

УДК 389:621.317

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218517

## Комп'ютерне моделювання багатократних вимірювань логарифмічної функції перетворення по двом підходам

В. Ю. Щербань, Г. О. Корогод, О. З. Колиско, М. І. Колиско,  
Ю. Ю. Щербань, Г. В. Шуцька

*Проведеними дослідженнями можливостей методів надлишкових вимірювань встановлено високу ефективність представлених методів щодо підвищення точності багатократних вимірювань. Доведено, що рівняння надлишкових вимірювань забезпечує незалежність результату вимірювань від параметрів функції перетворення і їх відхилень від номінальних значень. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що точність багатократних вимірювання підвищується за рахунок обробки результатів проміжних вимірювань за рівняннями надлишкових вимірювань по двом підходам. Зокрема встановлено, що обробка результатів багатократних вимірювань при логарифмічній функції перетворення за першим підходом забезпечує значення відносної похибки, що буде складати  $0,75 \cdot 10^{-3} \%$ , а за другим –  $0,02 \cdot 10^{-3} \%$ . Це дозволяє стверджувати, що, підвищення точності відбувається завдяки сумарному ефекту – забезпечується виключення систематичної складової похибки, обумовленої зміною параметрів функції перетворення, а також зменшення випадкової складової похибки. Останнє, зокрема, стосується алгоритмів обробки багатократних вимірювань по двом підходам. Проведено порівняльний аналіз та встановлені переваги і недоліки кожного з представлених двох підходів. Було встановлено, що другий підхід менш чутливий до збільшення різниці між значеннями контрольованої величиною і нормованої за значенням. Це дозволяє стверджувати про можливість вимірювання контрольованого параметру ( $\Phi_x$ ) великого значення без накладення високих вимог до потужностей джерела каліброваного випромінювання.*

*Є підстави стверджувати про перспективний розвиток методів надлишкових вимірювань при обробці результатів багатократних вимірювань в сфері підвищення точності при нелінійній функції перетворення.*

*Ключові слова: надлишкові методи, багатократні вимірювання, рівняння вимірювань, параметри функції, підвищення точності.*

### 1. Вступ

Сучасний розвиток промисловості ставить перед науковцями та інженерами актуальні задачі по підвищенню точності вимірювання і отримання достовірної інформації (про контрольований параметр чи об'єкт дослідження) при одночасному зниженні витрат на метрологічне забезпечення. Ця задача особливо гостро постає при виконанні технологічних процесів, наприклад в хімічній чи текстильній промисловості. Це обумовлено тим, що похибка вимірювання чи недостовірність отриманої інформації може призвести до випуску неякісного продукту [1–3] або його браку, а інколи, навіть, до затримки всього технологічного процесу. У вирі-

шенні цього питання особливу роль грає точність самого засобу вимірювання і вдосконалення відповідних методів вимірювання. Як відомо, основним елементом засобів вимірювання є датчик, який перетворює вхідну контрольовану фізичну величину, що характеризує технологічний процес або властивість досліджуваного об'єкта, в пропорційний електричний вихідний сигнал. І від того, з якою точністю буде проведено це перетворення і залежить точність всього подальшого вимірювального процесу. Оскільки навіть незначне відхилення, що вноситься сенсором, буде лише підсилене при подальшій обробці в вимірюваному каналі. Тож, до сенсорів висуваються наступні вимоги: висока точність, висока чутливість, широкій робочий діапазон, стабільність характеристик тощо. Крім того, вид функції перетворення сенсора також впливає на точність вимірювання. Так, при нелінійній функції перетворення необхідно проводити її лінеаризацію, що спричиняє появу похибки від нелінійності, або звужувати робочий діапазон і працювати на лінійних ділянках вхідної характеристики.

Особливу увагу слід приділити тим виробництвам і процесам, де потрібно проводити багатократні вимірювання протягом довгого часу з метою контролю вимірювального параметра (величини) в межах допуску. При такому тривалому вимірювальному контролі під впливом навколишнього середовища параметри функції перетворення сенсора змінюються, що впливає на точність результату вимірювання [4] і, як наслідок, на якість продукції. Таким чином, при багатократних вимірюваннях, з одного боку, потрібно дотримуватися високої точності вимірювання при нелінійній функції перетворення, а з іншого – мінімізувати необхідність у частій повірці датчиків через зміну параметрів функції перетворення.

Тож актуальними слід вважати дослідження, спрямовані на підвищення точності багатократних вимірюваннях при нелінійній функції перетворення.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Технічний прогрес спонукає поглибленню вивчення та аналізу причин, що призводять до виникнення похибок вимірювання, а також шляхи для їх подолання. Дослідженнями, що були проведені в роботі [5], підвищення точності досягалося при застосуванні адитивного і мультиплікативного тестів. Показано, що адитивний тест реалізується за рахунок ведення зразкової міри, а мультиплікативний – за рахунок зразкової зміни чутливості вимірювального каналу. Однак при використанні запропонованого підходу потрібно точно дотримуватися співвідношення значень еталонної ваги і коефіцієнта підсилення. Крім того, залишилося невирішеним питання обробки результатів вимірювання при нестабільності параметрів характеристики перетворення, а також при її нелінійності. В роботі [6] підвищення точності і чутливості вимірювання досягалося завдяки зменшенню впливу темного струму і компенсації власних шумів вимірювального каналу радіометричного вимірювача. Показано, що за рахунок комутації сигналів опорного (затемненого) і вимірювального (відкритого) фотодіодів та відповідній їх обробці виключаються власні шуми фотоприймача і зменшується вплив їх темнових струмів. Питання підвищення точності вимірювання за рахунок збільшення чутливості фотоприймача також було розглянуто в роботі [7]. Однак слід зазначити, що в даних роботах не враховується вплив

зміни параметрів функції перетворення на результат вимірювань, що, в свою чергу, може привести до збільшення похибки вимірювання. Дана обставина пов'язана з впливом навколишнього середовища на вимірювальний канал з сенсором, а також із старінням самого матеріалу. Для подолання цієї проблеми в роботах [8, 9] були наведені відповідні алгоритми обчислювань, в результаті яких досягалося покращення вихідного сигналу сенсора при різних умовах. Однак в даних роботах не визначено, як саме проводити обчислення при нелінійній функції перетворення з нестабільними параметрами, що, в свою чергу, є складовими систематичної похибки. Теоретичні аспекти систематичної і випадкової складових похибки вимірювань [10] та деякі шляхи їх зменшення були розглянуті в роботі [11]. У дослідженнях показано, що мінімізацію систематичної складової похибки пропонувалося досягти шляхом розробки і формування відповідних вимог та заходів щодо зменшення систематичної похибки і її складових – інструментальної, методичної та суб'єктивної. Незважаючи на значущість таких підходів, не розглянуто в достатній мірі шляхи по зменшенню випадкової складової похибки вимірювання. Основні фактори невизначеності та їх оцінка були розглянуті в роботі [12]. Показано, що завдяки оцінці цих факторів стає можливим отримання більш точних результатів вимірювання оптичного випромінювання, або, як зазначено в [13], і іншого контрольованого параметру. В роботі [14] підвищення точності та зменшення сенсорної невизначеності досягалося шляхом використання об'єднання даних в багатовимірному датчику. Однак у даних роботах не були розглянуті питання безпосередньої роботи з нелінійною функцією перетворення. Дана обставина пов'язана з тим, що лінеаризація функції перетворення спричиняє появу похибки від нелінійності або потребує необхідності роботи на лінійних ділянках вхідної характеристики сенсора, що призводить до звуження діапазону вимірювання. В роботі [15] розширення діапазону досягалося шляхом використання запрограмованих коефіцієнтів підсилення та синхронних детекторів. Однак слід зазначити, що в даних роботах не наведені шляхи підвищення точності при нелінійній і нестабільній функції перетворення. Підвищення точності за рахунок зменшення впливу нелінійності було розглянуто в роботі [16]. Тут шляхом калібрування при декількох еталонних температурах досягалося зменшення кривизни поправки і, таким чином, підвищення точності. Однак тут не розглядається виключення впливу на результат вимірювання систематичної складової похибки, викликаной нестабільністю параметрів функції перетворення під впливом зовнішніх факторів.

Підвищення точності вимірювання при нелінійній і нестабільній функції перетворення із застосуванням надлишковості було розглянуто в роботах [17–19]. Але не були досліджені підходи по обробці результатів багатократних вимірювань при нелінійній (логарифмічній) функції перетворення. Це обумовлюється тим, що проведення багатократних вимірювань, як відомо, сприяють зменшенню впливу випадкової складової похибки вимірювання і, як наслідок, призводить до покращення достовірності вимірювань.

Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність у дослідженнях багатократних вимірюваннях при нелінійній функції перетворення із застосуван-

ням надлишковості обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

### 3. Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету визначити закономірності і особливості застосування багатократних вимірювань при логарифмічній функції перетворення за двома підходами, що сприяють підвищенню точності вимірювань.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

– розробити математичні моделі багатократних вимірювань при логарифмічній функції перетворення по двом підходам;

– провести комп'ютерне моделювання запропонованої математичної моделі по двом підходам при змінах параметрів функції перетворення від  $\pm 1,0\%$  до  $\pm 10,0\%$ , а також при зменшенні (вдвічі і в чотири рази) величини нормованого потоку;

– зробити порівняльний аналіз запропонованих підходів.

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

#### 4.1. Досліджувані матеріали і засоби моделювання

Дослідження проводилися з використанням кремнієвого фотодіода ФД307, який має логарифмічну функцію перетворення (ФП) та наступні параметри: темновий струм фотодіода  $I_s=0,003$  мкА, струмова (монохромована) чутливість  $S_{\lambda}=0,27$  А/Вт (при  $\lambda=0,55$  мкм).

В якості програмного середовища, як засобу для математичного моделювання і аналізу поведінки сенсора при різних вхідних даних, було обрано Mathcad15.

#### 4.2. Метод дослідження надлишкових вимірювань

Як відомо [20], функція перетворення фотодіода в фотогальванічному режимі (з навантаженням) має вигляд:

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

де  $U_R$  – напруга на навантаженні;

$k$  – стала Больцмана ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$T$  – температура фотодіода (температура навколишнього середовища або блоку стабілізації температури);

$q$  – заряд електрона ( $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);

$S_I$  – струмова (монохроматична) чутливість фотодіода;

$\Phi_x$  – потік оптичного випромінювання, що падає на фотодіод;

$I_s$  – темновий струм фотодіода;  $U_{RM}$  – падіння напруги на омичних елементах діода.

Для спрощення виразу (1) введено наступні заміни:  $kT/q = S'_H$  (де  $S'_H$  – крутість перетворення), а також  $\frac{S_I}{I_S} = \frac{1}{\Phi_T}$  (де  $\Phi_T$  – темновий потік). В результаті запропонованих замін вираз (1) прийме вид:

$$U'_R = S'_H \ln \left( \frac{\Phi_x}{\Phi_T} + 1 \right) - U'_{RM}. \quad (2)$$

Оскільки в рівнянні (1) контрольованою величиною є потік  $\Phi_x$ , то рівняння (2) було розв'язане відносно нього. В результаті отримано вираз наступного виду:

$$\Phi_x = \Phi_T \left( e^{\frac{U'_R + U'_{RM}}{S'_H}} - 1 \right). \quad (3)$$

В рівняннях величин (2) і (3) параметри  $U'_{RM}$  і  $S'_H$  вказані зі штрихами, що вказує на їх реальні (не ідеальні) значення, тобто значення з похибкою. Отже, при застосуванні ненадлишкових методів результат вимірювання контрольованої величини  $\Phi_x$  буде залежати від точного знання цих величин. Крім того, логарифмічну функцію перетворення необхідно лінеаризувати або працювати на лінійній її ділянці. Зазначені задачі по зменшенню похибки від нелінійності і нестабільності функції перетворення успішно вирішують методи надлишкових вимірювань (МНВ).

Для реалізації надлишкових вимірювань необхідно скласти математичну модель у вигляді системи рівнянь, що описує такти вимірювання. При цьому, кількість тактів визначається кількістю змінних в представленій ФП. Оскільки ФП, що описується рівнянням (2), має 4 змінні, то система рівнянь буде складатися з 4 рівнянь величин. Для цього, крім такту вимірювання контрольованої величини  $\Phi_x$  проводять такти вимірювання нормованих за значенням потоків випромінювання  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$ . Дані потоки формуються за допомогою стандартних джерел з нормованими характеристиками. Таким чином на фотодіод послідовно (в різні такти вимірювання) надходять 4 потоки випромінювання. В першому такті на фотодіод надходить нормований за значенням потік випромінювання  $\Phi_0$ , в другому – одночасно два нормовані потоки  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$ . В третьому такті йде вимірювання лише контрольованої величини  $\Phi_x$ , а в четвертому – одночасно контрольованої величини  $\Phi_x$  і нормованого за значенням потоку випромінювання  $\Delta\Phi_0$ . В результаті чого отримаємо наступну систему рівнянь величин, що складається з чотирьох тактів вимірювань:

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

де  $U'_{Ri}$  – напруга в кожному  $i$ -му ( $i=(1\div 4)$ ) такті вимірювання.

Слід зазначити, що всі  $i$  такти вимірювання (для логарифмічної функції перетворення  $i=(1\div 4)$ ) складають 1 цикл вимірювання.

В результаті рішення цієї системи відносно контрольованої величини  $\Phi_x$ , отримуємо вираз:

$$\Phi_x = \frac{\Delta\Phi_0}{\left[ \left( \Delta\Phi_0 / ((\Phi_0 + \Phi_T) + 1) \right)^{(U'_{R4} - U'_{R3}) / (U'_{R2} - U'_{R1})} \right] - 1} - \Phi_T. \quad (5)$$

В отримане рівняння (5), на відміну від рівняння (3), не входять параметри  $U'_{RM}$  і  $S'_H$ , тобто результат вимірювання контрольованої величини  $\Phi_x$  не залежить від параметрів ФП та їх змін. Таким чином, МНВ сприяють виключенню систематичної складової похибки, що обумовлена нестабільністю параметрів функції перетворення. Слід зазначити, що такий результат досягається за умови, якщо за час проведення циклу вимірювань зміни параметрів залишаються сталими.

Для перевірки правильності отриманого рівняння (5) достатньо замість поточних напруг  $U'_{Ri}$  підставити їх вирази з системи рівнянь (4). В результаті цього отримаємо рівняння надлишкових вимірювань:

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \\ &= \frac{\Delta\Phi_0}{\left[ \left( \Delta\Phi_0 / ((\Phi_0 + \Phi_T) + 1) \right)^{\frac{(S'_H \ln((\Phi_x + \Delta\Phi_0)/\Phi_T + 1) - U'_{RM}) - (S'_H \ln((\Phi_0 + \Delta\Phi_0)/\Phi_T + 1) - U'_{RM})}{(S'_H \ln((\Phi_0 + \Delta\Phi_0)/\Phi_T + 1) - U'_{RM}) - (S'_H \ln((\Phi_0/\Phi_T) + 1) - U'_{RM})}} \right] - 1} - \\ &- \Phi_T = \Phi_x. \end{aligned} \quad (6)$$

Як видно з рівняння надлишкових вимірювань (6), значення контрольованого параметру  $\Phi_x$  приведено ко входу. Це означає, що при використанні МНВ не потрібно проводити додаткову лінеаризацію логарифмічною функції перетворення.

### 4. 3. Метод дослідження МНВ при багаторазових вимірюваннях

Як відомо, у випадку проведення багаторазових вимірювань, коли виникає необхідність враховувати випадкові складові похибки, використовують, як правило, методи статистичної обробки даних. В теорії надлишкових вимірювань ця процедура виконується за двома підходами, кожен з яких відрізняються алгори-

тмом обробки результатів багаторазових вимірювань [21, 22]. При першому підході за кожний цикл відбувається вимірювання напруг у кожному такті. Після проведення  $m$  цикл, отримані результати напруг усереднюють по кожному з тактів, а отримані середні значення підставляють у відповідне рівняння надлишкових вимірювань контрольованої фізичної величини. При другому підході в кожному циклі спочатку знаходять значення контрольованої фізичної величини по рівнянню надлишкових вимірювань, а потім отримані значення усереднюють за  $m$  циклів вимірювань.

Було розглянуто застосування цих двох підходів при логарифмічній функції перетворення на основі системи рівнянь (4) і рівняння надлишкових вимірювань (5).

При першому підході в кожному циклі йде вимірювання поточних значень напруг  $U'_{R1}$ ,  $U'_{R2}$ ,  $U'_{R3}$ ,  $U'_{R4}$  відповідно до системи рівнянь (4). Після завершення  $m$  циклів вимірювань значення напруг усереднюють по кожному такту, а потім отримані значення середній напруг  $\bar{U}'_{R1}$ ,  $\bar{U}'_{R2}$ ,  $\bar{U}'_{R3}$ ,  $\bar{U}'_{R4}$  підставляють в рівняння надлишкових вимірювань (5). В результаті чого отримано вираз:

$$\Phi_x = \frac{\Delta\Phi_0}{\left[ \left( \frac{\Delta\Phi_0}{(\Phi_0 + \Phi_T) + 1} \right) \left( \frac{\sum_{i=1}^m U'_{R4i}}{m} - \frac{\sum_{i=1}^m U'_{R3i}}{m} \right) / \left( \frac{\sum_{i=1}^m U'_{R2i}}{m} - \frac{\sum_{i=1}^m U'_{R1i}}{m} \right) \right] - 1} - \Phi_T, \quad (7)$$

При другому підході в кожному циклі йде вимірювання контрольованої величини  $\Phi_x$  за рівнянням надлишкових вимірювань (5). Після завершення  $m$  циклів вимірювань поточні значення контрольованої величини усереднюють, що і буде розглядатися як результат вимірювання. Таким чином, рівняння надлишкових вимірювань (5) по другому підходу прийме вид:

$$\Phi_x = \frac{\sum_{i=1}^m \Phi_{xi}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^m \left[ \frac{\Delta\Phi_0}{\left( \frac{\Delta\Phi_0}{(\Phi_0 + \Phi_T) + 1} \right)^{(U'_{R4i} - U'_{R3i}) / (U'_{R2i} - U'_{R1i})} \right] - 1}{m} - \Phi_T. \quad (8)$$

На основі представлених математичних моделей було проведено комп'ютерне моделювання цих підходів для подальшого їх аналізу і дослідження.

## 5. Результати комп'ютерного моделювання двох підходів

### 5.1. Комп'ютерне моделювання двох підходів і їх результати при заданому значенні величини нормованого потоку

Комп'ютерне моделювання проводилося в середовищі Mathcad15, при наступних параметрах фотодіода ФД307: падіння напруги на омичних елементах

діода  $U_{RM}=0,01$  В, темновий струм фотодіода  $I_s=0,003$  мкА, струмова (монохроматична) чутливість  $S_{\lambda}=0,27$  А/Вт (при  $\lambda=0,55$  мкм). На основі запропонованої вище заміни ( $S_I/I_s = 1/\Phi_T$ ) було отримано значення темнового потоку  $\Phi_T=1,111 \cdot 10^{-8}$  Вт. В якості робочої точки задано значення потоку  $\Phi_x=0,001$  Вт. Оскільки значення нормованих фізичних величин в сумі повинні бути одного порядку з контрольованою, тому було обрано  $\Phi_0=0,8$  мВт,  $\Delta\Phi_0=0,1$  мВт.

Також було запропоновано значення похибки відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$ , які становитимуть  $\pm 0,1$  %. Така невисока похибка обумовлена тим, що нормовані за значенням величини  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$  формується за допомогою каліброваного джерела високої точності. Межі змін для параметрів  $\bar{U}'_{RM}$  і  $S'_H$  задано в діапазоні від  $\pm 1,0$  % до  $\pm 10,0$  %.

В результаті комп'ютерного моделювання багатократних вимірювань по двох підходах були отримані наступні значення, які представлені в табл. 1. При цьому, слід було, що за час проведення одного циклу вимірювань, значення параметрів ФП  $U'_{RM}$  і  $S'_H$  і їх відхилень залишалися незмінними.

Було визначено, що відносна похибка вимірювання контрольованого потоку  $\Phi_x$  в кожному циклі вимірювань становитиме  $0,013$  %, що підтверджує високу точність МНВ.

Слідуючи запропонованому алгоритму обробки результатів по першому підходу, спочатку знаходять середні значення отриманих значень напруг для кожного з тактів вимірювань:  $\bar{U}'_1=0,2724$  В,  $\bar{U}'_2=0,2754$  В,  $\bar{U}'_3=0,2780$  В,  $\bar{U}'_4=0,2804$  В. Отримані значення підставляються в рівняння (7), в результаті чого було отримано значення контрольованого потоку випромінювання  $\Phi_x=9,999925 \cdot 10^{-4}$  Вт і відповідне значення відносної похибки  $\delta$  буде складати  $0,75 \cdot 10^{-3}$  %.

При аналізі впливу зміни кожного з параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$  на поточні значення напруг слід зазначити, що більший вплив має параметр  $S'_H$ . Так, при несиметричній зміні параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$  за час проведення циклів вимірювань було виявлено, що чим більше відбувається відхилення параметра  $S'_H$ , тим більше розкид значень напруг відносно їх середніх значень.

При другому підході за кожен цикл вимірювань визначалося поточне значення потоку випромінювання  $\Phi_x$  відповідно до рівняння надлишкових вимірювань (5). Далі, відповідно до рівняння (8), відбувалося усереднення отриманих значень, що в результаті дало можливість отримати значення контрольованого потоку випромінювання  $\Phi_x=1,0000002 \cdot 10^{-3}$  Вт. Було встановлено, що значення відносної похибки  $\delta$  при другому підході становитиме  $0,02 \cdot 10^{-3}$  %.

При розгляді впливу зміни кожного з параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$  на поточний значення напруг, слід зазначити, що другий підхід менш чутливий до їх змін, ніж перший.



Таблиця 1

Результати вимірювань при зміні параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$ 

№	Зміна параметрів $U'_{RM}$ і $S'_H$	$U'_{R1}$	$U'_{R2}$	$U'_{R3}$	$U'_{R4}$	$\Phi_x$
1	$U'_{RM} = (0.01 + 0.0001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.01)$	0,2753	0,2783	0,2810	0,2834	$9.998654 \cdot 10^{-4}$
2	$U'_{RM} = (0.01 - 0.0001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.01)$	0,2695	0,2724	0,2750	0,2774	$1.000135 \cdot 10^{-3}$
3	$U'_{RM} = (0.01 + 0.001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.1)$	0,3016	0,3049	0,3078	0,3105	$9.998654 \cdot 10^{-4}$
4	$U'_{RM} = (0.01 - 0.0001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.1)$	0,2432	0,2458	0,2482	0,2504	$1.000135 \cdot 10^{-3}$
6	$U'_{RM} = (0.01 + 0.001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.01)$	0,2762	0,2792	0,2819	0,2843	$9.998654 \cdot 10^{-4}$
7	$U'_{RM} = (0.01 - 0.001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.01)$	0,2742	0,2772	0,2799	0,2823	$9.998654 \cdot 10^{-4}$
8	$U'_{RM} = (0.01 + 0.001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.01)$	0,2706	0,2735	0,2761	0,2785	$1.000135 \cdot 10^{-3}$
9	$U'_{RM} = (0.01 - 0.001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.01)$	0,2686	0,2715	0,2741	0,2765	$1.000135 \cdot 10^{-3}$
10	$U'_{RM} = (0.01 + 0.0001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.1)$	0,3007	0,3040	0,3069	0,3096	$9.998654 \cdot 10^{-4}$
11	$U'_{RM} = (0.01 - 0.0001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.1)$	0,3005	0,3038	0,3067	0,3094	$9.998654 \cdot 10^{-4}$
12	$U'_{RM} = (0.01 + 0.0001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.1)$	0,2443	0,2469	0,2493	0,2515	$1.000135 \cdot 10^{-3}$
13	$U'_{RM} = (0.01 - 0.0001) \text{ В}$ і $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.1)$	0,2441	0,2467	0,2491	0,2513	$1.000135 \cdot 10^{-3}$
Середні значення		0,2724	0,2754	0,2780	0,2804	$10.000002 \cdot 10^{-4}$

## 5. 2. Комп'ютерне моделювання двох підходів і їх результати при зменшенні величини нормованого потоку

В даному підрозділ було розглянуто вплив значення нормованої за значенням фізичної величини  $\Phi_0$  на результат вимірювань. Для цього досліджуємо досліджено випадок, коли різницю між значеннями контрольованої величини і нормованої величиною було збільшено. Зменшення величини нормованого по-

току  $\Phi_0$  було здійснено в два рази – з 0,8 мВт до 0,4 мВт. При цьому, обрані раніше значення інших величин залишені незмінними. Результати комп'ютерного моделювання представлені в табл. 2. При цьому, в табл. 2 наведені результати, отримані при максимальних відхиленнях параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$ .

Таблиця 2

Результати вимірювань при зміні параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$

№	Зміна параметрів $U'_{RM}$ і $S'_H$	$U'_1$	$U'_2$	$U'_3$	$U'_4$	$\Phi_x$
1	$U'_{RM} = (0.01 + 0.0001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.01)$	0,2576	0,2633	0,2810	0,2834	$9.997049 \cdot 10^{-4}$
2	$U'_{RM} = (0.01 - 0.0001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.01)$	0,2521	0,2577	0,2750	0,2774	$1.000295 \cdot 10^{-3}$
3	$U'_{RM} = (0.01 + 0.001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.1)$	0,2824	0,2886	0,3078	0,3105	$9.997049 \cdot 10^{-4}$
4	$U'_{RM} = (0.01 - 0.001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.1)$	0,2274	0,2325	0,2482	0,2504	$1.000295 \cdot 10^{-3}$
Середні значення		0,2605	0,2652	0,2780	0,2804	$1.0000001 \cdot 10^{-3}$

Таким чином, при обробці результатів по першому підході було отримано значення контрольованої величини потоку випромінювання  $\Phi_x$ , що становитиме  $9.999836 \cdot 10^{-4}$  Вт і, відповідно, значення відносної похибки  $\delta$  становитиме  $1,64 \cdot 10^{-3} \%$ . Отже, при першому підході збільшення різниці між значеннями контрольованої величиною і нормованої за значенням призводить до збільшення відносної похибки майже в 2 рази (з  $0,75 \cdot 10^{-3} \%$  до  $1,64 \cdot 10^{-3} \%$ ).

Комп'ютерне моделювання при другому підході показало, що значення контрольованої величини потоку випромінювання становитиме  $\Phi_x = 1.0000001 \cdot 10^{-3}$  Вт і, відповідно, значення відносної похибки  $\delta$  становитиме  $0,01 \cdot 10^{-3} \%$ . Отже, при другому підході збільшення різниці між значеннями контрольованої величиною і нормованої за значенням не призводить до істотного збільшення відносної похибки.

Слід зазначити, що відносна похибка вимірювання контрольованого потоку  $\Phi_x$  в кожному циклі вимірювань становитиме  $0,03 \%$ .

Також розглянуто випадок, коли величина нормованого потоку  $\Phi_0$  була зменшена в чотири рази – з 0,8 мВт до 0,2 мВт. При цьому, обрані раніше значення інших величин залишено незмінними. Результати такого комп'ютерного моделювання представлені в табл. 3.

В результаті було отримано, що при першому підході значення відносної похибки  $\delta$  збільшується з  $0,75 \cdot 10^{-3} \%$  (при  $\Phi_0 = 0,8$  мВт) до  $0,003 \%$ , а значення відносної похибки  $\delta$  при другому підході становитиме  $0,03 \cdot 10^{-3} \%$ .

Слід зазначити, що відносна похибка вимірювання контрольованого потоку  $\Phi_x$  в кожному циклі вимірювань становитиме  $0,057 \%$ .

Таблиця 3

Результати вимірювань при зміні параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$ 

№	Зміна параметрів $U'_{RM}$ і $S'_H$	$U'_1$	$U'_2$	$U'_3$	$U'_4$	$\Phi_x$
1	$U'_{RM} = (0.01 + 0.0001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.01)$	0,2400	0,2503	0,2810	0,2834	$9.99413 \cdot 10^{-4}$
2	$U'_{RM} = (0.01 - 0.0001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.01)$	0,2348	0,2449	0,2750	0,2774	$1.000569 \cdot 10^{-3}$
3	$U'_{RM} = (0.01 + 0.001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 + 0.1)$	0,2631	0,2744	0,3078	0,3105	$9.99413 \cdot 10^{-4}$
4	$U'_{RM} = (0.01 - 0.001) \text{ В і}$ $S'_H = S_H \cdot (1 - 0.1)$	0,2116	0,2209	0,2482	0,2504	$1.000569 \cdot 10^{-3}$
Середні значення		0,2605	0,2652	0,2780	0,2804	$1.0000003 \cdot 10^{-3}$

### 5.3. Порівняльний аналіз запропонованих підходів

При розгляді впливу змін параметрів на результат вимірювання другий підхід виявився менш чутливий до їх змін, ніж перший. Так, відносна похибка  $\delta$  при першому підході становить  $0,75 \cdot 10^{-3} \%$ , а при другому –  $0,02 \cdot 10^{-3} \%$ . Особливістю другого підходу було виявлено і те, що поточне значення потоку випромінювання  $\Phi_x$  залежить лише від знаку параметра  $S'_H$  і не залежить від величини його зміни. Слід також зазначити, що відносна похибка вимірювання контрольованого потоку  $\Phi_x$  в кожному циклі вимірювань становитиме  $0,013 \%$ . Це свідчить про те, що обробка багатократних вимірювань по двом підходам сприяє підвищенню точності.

При розгляді впливу величини нормованого потоку  $\Phi_0$  на результат вимірювання (відносна похибка  $\delta$  вимірювань), були отримані наступні дані, які представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Результати вимірювань при зміні величини нормованого потоку  $\Phi_0$ 

$\Phi_0$ , мВт	$\delta$ при першому підході, %	$\delta$ при другому підході, %	$\delta$ в кожному циклі, %
0,8	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$0,02 \cdot 10^{-3}$	0,013
0,4	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$	0,030
0,2	0,003	$0,03 \cdot 10^{-3}$	0,057

Отже, другий підхід менш чутливий до збільшення різниці між значеннями контрольованої величиною і нормованої за значенням та не призводить до істотного збільшення відносної похибки (з  $0,02 \cdot 10^{-3} \%$  до  $0,03 \cdot 10^{-3} \%$ ). Слід також зазначити, що збільшення різниці між значеннями контрольованої величиною і но-

рмованої за значенням призводить до підвищення похибки при однократних вимірювання, що зростає з 0,013% (при  $\Phi_0=0,8$  мВт) до 0,057% (при  $\Phi_0=0,2$  мВт).

## **6. Обговорення результатів комп'ютерного моделювання багатократних вимірювань при двох підходах**

В результаті комп'ютерного моделювання було встановлено високу ефективність запропонованих підходів при обробці результатів багатократних вимірювань щодо виключенню впливу параметрів нелінійної ФП на результат вимірювань. Це стає можливим завдяки представленим рівнянням надлишкових вимірювань, в яких завдяки операції віднімання і діленню вихідних напруг виключається вплив, відповідно, адитивної і мультиплікативної складової похибки вимірювання. Це не розходиться з практичними даними, які були наведені в роботі [5], автори якої теж досягають підвищення точності за рахунок зменшення адитивної і мультиплікативної складової похибки. Крім того, статистична обробка результатів багатократних вимірювань згідно запропонованих алгоритмів дозволяє зменшити і випадкову складову похибку як було зазначено в роботі [21]. Обробка результатів при багатократних вимірювань дозволяють зменшити відносну похибку вимірювання у порівнянні з обробкою результатів в одному циклі. Так, наприклад, при другому підході відносна похибка складає  $0,02 \cdot 10^{-3}$  %, а похибка вимірювання контрольованого потоку  $\Phi_x$  в кожному циклі вимірювань становитиме 0,013 %.

При проведенні порівняльного аналізу результатів комп'ютерного моделювання багатократних вимірювань було встановлено, що більш точним виявився другий підхід. Так, при першому підході значення відносної похибки  $\delta$  буде складати  $0,75 \cdot 10^{-3}$  %, а при другому –  $0,02 \cdot 10^{-3}$  %. Таким чином, обробка результатів проміжних вимірювань відповідно до рівняння (8), показує на порядок меншу відносну похибку багаторазових вимірювань, ніж обробка отриманих результатів відповідно до рівняння (7).

Як відомо, на підвищення точності чинить вплив і чутливість, про що свідчить і робота [7]. При дослідженні впливу величини параметр  $S'_H$  було з'ясовано, що другий підхід менш чутливий до його змін, ніж перший. Ще однією особливістю при застосуванні другого підходу є те, що поточне значення потоку випромінювання  $\Phi_x$  залежить лише від знаку параметра  $S'_H$  і не залежить від величини його зміни. Так, при збільшенні параметра з +1 % до +10 % поточне значення потоку випромінювання залишається сталим  $\Phi_x=9.998654 \cdot 10^{-4}$  Вт, а при зміні параметра в межах від -1 % до -10 % значення  $\Phi_x=1.000135 \cdot 10^{-3}$  Вт. Перевагою цього є те, що можна проводити меншу кількість циклів вимірювань, а недоліком – другий підхід потребує більш частого метрологічного контролю параметрів ФП ніж перший.

При аналізі запропонованих підходів особливий інтерес має дослідження впливу величини нормованого потоку на кінцевий результат. Було виявлено, що другий підхід менш чутливий до зменшення величини нормованого потоку випромінювання. Таким чином, збільшення різниці між значеннями контрольованою і нормованої величинами не призводить до істотного збільшення віднос-

ної похибки як при першому підході. Так, зменшення нормованої величини потоку випромінювання  $\Phi_0$  з 0,8 мВт до 0,2 мВт призводить до збільшення відносної похибки при першому підході з  $0,75 \cdot 10^{-3} \%$  до  $0,003 \%$ . А при другому підході таке зменшення значення нормованої величини потоку майже не вплине на результат і значення відносної похибки  $\delta$  неістотно збільшиться з  $0,02 \cdot 10^{-3} \%$  до  $0,03 \cdot 10^{-3} \%$ .

Таким чином, отримані результати обробки багатократних вимірювань по двом підходам дозволяють стверджувати про перспективність другого підходу, оскільки він забезпечує:

а) прийнятну відносну похибку, що лежить в межах від  $0,001 \%$  до  $0,003 \%$ ;  
б) використання не високих потужностей джерела каліброваного випромінювання для формування каліброваного потоку випромінювання, тобто величина нормованого потоку випромінювання не прив'язана до величини контрольованого потоку.

в) незалежність від величини відхилень параметра  $S'_H$ , проте це вимагає більш частого метрологічного контролю.

Такі висновки можна вважати доцільними з практичної точки зору, оскільки дозволяють обґрунтувати застосування МНВ при багатократних вимірювань за двома підходами у різних галузях промисловості, де потрібно здійснювати вимірювальний контроль з високою точністю. Крім того, завдяки виключенню впливу на результат вимірювань зміни параметрів функції перетворення фотоприймача стає можливим здійснювати, за необхідністю, його заміну на однотипні і на дешевій елементній базі (при невисоких вимогах до стабільності елементів). Також, при застосування другого підходу стає можливим вимірювання контрольованого потоку  $\Phi_x$  великої величини без накладання вимог до високих потужностей джерела каліброваного випромінювання.

З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати, що МНВ при багатократних вимірюваннях за двома підходами дозволяють підвищити точність вимірювання при нелінійній і нестабільній ФП, що є одним з їхніх переваг. Однак неможливо не відмітити, що такі високі результати по точності отримуються у випадку, коли за час проведення кожного циклу вимірювань зміни параметрів залишаються сталими. Крім того, МНВ притаманна методична похибка вимірювання, що обумовлена похибкою відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень.

## 7. Висновки

1. Розроблені математичні моделі багатократних вимірювань при логарифмічній функції перетворення по двом підходам, які описують стан вимірювального каналу в часі. Ці особливості в обробці даних проявляються в отриманні результату високої точності за рахунок зменшення випадкової складової похибки і виключення впливу систематичної складової похибки, викликаною нестабільністю параметрів ФП (під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів). Крім того, при застосуванні методів надлишкових вимірювань немає необхідності проводити лі-

неаризацію нелінійної ФП, що дозволяє працювати на всьому робочому діапазоні без розбивки на лінійні ділянки. Завдяки цьому можна безпосередньо обробляти великі масиви даних при логарифмічній функції перетворення.

2. Проведене комп'ютерне моделювання методу надлишкових вимірювань по двом підходам, які відрізняються між собою порядком обробки отриманих результатів проміжних вимірювань. Дослідження проводилися при різних значеннях відхилень (від  $\pm 1,0\%$  до  $\pm 10,0\%$ ) параметрів нелінійної функції перетворення від їх номінальних значень. Встановлено, що поточне значення потоку випромінювання  $\Phi_x$  залежить лише від знаку параметра  $S'_H$  і не залежить від величини його зміни. Так, при збільшенні параметра з  $+1\%$  до  $+10\%$  поточне значення потоку випромінювання залишається сталим  $\Phi_x = 9.998654 \cdot 10^{-4}$  Вт, а при зміні параметра в межах від  $-1\%$  до  $-10\%$  значення контрольованого потоку  $\Phi_x$  становитиме  $\Phi_x = 1.000135 \cdot 10^{-3}$  Вт.

При моделюванні також були проведені дослідження впливу величини нормованого за значенням потоку випромінювання на результат. Було встановлено, що другий підхід менш чутливий до зменшення величини нормованого потоку випромінювання. Так, при зменшенні значення потоку  $\Phi_0$  з  $0,8$  мВт до  $0,2$  мВт значення відносної похибки  $\delta$  неістотно збільшиться з  $0,02 \cdot 10^{-3}\%$  до  $0,03 \cdot 10^{-3}\%$ , а при першому підході це призведе до збільшення з  $0,75 \cdot 10^{-3}\%$  до  $0,003\%$ .

3. Проведено порівняльний аналіз похибок вимірювання обох підходів. Було встановлено, що більш точним виявився другий підхід, який забезпечує відносну похибку вимірювання в діапазоні від  $0,001\%$  до  $0,003\%$  (в залежності від величини нормованого потоку).

## Література

1. Shcherban', V., Melnyk, G., Sholudko, M., Kalashnyk, V. (2018). Warp yarn tension during fabric formation. *Fibres and Textiles*, 2, 97–104. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2018/2/VaT\\_2018\\_2\\_16.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2018/2/VaT_2018_2_16.pdf)
2. Shcherban', V., Melnyk, G., Sholudko, M., Kolysko, O., Kalashnyk, V. (2018). Yarn tension while knitting textile fabric. *Fibres and Textiles*, 3, 74–83. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2018/3/VaT\\_2018\\_3\\_12.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2018/3/VaT_2018_3_12.pdf)
3. Пронин, А. Н., Сапожникова, К. В., Тайманов, Р. Е. (2015). Достоверность измерительной информации в системах управления. *Проблемы и решения. Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 9 (3), 32–37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dostovernost-izmeritelnoy-informatsii-v-sistemah-upravleniya-problemy-i-resheniya/viewer>
4. Генкина, Р. И., Лукашов, Ю. Е., Маликова, Х. О., Осока, И. В., Сквородников, В. А. (2010). Говорим ВНИИМС, подразумеваем – законодательная метрология! *Законодательная и прикладная метрология*, 5, 8–15.
5. Рішан, О. Й., Матвієнко, Н. В. (2014). Структурні методи підвищення точності вимірювань в автоматичних системах дозування сипких матеріалів з використанням магнітопружних первинних вимірювальних перетворювачів зусилля. *Науково-технічна інформація*, 4, 47–51. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/NTI\\_2014\\_4\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/NTI_2014_4_11)

6. Яненко, О. П., Михайленко, С. В., Ліснічук, А. С. (2014). Радіометричний модуляційний вимірювач інтенсивності оптичного випромінювання. Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер.: Радіотехніка. Радиоапаратобудування, 56, 96–101. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_rr\\_2014\\_56\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2014_56_11)
7. Munoz Zurita, A. L., Campos, J., Ferrero, A., Pons, A. (2012). Photodiodes as Optical Radiation Measurement Standards. Photodiodes - From Fundamentals to Applications. doi: <https://doi.org/10.5772/51462>
8. Shcherban', V., Makarenko, J., Petko, A., Melnyk, G., Shcherban', Y., Shchutska, H. (2020). Computer implementation of a recursion algorithm for determining the tension of a thread on technological equipment based on the derived mathematical dependences. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (1 (104)), 41–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198286>
9. Su, Z., Liang, X. (2011). Computation and analysis on the Volt-Ampere characteristics of photodiode sensor under the certain conditions. 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing. doi: <https://doi.org/10.1109/cisp.2011.6100750>
10. Shcherban', V., Melnyk, G., Sholudko, M., Kolysko, O., Kalashnyk, V. (2019). Improvement of structure and technology of manufacture of multilayer technical fabric. Fibres and Textiles, 2, 54–63. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2019/2/VaT\\_2019\\_2\\_10.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2019/2/VaT_2019_2_10.pdf)
11. Черепанська, І. Ю., Безвесільна, О. М., Сазонов, А. Ю. (2016). До питання підвищення точності кутових вимірювань гоніометричними системами. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки, 1 (76), 92–100. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2016\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2016_1_12)
12. Haridy, M. A., Aslam, A. (2018). Optical Radiation Metrology and Uncertainty. Metrology. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.75205>
13. Shcherban', V., Makarenko, J., Melnyk, G., Shcherban', Y., Petko, A., Kirichenko, A. (2019). Effect of the yarn structure on the tension degree when interacting with high-curved guide. Fibres and Textiles, 4, 59–68. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2019/4/VaT\\_2019\\_4\\_8.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2019/4/VaT_2019_4_8.pdf)
14. Fan, Z., Gao, R. X., Wang, P., Kazmer, D. O. (2016). Multi-sensor data fusion for improved measurement accuracy in injection molding. 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. doi: <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2016.7520465>
15. Orozco, L. (2011). Optimizing Precision Photodiode Sensor Circuit Design. Analog devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/Optimizing-Precision-Photodiode-Sensor-Circuit-Design-MS-2624.pdf>
16. Lewis, G., Merken, P., Vandewal, M. (2018). Enhanced Accuracy of CMOS Smart Temperature Sensors by Nonlinear Curvature Correction. Sensors, 18 (12), 4087. doi: <https://doi.org/10.3390/s18124087>
17. Shcherban, V., Korogod, G., Chaban, V., Kolysko, O., Shcherban', Y., Shchutska, G. (2019). Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (5 (98)), 16–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160830>

18. Кондратов, В. Т. (2009). Теория избыточных измерений: универсальное уравнение измерений. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 5, 116–129. URL: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2009\\_5/zmist.files/23kon.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2009_5/zmist.files/23kon.pdf)

19. Кондратов, В. Т. (2010). Методы избыточных измерений: основные определения и классификация. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 3, 220–232. URL: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2010\\_3/47kon.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2010_3/47kon.pdf)

20. Соболева, Н. А., Меламид, А. Е. (1974). Фотоэлектронные приборы. Москва: Высшая школа, 376.

21. Кондратов, В. Т. (2007). Математические модели избыточных измерений I-го, II-го и III-го родов. Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики: научные труды X-й Юбилейной Международ. науч.-техн. конф. М.: МГУ ПИ, 134–143.

22. Кондратов, В. Т. (2015). Проблемы обработки результатов многократных измерительных преобразований физической величины. Тезисы докладов 15-й междунар. науч.-техн. конф. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-15 2015). Одеса, 9–12.

For reading only