

УДК 389:621.317

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160830

Комп'ютерне моделювання методів надлишкових вимірювань при нелінійній функції перетворення

В. Ю. Щербань, Г. О. Корогод, В. В. Чабан, О. З. Колиско, Ю. Ю. Щербань, Г. В. Щуцька

Проведеними дослідженнями можливостей методів надлишкових вимірювань встановлено високу ефективність представлених методів щодо підвищення точності вимірювань. Доведено, що рівняння надлишкових вимірювань забезпечує незалежність результату вимірювань від параметрів функції перетворення і їх відхилень від номінальних значень. Також доведена можливість отримання рівняння надлишкових вимірювань параметрів функції перетворення, що дасть можливість здійснення метрологічного самоконтролю. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що точність вимірювання підвищується за рахунок обробки результатів проміжних вимірювань за рівнянням надлишкових вимірювань. В запропонованому рівнянні за рахунок операції віднімання виключається адитивна складова похибки, а за рахунок операції ділення виключається мультиплікативна. Це призводить до стійкості результату вимірювання надлишковим методом до змін параметрів функції перетворення. Зокрема встановлено, що зміна параметрів функції перетворення на $(1 \div 10)$ % не впливає на результат надлишкових вимірювань, тобто відносна похибка в заданому робочому діапазоні становитиме $\delta_1 = (0,04 \div 0,01)$ %. Це дозволяє стверджувати про відповідність математичної моделі, що лежить в основі представленого метода, отриманим результатам комп'ютерного моделювання. Останні, зокрема, стосується порівняльного аналізу методів надлишкових і ненадлишкових вимірювань на стійкість до зміни параметрів функції перетворення. Показано, що методи надлишкових вимірювань забезпечують автоматичне виключення систематичної складової похибки, обумовленої зміною параметрів функції перетворення. Це забезпечується завдяки виключенню впливу на результат вимірювання абсолютних значень параметрів нелінійної функції перетворення фотоприймача і їх відхилень від номінальних значень.

Є підстави стверджувати про перспективний розвиток методів надлишкових вимірювань при різних видах функції перетворення сенсора в сфері підвищення точності. Цей результат досягається за рахунок обробки результатів проміжних вимірювань відповідно до рівняння надлишкових вимірювань. Крім того, за необхідності, запропоновані методи дають можливість здійснення метрологічного самоконтролю

Ключові слова: надлишкові методи, рівняння вимірювань, параметри функції, підвищення точності, самоконтроль, фотодіод

1. Вступ

Однією з актуальних на сьогоднішній день є завдання підвищення точності вимірювань при зниженні витрат на метрологічне забезпечення. Це пов'язано з тим, що при виконанні технологічних процесів, наприклад в хімічній, легкій та текстильній промисловості, навіть незначна зміна контрольованого параметра може призвести до браку продукції або до зниження її якості [1–3].

Похибка результату вимірювання в більшій мірі залежить від засобів вимірювання та зовнішніх факторів [1, 3]. При високотемпературних процесах, в якості сенсорів найчастіше використовуються напівпровідникові датчики (болметри, фотодіоди тощо). Даним сенсорам притаманні такі особливості як розкид параметрів (навіть в рамках однієї партії) і залежність параметрів від факторів навколишнього середовища (температури, вологості, іонізуючої радіації тощо). За даним [4] серед засобів вимірювальної техніки, що надходить на калібрування, майже 12 % з них мають похибку, яка не відповідає нормованій. Це обумовлено тим, що вплив дестабілізуючих факторів призводять до накопичення змін параметрів. В результаті зростає ризик надходження недостовірної інформації, що призводить до зниження точності вимірювання. Крім того, при використанні датчика з нелінійної функцією перетворення (наприклад, фотодіода) необхідно провести її лінеаризацію, що вносить додаткові похибки, або працювати на лінійній ділянці, що звужує діапазон вимірювань.

У зв'язку з цим актуальними слід вважати дослідження, які спрямовані на розвиток і вдосконалення методів, що забезпечують незалежність результату вимірювань від параметрів функції перетворення і їх відхилень від номінальних значень.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В якості технологічного процесу розглянемо високотемпературний процес, в якому основним контрольованим параметром є температура. Так як температуру не можна виміряти безпосередньо, то в цьому випадку використовують для вимірювання іншу фізичну величину, яка має зв'язок з температурою.

При високотемпературних вимірюваннях, як правило, використовують оптико-електронні пристрої. Але на сьогодні завдання по підвищенню точності, розширенню діапазону вимірювань та можливості проведення метрологічного самоконтролю досі залишаються актуальними. Так, в роботі [5] наведені результати дослідження можливості розширення діапазону. Показано, що шляхом використання запрограмованих коефіцієнтів підсилення та синхронних детекторів досягалося розширення смуги пропускання сигналу фотодіода. Дослідженнями оптимізаційних процесів фотодіодів, описаних в роботі [6], встановлено, що завдяки введенню органічного прошарку досягалася зміна фотоелектричних параметрів фотодіода. Однак слід зазначити, що в даних роботах не були розглянуті питання підвищення точності вимірювань, що може викликати труднощі з отриманням достовірної інформації. Однією з причин цього є недостатня чутливість фотоприймача. Варіантом подолання цих труднощів може бути збільшення чутливості фотодетектора, що і було розглянуто в роботі [7].

Ще одним варіантом підвищення точності, який був представлений в роботі [8], є використання калібрувального коефіцієнта. До того ж, підвищення точності вимірювання може бути досягнуто і за рахунок статистичної обробки багатократних вимірювань, як представлено в роботі [9]. Але невирішеними в цих роботах залишилися питання, що пов'язані з відхиленням параметрів функції перетворення від номінальних значень під впливом дестабілізуючих факторів. Для подолання цієї проблеми в роботі [10] був наведений алгоритм обчислювань, завдяки якому досягалося покращення вихідного сигналу сенсора при різних умовах. Однак слід зазначити, що в даній роботі не була розглянута можливість проведення метрологічного самоконтролю датчика. Варіант подолання цих труднощів було розглянуто в роботі [11]. Показано, що завдяки обчисленню частотної характеристики і щільності фотоструму стає можливим прогнозування спектрального відгуку. Але, не зважаючи на позитивні результати, залишилися невирішеними питання, що пов'язані з отриманням високоточного результату вимірювання при нелінійній і нестабільній функції перетворення сенсора з можливістю проведення метрологічного самоконтролю. Причиною цього є те, що в зазначених роботах не наведена можливість досягнення незалежності отриманого результату від відхилень параметрів фотоприймачів. З практичної точки зору це може викликати додаткові похибки, які пов'язані з відхиленням параметрів функції перетворення від номінальних значень. Дана обставина пов'язана з тим, що на сенсор чинить вплив як оточуюче середовище, так і старіння самого матеріалу сенсора. В результаті чого істотно змінюються показання вимірювального приладу і інформація стає недостовірною. Слід зазначити, що проблема достовірності отриманого результату була розглянута в роботі [12], де за рахунок введення надлишковості досягалося підвищення надійності отриманого результату. Однак в представленій роботі не були наведені шляхи вимірювання при нелінійній функції перетворення. Для подолання цієї проблеми в роботі [13] було використано метод надлишкових вимірювань. Показано, що завдяки використанню рівнянь надлишкових вимірювань було досягнуто підвищення точності вимірювання при кубічній функції перетворення. Незважаючи на отримані позитивні результати, в цій роботі не була наведена можливість вимірювання в широкому діапазоні вхідної характеристики сенсору, оскільки фотодіод має логарифмічну функцію перетворення.

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є подальше проведення досліджень, присвячених підвищенню точності вимірювання при логарифмічній функції перетворення сенсора в широкому діапазоні його вхідної характеристики з можливістю проведення метрологічного самоконтролю.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є підвищення точності вимірювання (потіку випромінювання) на основі оптико-електронних методів з використанням надлишковості за рахунок обробки результатів проміжних вимірювань за рівнянням надлишкових вимірювань.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– розробити математичну модель методів надлишкових вимірювань при нелінійній функції перетворення, яка дає змогу отримати рівняння надлишкових вимірювань шуканого потоку випромінювання і параметрів функції перетворення фотоприймача;

– показати переваги методів надлишкових вимірювань щодо відомих методів у сфері підвищення точності вимірювань за рахунок незалежності результату вимірювань від розкиду характеристик фотоприймачів.

4. Матеріали та методи дослідження комп'ютерного моделювання методів надлишкових і ненадлишкових вимірювань

4. 1. Досліджувані матеріали і засоби моделювання

Дослідження проводилися з використанням кремнієвого фотодіода ФД307 з наступними параметрами: темновий струм фотодіода $I_s=0,003$ мкА, струмова (монохромова) чутливість $S_{\lambda}=0,27$ А/Вт (при $\lambda=0,55$ мкм).

Експериментальне підтвердження переваг математичної моделі методів надлишкових вимірювань проводилося за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі Mathcad15.

4. 2. Метод дослідження надлишкових вимірювань при оцінці впливу параметрів функції перетворення на результат вимірювання

Методи надлишкових вимірювань (МНВ) полягають в наступному: крім шуканої фізичної величини йде вимірювання (розділене у часі) декількох нормованих величин однієї фізичної природи з шуканою, в результаті чого отримуємо декілька тактів вимірювання. Математично ці такти вимірювання описуються системою рівнянь величин. Причому кількість рівнянь в системі залежить від кількості параметрів функції перетворення сенсора або на один більше (в залежності від складності нелінійної функції перетворення). В результаті розв'язання отриманої системи знаходять рівняння надлишкових вимірювань як шуканої фізичної величини, так і, при необхідності, і параметрів функції перетворення.

Теоретичні основи і застосування МНВ наведені в роботах [14–16].

Надалі буде доведено, що отримане рівняння надлишкових вимірювань дозволяє отримати результат, незалежний від параметрів нелінійної ФП і їх відхилень від номінальних значень.

При застосуванні високотемпературних процесів в якості фізичної величини будемо розглядати потік оптичного випромінювання від досліджуваного об'єкта. Розглянемо математичну модель представленого методу на прикладі оптико-електронного методу вимірювання температури. Згідно [17], зв'язок між температурою T і потоком випромінювання Φ_x можна встановити:

$$\Phi_x = A' \sigma T^4, \quad (1)$$

де σ – стала Стефана-Больцмана ($\sigma=5,668$ [Вт/м²·К⁴]); A' – коефіцієнт використання потоку випромінювання від об'єкта.

Отже, для точного вимірювання температури необхідно якомога точніше визначити значення потоку випромінювання.

Відомо [18], що функція перетворення (ФП) напівпровідникового фотодіода, що працює в фотогальванічному режимі (з навантаженням), описується наступним рівнянням величин

$$U_R = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{S_I \Phi_x}{I_S} + 1 \right) - U_{RM}, \quad (2)$$

де U_R – напруга на навантаженні; U_{RM} – падіння напруги на омичних елементах діода; T – температура фотодіода (зазвичай дорівнює температурі навколишнього середовища або блоку стабілізації температури);

q – заряд електрона ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); k – стала Больцмана ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); S_I – струмова (монохромовая) чутливість фотодіода; Φ_x – потік оптичного випромінювання, що падає на фотодіод; I_S – темновий струм фотодіода.

Для спрощення виразу прийємо наступну заміну: $\frac{1}{\Phi_T} = \frac{S_I}{I_S}$ а також

позначимо «тепловий потенціал» kT/q через $S_{\square H}$. З урахуванням цього, якщо виразити з рівняння (2) значення потоку випромінювання, то отримуємо такий вираз:

$$\Phi_x = \Phi_T \left(e^{\frac{U_R + U_{RM}}{S_{\square H}}} - 1 \right). \quad (3)$$

Як видно з рівняння (3), залежність потоку випромінювання від напруги є нелінійною (експоненціальною) і залежить від того, як точно були задані ці параметри (U_{RM} , $S_{\square H}$ і Φ_T). Отже, відхилення даних параметрів від номінальних значень може привести до недостовірної інформації і, як наслідок, до зниження точності вимірювань.

На відміну від класичного підходу, в результаті застосування МНВ отримуємо рівняння надлишкових вимірювань потоку випромінювання, в яке параметри U_{RM} і $S_{\square H}$ не входять, що дає можливість підвищити точність вимірювань. Слід зауважити, що незалежність результату вимірювального перетворення від параметрів U_{RM} і $S_{\square H}$ також важливо у випадку, коли в процесі технологічного процесу необхідно замінити датчик на однотипний. Застосування МНВ в цьому випадку не потребує додаткової калібровки і добірки датчиків, що значно скорочує витрати часу.

Для побудови математичної моделі МНВ, як вже зазначалось, необхідно сформулювати декілька нормованих (каліброваних) потоків випромінювання. Формування каліброваних за значеннями потоків випромінювання відбувається за допомогою стандартного джерела з нормованими характеристиками.

Для визначення кількості тактів вимірювання, визначаємо кількість змінних ФП. Оскільки функція перетворення фотодіода, що описується рівнянням (2), має 4 змінні, то необхідно провести 4 такти вимірювання, тобто сформувавши 4 потоки випромінювання. Для цього, за допомогою стандартного джерела з нормованими характеристиками отримують такі додаткові потоки оптичного випромінювання, що дозволять сформувавши надлишковість. В результаті сформуємо калібровані за значеннями потоки оптичного випромінювання Φ_0 і $\Delta\Phi_0$. Після того, як стандартне джерело зможе сформувавши ці потоки, на фотоприймач будуть послідовно надходити такі 4 потоки випромінювання: $\{\Phi_1\}=\{\Phi_0\}$, $\{\Phi_2\}=\{\Phi_0\}+\{\Delta\Phi_0\}$, $\{\Phi_3\}=\{\Phi_x\}$, $\{\Phi_4\}=\{\Phi_x\}+\{\Delta\Phi_0\}$. В результаті таких тактів вимірювання, на виході фотоприймача (датчика) отримуємо наступні значень напруги:

$$\begin{cases} U'_{R1} = S'_H \ln\left(\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T}\right) + 1\right) - U_{RM}; \\ U'_{R2} = S'_H \ln\left(\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_T}\right) + 1\right) - U_{RM}; \\ U'_{R3} = S'_H \ln\left(\left(\frac{\Phi_0 + \Delta\Phi_0}{\Phi_T}\right) + 1\right) - U_{RM}; \\ U'_{R4} = S'_H \ln\left(\left(\frac{\Phi_x}{\Phi_T}\right) + 1\right) - U_{RM}; \\ U'_{R5} = S'_H \ln\left(\left(\frac{\Phi_x + \Delta\Phi_0}{\Phi_T}\right) + 1\right) - U_{RM}, \end{cases} \quad (4)$$

де U_{Ri} – напруга в кожному i -му ($i=(1 \div 5)$) такті вимірювань; S'_H – крутизна перетворення.

При рішенні системи (4), виведемо рівняння надлишкових вимірювань шуканого потоку випромінювання Φ_x . Для цього з системи (4) знайдемо різницю напруг U_{R5} і U_{R4} , а також U_{R3} і U_{R2} . В результаті чого отримаємо такі вирази:

$$U'_{R5} - U'_{R4} = S'_H \ln \frac{\frac{\Phi_x + \Phi_T}{\Phi_T} + \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T}}{\frac{\Phi_x + \Phi_T}{\Phi_T}} = S'_H \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + 1 \right), \quad (5)$$

$$U'_{R3} - U'_{R2} = S'_H \ln \frac{\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Phi_T} + \frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T}}{\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Phi_T}} = S'_H \ln \left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + 1 \right). \quad (6)$$

Для кожного з виразів (5) і (6) визначимо параметр S'_H , прирівняємо їх та вирішимо відносно шуканого параметра Φ_x . В результаті отримуємо наступне рівняння надлишкових вимірювань потоку випромінювання Φ_x :

$$\Phi_x = \frac{\Delta\Phi_0}{\left[\left(\left(\frac{\Delta\Phi_0}{(\Phi_0 + \Phi_T)} \right) + 1 \right)^{(U'_{R5} - U'_{R4}) / (U'_{R3} - U'_{R2})} \right] - 1} - \Phi_T \dots \quad (7)$$

Для перевірки правильності отриманого виразу треба в рівняння (7) підставити вирази вихідних напруг (U'_{R5} , U'_{R4} , U'_{R3} , U'_{R2}) у відповідності до системи (4):

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \frac{\Delta\Phi_0}{\left[\left(\left(\frac{\Delta\Phi_0}{(\Phi_0 + \Phi_T)} \right) + 1 \right)^{(U'_{R5} - U'_{R4}) / (U'_{R3} - U'_{R2})} \right] - 1} - \Phi_T = \\ &= \frac{\Delta\Phi_0}{\left[\left(\left(\frac{\Delta\Phi_0}{(\Phi_0 + \Phi_T)} \right) + 1 \right)^{\frac{S'_H \ln\left(\frac{(\Phi_x + \Delta\Phi_0)}{\Phi_T} + 1\right) - U_{RM} - S'_H \ln\left(\frac{(\Phi_x)}{\Phi_T} + 1\right) + U_{RM}}{S'_H \ln\left(\frac{(\Phi_0 + \Delta\Phi_0)}{\Phi_T} + 1\right) - U_{RM} - S'_H \ln\left(\frac{(\Phi_0)}{\Phi_T} + 1\right) + U_{RM}}} \right] - 1} - \\ & - \Phi_T = \Phi_x. \end{aligned} \quad (8)$$

Як видно з рівняння (8), параметри логарифмічної ФП (U_{RM} і S'_{H}) скорочуються, що є доказом того, що результат надлишкових вимірювань потоку випромінювання Φ_x не залежить від параметрів ФП. Варто відзначити, що дана особливість МНВ виконується за умови, що параметри U_{RM} і S'_{H} залишаються постійними за час проведення вимірювання.

Ще однією перевагою запропонованих методів є те, що з їх допомогою стає можливим проводити метрологічний самоконтроль сенсора. Але цей процес не відбувається миттєво, а потребує певного наперед заданого часу. Детальний опис проведення метрологічного самоконтролю з використанням МНВ наведено в роботі [15].

Загалом, метрологічний самоконтроль за допомогою МНВ здійснюється завдяки рівнянню надлишкових вимірювань параметрів ФП. Для цього, з системи (4) визначимо параметри (U_{RM} і S'_{H}):

$$S'_H = \frac{U'_{R2} - U'_{R1}}{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)} \quad (9)$$

і

$$U_{RM} = S'_H \ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + 1\right) - U'_{R1} = (U'_{R2} - U'_{R1}) \frac{\ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + 1\right)}{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)} - U'_{R1}. \quad (10)$$

Для визначення величини Φ_T знайдемо відношення різниць для напруг U_{R2} , U_{R1} і U_{R2} , U_{R3} системи (4):

$$\frac{(U'_{R2} - U'_{R1}) \ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)}{(U'_{R3} - U'_{R2}) \ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + 1\right)}. \quad (11)$$

З рівняння (11) видно, що значення параметра Φ_T можна отримати шляхом покрокового наближення, тобто використати метод ітерацій.

Варто відзначити, що, якщо при вимірах не стоїть завдання по визначенню параметрів ФП, то тоді можна проводити не п'ять, а чотири такти вимірювань, виключивши перший такт в системі (4).

Таким чином, алгоритм застосування МНВ буде наступним (рис. 1):

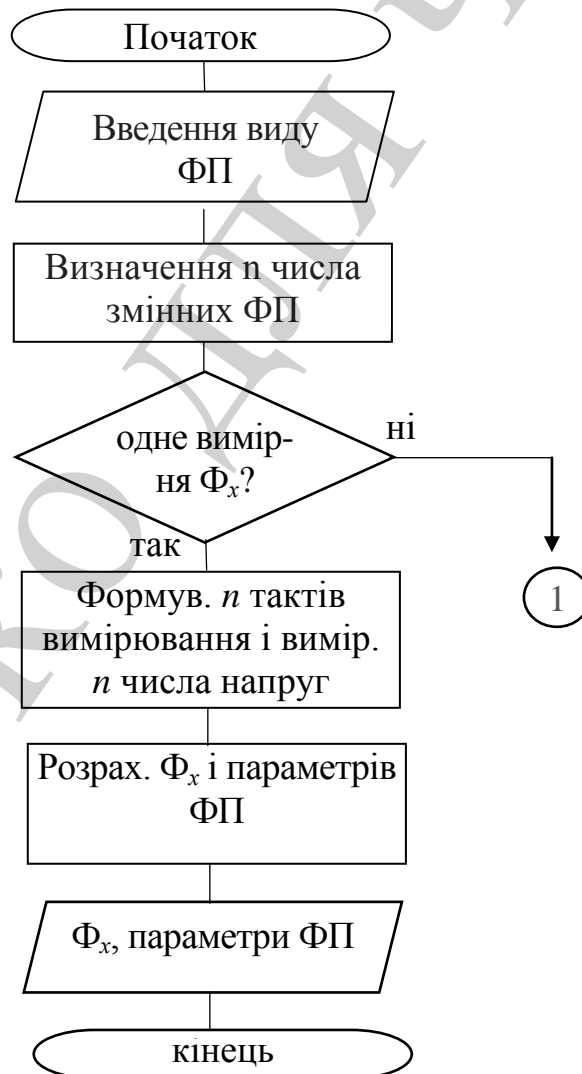


Рис. 1. Алгоритм застосування МНВ

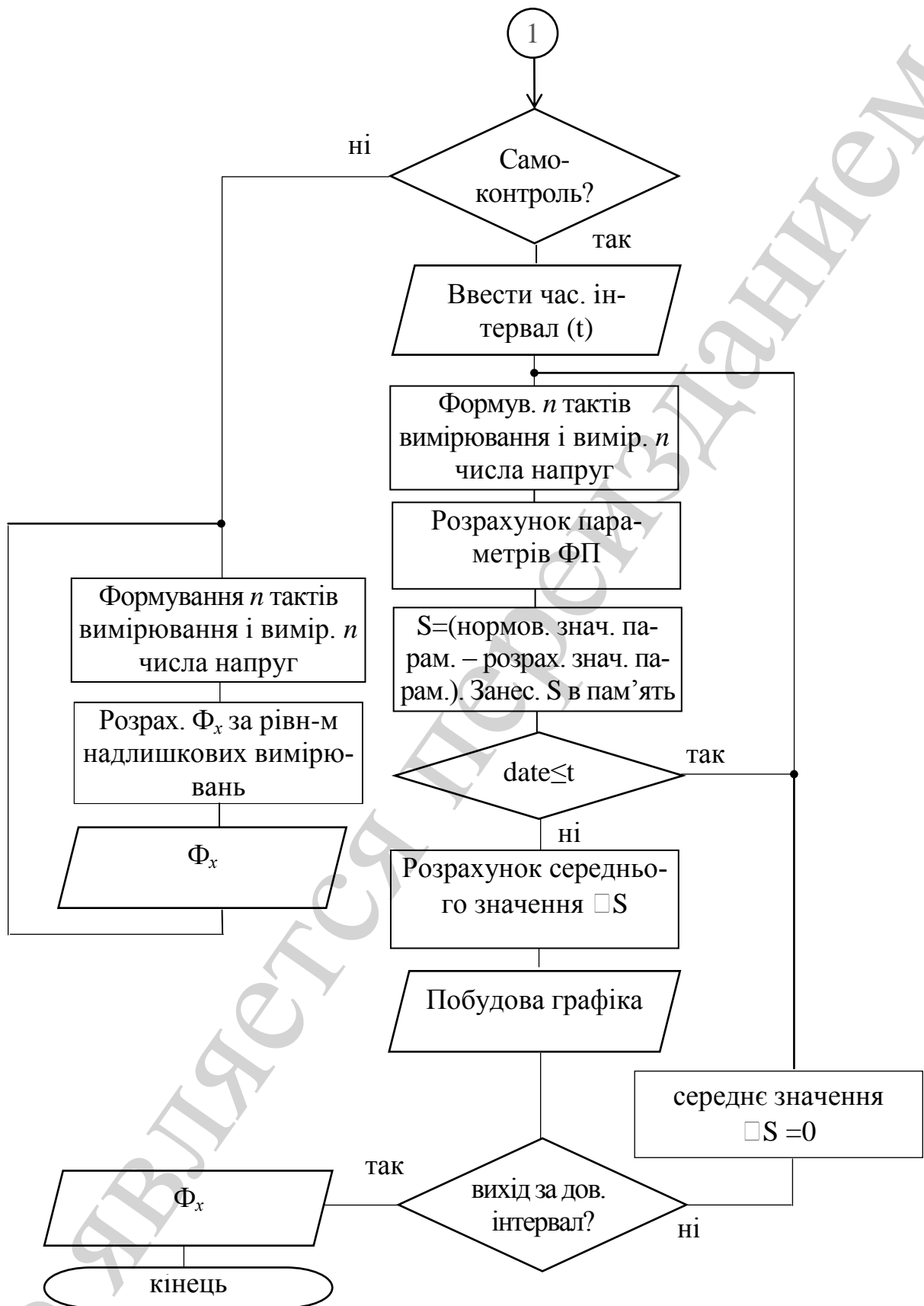


Рис. 1. Продовження. Алгоритм застосування МНВ

Для підтвердження високої точності представленого методу оцінку впливу параметрів ФП на результат вимірювання потоку випромінювання проводять за

результатами розрахунків похибок вимірювань при нормованих параметрах ФП і при їх відхиленні, а також подальшого їх порівняння. Як уже зазначалося, визначення впливу відхилення параметрів ФП від їх номінальних значень на результат вимірювання проводилося на прикладі кремнієвого фотодіода ФД307 з параметрами: темновий струм фотодіода $I_s=0,003$ мкА, струмова чутливість $S_{\lambda}=0,27$ А/Вт (при $\lambda=0,55$ мкм).

Основними показниками, які визначалися при комп'ютерному моделюванні, було обрано такі: значення потоку випромінювання (Φ_x), відносна похибка вимірювання Φ_x МНВ (δ_1) і відносна похибка вимірювання Φ_x ненадлишковим методом (δ_2).

Визначення значень відносної похибки вимірювання досліджуваного потоку випромінювання МНВ визначалося за такою методикою: спочатку визначається вид ФП та кількість її параметрів. Оскільки логарифмічна ФП, що описується рівнянням (2), має 4 змінні, то необхідно провести 4 такти вимірювання, тобто сформувати 4 потоки випромінювання. В результаті отримаємо систему рівнянь (4), виключивши перший такт (оскільки він потрібен при визначенні параметрів ФП для метрологічного самоконтролю).

Для кремнієвого фотодіода ФД307 з логарифмічною ФП визначаємо робочий діапазон потоку оптичного випромінювання Φ_x , який лежить в межах від 0,07 мВт до 1,00 мВт. Задаємо нормовані за значенням потоку оптичного випромінювання Φ_0 і $\Delta\Phi_0$ такими, щоб вони були одного порядку з досліджуваним потоком Φ_x . Обираємо $\Phi_0=0,05$ мВт і $\Delta\Phi_0=0,80$ мВт. Так як темновий струм фотодіода $I_s=0,003$ мкА, а струмова (монохромована) чутливість $S_{\lambda}=0,27$ А/Вт, то в цьому випадку одержуємо такі значення параметрів: крутизна перетворення $S_{\square_H}=0,025$ і темновий потік $\Phi_T=1,11 \cdot 10^{-8}$ Вт.

По отриманим даним за рівнянням надлишкових вимірювань (7) визначаємо значення досліджуваного потоку випромінювання Φ_x . В результаті отримуємо значення, яке приведене до входу, тобто яке значення на вході задали, таке ж і отримали на виході. Це є доказом правильності виведеного рівняння. Отримане значення будемо вважати для ідеальних умов (без похибок). Так як в реальних умовах при проведенні будь-якого технологічного процесу виникають похибки, то для комп'ютерного моделювання задаємо, що похибка відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання Φ_0 і $\Delta\Phi_0$ буде складати 0,1 мкВт.

Далі, щоб простежити динаміку впливу зміна різних параметрів ФП на результат вимірювань, проводилися розрахунки при двох різних випадках:

1) при зміні параметра S_{\square_H} в рамках $\pm 1,0$ % ($S_{\square_H}=S_H \square (1 \pm 0,01) = 0,025 \square (1 \pm 0,01)$), а параметра U_{RM} на $\pm 10,0$ % ($U_{\square_{RM}}=(0,01 \pm 0,001)$ В) при постійному параметрі Φ_T ;

2) при збільшенні параметра Φ_T до $\pm 10,0$ % (при зміні параметра S_{\square_H} в рамках $\pm 1,0$ %, U_{RM} на $\pm 10,0$ %).

При дослідженнях вважали, що зміна параметрів функції перетворення є постійними за час проведення чотирьох тактів вимірювання.

Для кожного з цих двох випадків проводився розрахунок шуканого потоку

випромінювання Φ_x за рівнянням надлишкових вимірювань (7), а також визначалась відносна похибка вимірювання.

Для представлення наявних переваг отриманих результатів, що були отримані за допомогою МНВ, проводився порівняльний аналіз з результатами ненадлишкового методу при тих же умовах. Тобто розрахунки проводилися при тих же заданих змінах параметрів, що і для МНВ: при зміні параметра $S_{\square H}$ в рамках $\pm 1,0 \%$, а параметра U_{RM} на $\pm 10,0 \%$.

5. Результати дослідження на стійкість до зміни параметрів функції перетворення ненадлишкового і надлишкового методів

Результати проведеного комп'ютерного моделювання та порівняльний аналіз МНВ і ненадлишкового методу на стійкість до зміни параметрів ФП наведені нижче. Розрахунки проводилися при умові, що зміни параметрів ФП залишаються сталими у всіх тактах вимірювання.

1. Комп'ютерне моделювання в середовищі Mathcad15 методів надлишкових вимірювань в робочому діапазоні фотодіода, дало наступні результати:

– при зміні параметра $S_{\square H}$ в рамках $\pm 1,0 \%$ ($S_{\square H} = S_H \square (1 \pm 0,01) = 0,025 \square (1 \pm 0,01)$), а параметра U_{RM} на $\pm 10,0 \%$ ($U_{\square RM} = (0,01 \pm 0,001) \text{ В}$) при постійному значенні параметра Φ_T , відносна похибка δ_1 визначення потоку Φ_x буде складати $\delta_1 = (0,04 \square 0,01) \%$.

Було також з'ясовано, що збільшення параметра $S_{\square H}$ до $\pm 10,0 \%$ (при тих же значеннях параметрів U_{RM} і Φ_T) не призводить до зміни результату.

– при збільшенні параметра Φ_T до $\pm 10,0 \%$ (при зміні параметра $S_{\square H}$ в рамках $\pm 1,0 \%$, U_{RM} на $\pm 10,0 \%$) значення похибки буде складати $\delta_1 = (0,04 \square 0,01) \%$.

2. Оскільки нелінійна функція перетворення сенсора при використанні ненадлишкових методів потребує лінеаризації або необхідність роботи на лінійній ділянці, то при комп'ютерному моделюванні була обрана лінійна ділянка вхідної характеристики фотодіода. Ця ділянка лежить в межах від 0,66 мВт до 0,88 мВт. Проведені розрахунки показали наступні результати:

– при зміні лише параметра $S_{\square H}$ в рамках $\pm 1,0 \%$ відносна похибка δ_2 визначення потоку Φ_x буде складати $\delta_2 = 1,0 \%$;

– при зміні лише параметра U_{RM} на $\pm 10,0 \%$ відносна похибка δ_2 визначення потоку Φ_x буде вже складати $\delta_2 = (0,5 \square 0,4) \%$;

– при зміні параметра $S_{\square H}$ в рамках $\pm 1,0 \%$, а параметра U_{RM} на $\pm 10,0 \%$ відносна похибка δ_2 визначення потоку Φ_x буде вже складати $\delta_2 = (1,5 \square 1,4) \%$.

Виходячи з отриманих результатів, можна констатувати той факт, що МНВ забезпечують інваріантність результатів вимірювання до змін параметрів ФП (за умови, що зміни цих параметрів незмінні за час проведення тактів вимірювання). При цьому значення похибки визначення шуканого потоку випромінювання буде залишатися практично незмінним (зміни відбуваються лише в третьому знаку на початку робочого діапазону лише при умові змінення параметру Φ_T на 10 %). У

разі застосування ненадлишкових методу, при тих же змінах параметрів, похибка збільшується на порядок в порівнянні з МНВ чим демонструє свою залежність від стабільності параметрів ФП. Крім того, застосування ненадлишкових методів при нелінійної функції перетворення датчика вимагає її лінеаризації або роботі на лінійній ділянці, що призводить до звуження робочого діапазону.

Слід зазначити, що, не зважаючи на всі переваги МНВ, їм також властива методична похибка, яка обумовлена похибкою відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання. Таким чином, висуваються вимоги до джерела випромінювання, тобто чим точніше буде відтворено нормований потік, тим менше буде методична похибка.

6. Обговорення результатів комп'ютерного моделювання математичної моделі методів надлишкових вимірювань

При визначенні похибки вимірювання досліджуваного (шуканого) потоку випромінювання, як випливає з отриманих результатів дослідження, закономірним є те що запропонований МНВ забезпечує підвищення точності вимірювання в порівнянні з застосуванням ненадлишкових методів. Це обумовлено особливістю рівняння надлишкових вимірювань, в якому за рахунок різниць певних напруг виключається адитивна складова систематичної похибки, а за рахунок операції ділення вказаних напруг виключається мультиплікативна складова.

Слід зазначити, що МНВ безпосередньо використовуються при нелінійної функції перетворення датчика будь-якого виду без необхідності її лінеаризації.

Отримані дані щодо впливу на результат вимірювання відхилень параметрів нелінійної функції перетворення фотоприймача від номінальних значень, дозволяють стверджувати наступне:

– МНВ безпосередньо використовуються при нелінійної функції перетворення датчика без додаткової її лінеаризації, що сприяє підвищенню точності та розширенню діапазону вимірювань;

– дані методи незалежні від змін значень параметрів фотоприймачів (за умови, що за час проведення тактів вимірювань така зміна параметрів залишається постійною). Це також дає можливість підвищити точність вимірювання та скоротити час при заміні фотоприймачів, оскільки не потрібно додатково проводити калібрування.

Такі висновки можна вважати доцільними з практичної точки зору, тому, що МНВ в цілому дозволяють підвищити точність, розширити діапазон вимірювань і дають можливість скоротити час при заміні фотоприймачів. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати, що МНВ можна використовувати як при лінійної так і при нелінійної функції перетворення, що є одним з їхніх переваг. Однак неможливо не відзначити, що отримані результати виходять такими за умови, що похибка відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання буде досить мала. Це накладає певні обмеження на дослідження отриманих результатів, що може трактуватися як недолік. Однак слід зазначити, що дані потоки формуються за допомогою

каліброваного джерела з нормованими характеристиками, тому дана похибка буде в рази менше, ніж похибка самого вимірювання.

7. Висновки

1. Наведено шляхи формування надлишковості, що передбачає додаткове введення декількох потоків оптичного випромінювання. Завдяки цьому створюється система рівнянь величин з метою отримання рівняння надлишкових вимірювань. Отримане рівняння надлишкових вимірювань (7) забезпечує виключення впливу на результат вимірювання змін значень параметрів нелінійної функції перетворення фотоприймача (за умови, що ці зміни залишаються постійними за час проведення тактів вимірювання). Крім того, рішення системи дає також можливість отримати рівняння (9)–(11) надлишкових вимірювань параметрів ФП і, в подальшому, проведення на їх основі метрологічного самоконтролю.

2. В результаті порівняльного аналізу похибок ненадлишкових методу і МНВ встановлено, що методи надлишкових вимірювань забезпечують високу точність вимірювання потоку випромінювання, що буде складати при заданих параметрах $(0,04 \square 0,01) \%$. Такі значення отримують завдяки обробці результатів відповідно до рівняння надлишкових вимірювань (7). В даному рівнянні за рахунок віднімання напруг виключається адитивна складова систематичної похибки, а за рахунок операції ділення різниць напруг виключається мультиплікативна складова.

В цілому, можна стверджувати про ефективність методів надлишкових вимірах в сфері підвищення точності вимірювання та забезпечення метрологічної надійності.

Література

1. Warp yarn tension during fabric formation / Shcherban' V. Yu., Melnyk G. V., Sholudko M. I., Kalashnyk V. Yu. // *Fibres and Textiles*. 2018. Issue 2. P. 97–104. URL: http://vat.ft.tul.cz/2018/2/VaT_2018_2_16.pdf. EID: 2-s2.0-85053283625.
2. Chaban V. Influence of plastic deformation warp thread on basic physical and mechanical data warp-knitting fabrics // *Fibres and Textiles*. 2013. Issue 1. P. 9–13. URL: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2013_1.pdf. EID: 2-s2.0-84878321893.
3. Yarn tension while knitting textile fabric / Shcherban' V. Yu., Melnyk G. V., Sholudko M. I., Kolysko O. Z., Kalashnyk V. Yu. // *Fibres and Textiles*. 2018. Issue 3. P. 74–83. URL: http://vat.ft.tul.cz/2018/3/VaT_2018_3_12.pdf. EID: 2-s2.0-85055724232.
4. Говорим ВНИИМС, подразумеваем – законодательная метрология! / Генкина Р. И., Лукашов Ю. Е., Маликова Х. О., Сквородников В. А., Осока И. В. // *Законодательная и прикладная метрология*. 2010. № 5. С. 8–15.
5. Orozco L. Optimizing Precision Photodiode Sensor Circuit Design // *Analog devices*. 2011. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/optimizing-precision-photodiode-sensor-circuit-design.html>

6. Imer A. G., Tombak A., Korkut A. Electrical and photoelectrical characteristic investigation of a new generation photodiode based on bromothymol blue dye // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 707. P. 012012. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/707/1/012012>

7. Photodiodes as Optical Radiation Measurement Standards / Munoz Zurita A. L., Campos J., Ferrero A., Pons A. // Photodiodes – From Fundamentals to Applications. 2012. doi: <https://doi.org/10.5772/51462>

8. Sengupta M. Accuracy of Photodiode Pyranometers for Photovoltaic Applications // Fourth Conference on Weather, Climate, and the New Energy Economy. 2013. URL: <https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/Paper222639.html>

9. Брагинец И. А., Кононенко А. Г., Масюренко Ю. А. Исследование высокочувствительного фотоприемного устройства на основе лавинного фотодиода для оптоэлектронных измерительных систем // Технічна електродинаміка. 2016. № 6. С. 69–75. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2016_6_13

10. Su Z., Liang X. Computation and analysis on the Volt-Ampere characteristics of photodiode sensor under the certain conditions // 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing. 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/cisp.2011.6100750>

11. Deyasi A., Ganguly A., Rakshit P. C. Calculating frequency response and photocurrent density of p-i-n photodiode // Proceedings of National conference on frontline research in computer, communication and device. 2015. P. 119–123. URL: https://books.google.com.ua/books?id=Pw19CwAAQBAJ&pg=PA123&lpg=PA123&dq=conference+characteristics+of+photodiode+sensor&source=bl&ots=iqTXP8NJL8&sig=ACfU3U1a1-P4MxMB_WmXDjrJ8jMNQk7ppg&hl=uk&sa=X&ved

12. Pronin A. N., Sapozhnikova K. V., Taimanov R. E. Reliability of measurement information in control systems. Problems and solutions // T-Comm: Telecommunications and transport. 2015. Vol. 9, Issue 3. P. 32–37.

13. Кондратов В. Т., Зарніцина Г. О., Рябов О. П. Пірометр спектрального відношення: Пат. № 73426 UA. № 20031212097; заявл. 23.12.2003; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7. 5 с. URL: <http://uapatents.com/5-73426-pirometr-spektralnogo-vidnoshennya.html>

14. Кондратов В. Т., Корогод А. А. Избыточная пирометрия: состояние и перспективы развития // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2017. № 2. С. 37–46. URL: http://fetronics.ho.com.ua/pdf/pdf_full/2017/vottp-2017-2.pdf

15. Кондратов В. Т. Новая эра развития теории метрологической надежности – функция распределения Кондратова – Вейбулла, ее разновидности, свойства и функциональные возможности // Законодательная и прикладная метрология. 2009. № 2. С. 21–22.

16. Кондратов В. Т., Зарніцина Г. О. Цифровий пірометр відношення: Пат. № 77840 UA. № а200501402; заявл. 15.02.2005; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1. 11 с.

17. Канарчук В. Е., Деркач О. Б., Чигринец А. Д. Термометрическая диагностика машин. Київ: «Вища школа», 1985. 168 с.

18. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы: учеб. пос. Москва: «Высшая школа», 1974. 376 с.

Не являється переизданням