постановка завдання

Для корекції сумарної похибки, що включає як адитивну, так і мультиплікативну складову, використовують тестові методи корекції, засновані на додатковій дії на вимірювану величину мультиплікативного і адитивного тестів [4]. Мультиплікативний тест реалізується у вигляді введеного множника вимірюваної величини. Адитивний тест здійснюється додаванням до вимірюваної величини каліброваного приросту. При цьому виникає система трьох незалежних рівнянь :

$$y_1 = S(1 + \gamma)(x + \Delta x), \quad (1)$$

$$y_2 = S(1+\gamma)(kx + \Delta x), \quad (2)$$

$$y_3 = S(1+\gamma)(x + x_0 + \Delta x), \quad (3)$$

де S – крутизна вимірювального перетворення; γ – відносна мультиплікативна похибка; Δx – абсолютна адитивна похибка; k – множник мультиплікативного тесту; x_0 – значення адитивного тесту.

Вимірювана величина з системи рівнянь (1)–(3)

$$x = \frac{y_1 - y_2}{y_3 - y_1} \cdot \frac{x_0}{1 - k}, \quad (4)$$

де y_1 , y_2 і y_3 – результати трьох незалежних вимірювань.

Результат вимірювання (4) відповідає лінійним рівнянням (1) – (3). Насправді функція перетворення реального сенсора і всього вимірювального каналу у багатьох випадках є нелінійною. Для зменшення похибки від нелінійності вибирають малі значення тестів:

$$(1 - k)x \ll x, \quad (5)$$

$$x_0 \ll x. \quad (6)$$

Умови (5) і (6) дозволяють працювати в околах робочої точки перетворювальної характеристики, що задається значенням x вимірюваної величини. Проте, при цьому значно зростає вплив випадкових похибок вимірювання y_1 , y_2 і y_3 , оскільки результат (4) визначається різницею близьких за розмірами величин ($y_1 - y_2$ і $y_3 - y_1$). При збільшенні тестів знижується вплив випадкових похибок, але зростає похибка вимірювання від нелінійності функції перетворення.

Компромісним рішенням є використання компенсаційно-тестового методу корекції похибок. Суть його полягає в одночасному введенні мультиплікативного і адитивного тестів і компенсації одного тесту іншим (мультиплікативного тесту адитивним і навпаки). В результаті вказаних дій система з трьох рівнянь (1)–(3) трансформується в систему двох рівнянь:

$$y_1 = S(1+\gamma)(x + \Delta x), \quad (7)$$

$$y_2 = S(1+\gamma)(kx + x_0 + \Delta x). \quad (8)$$

Один з тестів регулюється (k або x_0) до досягнення рівності результату вимірювання тестового рівняння (8) з початковим результатом вимірювання (7). Досягши рівності $y_1 = y_2$ отримуємо:

$$S(1+\gamma)(x + \Delta x) = S(1+\gamma)(kx + x_0 + \Delta x). \quad (9)$$

З рівняння (9) вимірювана величина

$$x = \frac{x_0}{1 - k} \quad (10)$$

не залежить від адитивної і мультиплікативної похибок. При цьому, результат вимірювання не залежить також від ступеня нелінійності початкової функції перетворення (7), оскільки обидва вимірювання здійснюються в одній і тій же робочій точці характеристики сенсора або всього вимірювального каналу, яка задається вимірюваною величиною x .

Вимірювальний пристрій, що реалізує тестовий алгоритм обчислення (4), повинен містити елементи пам'яті для запам'ятовування результатів проміжних перетворень (y_1 , y_2 і y_3). Тому

створення аналогового вимірювального пристрою досить складне через відсутність достатніх стабільних елементів аналогової пам'яті.

Результати та їх обговорення

Компенсаційно-тестовий алгоритм, заснований на порівнянні двох результатів проміжних перетворень (9), можна реалізувати без використання елементів пам'яті шляхом періодичного порівняння y_1 і y_2 (рис. 1,а).

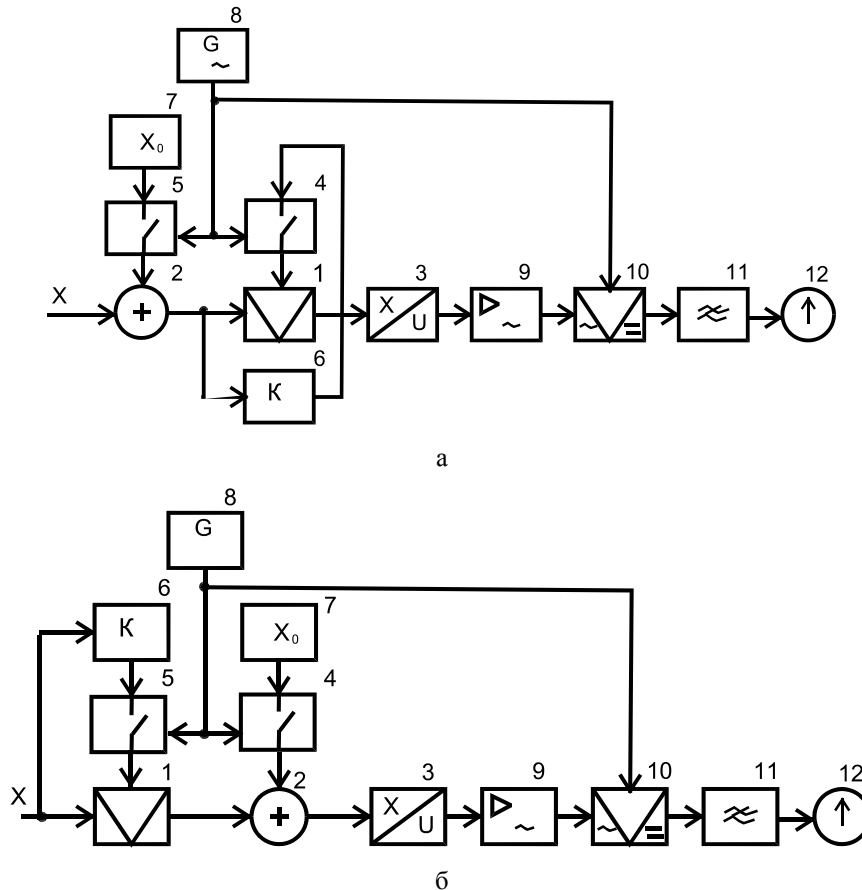


Рис.1 Функціональні схеми вимірювальних пристроїв з компенсаційно-тестовою корекцією похибок: 1 – перемножувач, 2 – суматор, 3 – сенсор, 4 і 5 – автоматичні ключі, 6 – формувач мультиплікативного тесту, 7 – формувач адитивного тесту, 8 – комутаційний генератор, 9 – підсилювач змінної напруги, 10 – фазочутливий випрямляч, 11 – фільтр нижніх частот, 12 – індикатор

Вимірювана величина x через перемножувач 1 і суматор 2 діє на вхід сенсора 3. При розімкнених ключах 4 і 5 вихідна напруга сенсора 3 визначається співвідношенням (7). При замкнених ключах 4 і 5 від формувача 6 в перемножувач 1 вводиться множник k мультиплікативного тесту, а в суматор 2 вводиться адитивний тест x_0 . Періодичний режим роботи ключів 4 і 5 забезпечує комутаційний генератор 8, в якості якого зазвичай використовують симетричний мультівібратор. Вихідна напруга сенсора 3 при розімкнених ключах 4 і 5 становить

$$U_1 = S(1+\gamma)(x+\Delta x), \tag{11}$$

а при замкнених ключах 4 і 5

$$U_2 = S(1+\gamma)(kx+x_0+\Delta x) . \tag{12}$$

При періодичній роботі ключів 4 і 5 і нерівності напруг (11) і (12) на виході сенсора 3 з'явиться змінна складова напруги з амплітудою

$$U_3 = S(1 + \gamma)[(1 - k)x - x_0]. \quad (13)$$

Змінна складова напруги посилюється підсилювачем 9 і випрямляється фазочутливим випрямлячем 10. Випрямлена напруга згладжується фільтром 11 нижніх частот і фіксується індикатором 12. При нульовому значенні індикатора 12 виконується умова:

$$(1 - k)x - x_0 = 0. \quad (14)$$

Вимірювана величина x визначається за приведеним вище співвідношенням (10) і не залежить від адитивної і мультиплікативної похибок.

Якщо спочатку на вимірювану величину діє адитивний тест, а потім мультиплікативний (рис.1,б), то отримуємо змінену систему рівнянь:

$$y_1 = S(1 + \gamma)(x + \Delta x), \quad (15)$$

$$y_2 = S(1 + \gamma)[k(x + x_0) + \Delta x]. \quad (16)$$

В цьому випадку амплітуда змінної складової напруги на виході сенсора 3 приймає значення:

$$U_4 = S(1 + \gamma)[x - k(x + x_0)]. \quad (17)$$

При нульовому значенні індикатора 12 маємо:

$$x = \frac{k}{1 - k} \cdot x_0. \quad (18)$$

Якщо вибрати $k = 0,5$ то вимірювана величина

$$x = x_0. \quad (19)$$

Рівність вимірюваної величини адитивному тесту дозволяє використовувати цю схему в системах автоматичного контролю, а в якості x_0 використовувати норму у вигляді зразкової величини. Тоді різниця напруга (17) стає пропорційною відхиленню від норми. Перевагою розглянутої схеми в порівнянні з раніше запропонованими [5] є відсутність переривання вимірюваної величини. Це дозволяє здійснювати автоконтроль фізичних величин, які важко або неприпустимо переривати (радіаційні випромінювання, потоки нафти і газу, магнітні і електричні поля, структурні параметри матеріалів і тому подібне). Схемо-технічна реалізація формувачів мультиплікативного і адитивного тесу визначається фізичною природою вимірюваних величин і їх властивостями. Так, для різних випромінювань і полів використовують екрани, а досліджувані речовини поміщають в кювети із змінною товщиною або довжиною. Поточкові величини (витрата, швидкість, об'єм) регулюються заслінками, клапанами і діафрагмами. Механічні величини змінюються важелями, пружинними і іншими механізмами. Найпростіше реалізуються тестові дії для електричних величин (атенюатори, дільники напруги, суматори, стабілізовані джерела напруги і струму і тому подібне).

Прикладом реалізації компенсаційно-тестової корекції похибки є схема вимірювання часової затримки зондуємого сигналу в досліджуваному середовищі (рис.2). Найбільш точні вимірювання затримки здійснюються на основі порівняння фази зондуємого сигналу, який пройшов досліджуване середовище, з фазою початкового сигналу. Проте, є і труднощі в організації вимірювального процесу.

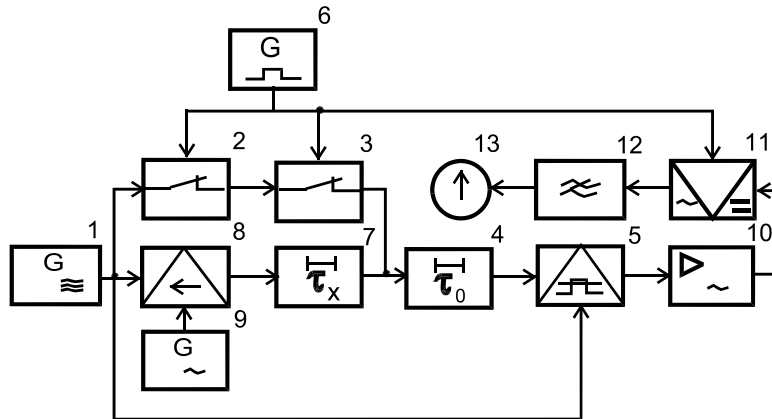


Рис. 2 Вимірювач часової затримки з адитивними і мультиплікативними тестами:
1 – генератор високої частоти, **2** і **3** – автоматичні ключі, **4** – сенсор (кювета), **5** – фазовий детектор,
6 – комутаційний генератор (мультивібратор), **7** – адитивний тест (зразкова затримка),
8 – частотний модулятор (формувавч мультиплікативного тесту), **9** – генератор низької частоти,
10 – підсилювач змінної напруги, **11** – фазочутливий випрямляч, **12** – фільтр нижніх частот,
13 – індикатор

Це перш за все невизначеність фазових вимірювань, коли фазове зрушення пройшовшого через сенсор сигналу перевищує 360^0 . Крім того, істотний внесок до результату вимірювання вносять похибки фазового детектора, який використовують для порівняння фаз вхідного і вихідного сигналів сенсора.

Компенсаційно-тестовий алгоритм рішення цієї задачі позбавлений цих недоліків.

Зондуючий сигнал з генератора **1** високої частоти через закриті спочатку ключі **2** і **3** діє на сенсор (кювету) **4** з вимірюваною затримкою τ_x . Пройшовший сигнал порівнюється по фазі з початковим сигналом генератора **1** за допомогою фазового детектора **5**. При частоті зондованого сигналу f повне фазове зрушення, що вноситься сенсором **4**, визначається співвідношенням:

$$\psi_1 = 2\pi f (\tau_x + \Delta\tau)(1 + \gamma) = 360 \cdot n + \varphi, \quad (20)$$

де $\Delta\tau$ і γ – адитивна і мультиплікативна похибки сенсора; n – ціле число фазових циклів в 360^0 ;

φ – дробова частина останнього фазового циклу.

Вихідна напруга фазового детектора визначається тільки дробовою частиною фазового циклу:

$$U_5 = S_\delta (1 + \gamma_\delta) (\varphi + \Delta\varphi_\delta), \quad (21)$$

де S_δ – чутливість детектора; γ_δ і $\Delta\varphi_\delta$ – мультиплікативна і адитивна похибки детектора.

При розмиканні ключів **2** і **3**, які управляються комутаційним генератором **6**, до входу сенсора **4** з вимірюваною затримкою τ_x підключається адитивний тест **7** у вигляді зразкової затримки τ_0 малого значення і частотний модулятор **8**, що зміщує частоту зондуючого сигналу. Значення затримки вибирають фіксованим і рівним напівперіоду зондуючого сигналу ($\tau_0 = \frac{1}{2f}$). Частотний модулятор знижує частоту зондуючого сигналу на низьку частоту F генератора **9** і забезпечує мультиплікативний тест ($k = \frac{f - F}{f}$). При введенні адитивного і мультиплікативного тестів повне фазове зрушення (20) приймає значення:

$$\psi_2 = 2\pi (f - F) (\tau_x + \Delta\tau + \tau_0) (1 + \gamma). \quad (22)$$

Частота F генератора 9 змінюється до досягнення первинної вихідної напруги фазового детектора (21). Якщо напруга не рівна, з'являється змінна складова напруги, яка посилюється підсилювачем 10, випрямляється фазочутливим випрямлячем 11 і після згладжування фільтром 12 нижніх частот фіксується індикатором 13. При нульовому значенні індикатора маємо:

$$(f - F)(\tau_x + \Delta\tau + \tau_0) = f(\tau_x + \Delta\tau). \quad (23)$$

З рівняння (23) виходить, що

$$\tau_x = \frac{f\tau_0 - F(\tau_0 + \Delta\tau)}{F}. \quad (24)$$

Якщо врахувати, що низька частота зсуву F набагато менше високої зондувальної частоти f ($F \ll f$) то другим членом виразу (24) можна знехтувати. Тоді вимірювана затримка

$$\tau_x = \frac{f}{F} \tau_0. \quad (25)$$

Таким чином, компенсаційно-тестовий метод забезпечує однозначність фазових вимірювань і виключення впливу адитивних і мультиплікативних дрейфових похибок. Результат визначається тільки розміром зразкової затримки τ_0 і відношенням частот генераторів високої і низької частоти.

Висновки

Використання мікропроцесорних засобів обробки інформаційних сигналів розширює можливості компенсаційно-тестового методу корекції похибок. Запропонований алгоритм розробленого методу знайшов відображення в роботі [6], де описаний фотоабсорбційний вимірювач концентрації розчинених речовин в рідинних середовищах, а в роботі [7] – інтерферометричний вимірювач концентрації домішок в газових середовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новицкий П.В., Зограф Н.В. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.– 245 с.
2. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 228 с.
3. Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л. Підвищення достовірності технологічного контролю методом періодичного порівняння // Вісник КНУТД, – 2010. – №5, т.2, – с.148-155.
4. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. – М.: Энергия, – 1978.–176с.
5. Скрипник Ю.О., Присенко М.О., Дубровний В.О. Проектування засобів вимірювання з періодичним порівнянням. Книга третя. Вимірювання із зрівноважуючим перетворенням. Навч. посібник.–К.: КНУТД, –2008.– 267с.
6. Скрипник Ю.О., Горкун В.В. Застосування компенсаційно-тестових методів для покращення метрологічних характеристик оптичних засобів вимірювання /Вісник КНУТД, – 2009. – №2.
7. Скрипник Ю.О., Горкун В.В. Застосування рефрактометричного методу для визначення сталих малопрозорих середовищ / Вісник КНУТД. – 2010.– №5, – с. 161–165.

Надійшла 10.11.2011