

## Комп'ютерні компоненти при дослідженні логарифмічної функції перетворення по розширенню діапазону високоточних вимірювань

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

Проведеними дослідженнями впливу нормованих за значеннями потоків випромінювання на результат вимірювання було виявлено найбільш впливовий. Доведено, що більший вплив на відносну похибку вимірювання справляє величина нормованого потоку  $\Phi_0$  ніж  $\Delta\Phi_0$ . Завдяки цьому стає можливим дослідити співвідношення між контрольованим  $\Phi_x$  та нормованим потоком  $\Phi_0$ . Експериментальними дослідженнями підтверджено, що за рахунок збільшення в тричі нормованого за значенням потоку  $\Phi_0$  відносно контрольованого потоку  $\Phi_x$ , стає можливим підвищити точність вимірювання в широкому діапазоні. Зокрема встановлено, що при значенні потоку  $\Phi_0=1,06 \cdot 10^{-3}$  Вт стає можливим вимірювання з відносною похибкою, що складає тисячні відсотка, контрольований потік в ширшому діапазоні  $\Phi_x=(0,16 \cdot 10^{-3} \div 0,97 \cdot 10^{-3})$  Вт. Показано вплив похибки відтворення на результат вимірювання при умові збільшення в тричі нормованого за значенням потоку  $\Phi_0$  відносно контрольованого потоку  $\Phi_x$ . Встановлено, що збільшення похибки відтворення нормованих потоків випромінювання на 1 порядок призводить до звуження діапазону, в якому значення відносної похибки прямує до нуля. Показано, що при відсутності збільшення в тричі нормованого потоку  $\Phi_0$ , збільшення похибки відтворення нормованих потоків на 1 порядок призводить до поодиноких випадків зменшення відносної похибки до величин малого порядку. Останнє, до речі, стосується випадків, коли виконується умова співвідношення між нормованим потоком  $\Phi_0$  і контрольованим  $\Phi_x$ , як 3 до 1. Показано, що похибка відтворення темного потоку не чинить вплив на результат вимірювання.

Таким чином, є підстави стверджувати про можливість розширення діапазону вимірювання, при якому значення відносної похибки складає тисячні відсотка, навіть за 1 цикл вимірювання.

Ключові слова: надлишкові методи, рівняння вимірювань, підвищення точності, нормовані за значенням величини, похибки відтворення величин.

### 1. Вступ

Як відомо, точність є однією з найважливіших характеристик вимірювань будь-якого виробничого або технологічного процесу. Тому дотримання високої точності вимірювань на кожному етапі виробництва є першочерговою задачею, адже це являється запорукою виготовлення якісної продукції або отримання достовірної інформації про стан чи величину контрольованого параметру [1–3]. Крім того, особливу увагу слід приділити складним виробничим процесам, де для визначення контрольованої величини необхідно вимірювати декілька вели-

чин на всьому їхньому діапазоні і від точності вимірювання кожної величини залежить кінцева точність вимірювань. Причому, треба враховувати як інструментальну похибку самого засобу вимірювання, так і методичну похибку методу вимірювання, що також впливають на кінцевий результат. То ж, на вдосконалення методів і засобів вимірювання, а також на можливість спрямованого регулювання параметрами для покращення отриманого результату направлені наукові роботи, наприклад [4, 5]. Крім того, у випадках, коли функція перетворення сенсора має нелінійний характер, то виникає потреба у додаткових заходах по її лінеаризації на всьому її діапазоні, що також впливає на точність і варіативність засобу вимірювання. То ж, чим точніше буде виміряна кожна величина, тим точніше буде сумарний результат вимірювання. Отже, виникає необхідність у підвищенні точності результатів вимірювань технологічних параметрів, яка була б порівнянна з точністю зразкових мір.

Таким чином, актуальними слід вважати дослідження, що направлені на підвищення точності вимірювання в широкому діапазоні вимірювань при нелінійній функції перетворення, а також при наявності похибки відтворення нормованих величин.

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

Вимоги, які висувуються до підвищення точності в широкому діапазоні вимірювань, спонукають до пошуку шляхів для їх вирішення. Так, в роботі [6] були наведені основні рекомендації для зменшення впливу додаткових похибок, що впливають на результат вимірювання, а також встановлені межі їх значень. В роботі [7] підвищення точності відбувалося шляхом введення поправок, які виключають систематичні похибки вимірювального каналу. Однак дана методика передбачає необхідність вхідної інформації у вигляді параметрів каналу, які необхідно визначити рекомендованим чином. В роботі [8] підвищення точності вимірювання температури досягалося за рахунок зменшення методичної похибки від тепловідведення та високої точності градуювальної характеристики. Однак слід зазначити, що в даній роботі значення температури градуювальної характеристики прив'язані до інтерференційних мінімумів двозаломлення чутливого елемента термоперетворювача. Це означає, що у випадку його заміни необхідно підбирати ідентичні термоперетворювачі, що викликає певні труднощі при налагодженні чи проведенні додаткового калібрування. Крім цього, не було зазначено вплив темного струму. Для вирішення цієї задачі в роботі [9] було запропоновано використання радіометричного модульного перетворювача. Показано, що підвищення точності і чутливості вимірювання відбувалося завдяки зменшенню впливу темного струму, а також компенсації власних шумів шляхом комутації сигналів опорного і вимірюваного фотодіодів та відповідній їх обробці. В роботі [10] підвищення точності вимірювання квадратним детектором InGaAs досягалося шляхом поєднання методу нескінченного інтеграла з методом Больцмана, що мають протилежні характеристики похибки. В роботі [11] для зменшення перехресних завад було запропоновано рекурсивний метод, заснований на отриманні індивідуальних значень опорів резисторів в масиві резистивних датчиків. Однак в даних роботах не наведені шляхи розширення діапазону при нелінійній функції

перетворення. Для розширення діапазону і зменшення шуму в роботі [12] було запропоноване використання запрограмованих коефіцієнтів підсилення в підсилювачі при фотодіоді. В роботі [13] для цього був запропонований покращений алгоритм, який розширює лінійний діапазон вимірювання без зниження точності вимірювання. Питаннями підвищення точності за рахунок підвищення чутливості були розглянуті в роботі [14]. В даній роботі застосування методу фазочутливого виявлення для кремнієвих лавинних фотодіодів дозволило покращити відношення сигнал/шум, а також розширити діапазон вимірювання в сторону його початкових значень. Підвищення чутливості в роботі [15] досягалося завдяки використанню аргонного лазера з заданою потужністю, а в роботі [16] – завдяки використанню фотодетектору на основі гетеропереходу графен/кремній (G/Si). Однак тут не враховувалися нелінійність функції перетворення фотоперетворювача, що, в свою чергу, спричиняє появу похибки від нелінійності або потребує роботи на лінійних ділянках вхідної характеристики сенсора. Для подолання цієї проблеми в роботі [17] підвищення точності датчика досягалося за рахунок корекції нелінійної кривизни шляхом вимірювання поправки на нелінійну кривизну при декількох еталонних температурах. В роботі [18] було запропоновано застосування методу адаптивного нейроно-невизначеного припущення (ANIS), завдяки якому стає можливим підвищити точність вимірювання за рахунок встановлення високої здатності до нелінійної апроксимації. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з нестабільністю параметрів фотодіоду, а також залежність від таблиць відповідності для кожного окремого датчика. В роботі [19] підвищення точності датчика з нелінійною функцією досягалося шляхом лінеаризації кривої за рахунок використання комплементарного металооксидного напівпровідника.

Незважаючи на практичну значущість отриманих результатів, не розглянуто в достатній мірі розширення діапазону високоточних вимірювання при нелінійній та нестабільній функції перетворення сенсору.

Доцільність використання методів надлишкових вимірювань при нелінійній та нестабільній функції перетворення, підтверджується підвищенням точності, як це зазначено в роботах [20, 21]. Це стає можливим завдяки застосуванню представленої математичній моделі, в якій, завдяки обробці отриманих результатів згідно з рівнянь надлишкових вимірювань, виключається вплив адитивної і мультиплікативної складових похибки вимірювання. Однак в даних роботах не було досліджено вплив на розширення діапазону високоточних вимірювання нормованих величин, а також вплив похибки відтворення нормованих потоків.

Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність у дослідженнях впливу нормованих величин та їх співвідношення з контрольованою величиною на розширення діапазону вимірювань з високою (прецизійною) точністю обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є визначення характеру впливу нормованих величин на результат вимірювання, а також знаходження такого співвідношення між контрольованою та нормованою величинами, при якому забезпечується зниження похи-

бки вимірювань при нелінійній функції перетворення в широкому діапазоні. Це дасть можливість значно розширити діапазон вимірювань, при якому відносна похибка має величину малого порядку, тобто дозволить проводити весь технологічний процес від його початку до кінця з високою (прецизійною) точністю.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

– провести комп'ютерне моделювання представленої математичні моделі при різних значеннях нормованих величин та при змінах параметрів функції перетворення в межах  $\pm 1,0$  %;

– знайти таке співвідношення між значеннями контрольованої величини та найбільш впливовою з нормованих, при якому забезпечується розширення діапазону вимірювань з найменшою похибкою;

– провести комп'ютерне моделювання впливу похибок відтворення, як нормованих за значенням величин, так і ненормованих, на результат вимірювання за умови забезпечення знайденого співвідношення між контрольованою та найбільш впливовою величинами.

#### **4. Матеріали та методи дослідження комп'ютерного моделювання логарифмічної функції перетворення**

##### **4.1. Досліджувані матеріали і засоби моделювання**

Для дослідження впливу значень нормованих величин на похибку вимірювання, а також встановлення закономірності між вимірювальною величиною і нормованою, в якості датчика було обрано кремнієвий фотодіод ФД307 (Україна). Згідно з паспортних даних фотодіод ФД307 має наступні параметри: темновий струм фотодіода  $I_s=0,003$  мкА, струмова (монохромова) 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 Mathcad15.0 (США) та пакет аналізу даних Excel (США).

##### **4.2. Метод дослідження надлишкових вимірювань**

Як відомо [22], функція перетворення фотодіода, що працює в фотогальванічному режимі (режим 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.

Після введення наступних змін:  $kT / q = S'_H$  (де  $S'_H$  – крутість перетворення),

а також  $\frac{S'_I}{I_S} = \frac{1}{\Phi_T}$  (де  $\Phi_T$  – темновий потік), вираз (1) прийме спрощений вид:

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

Слід зазначити, що в рівнянні величин (2) параметри  $U'_{RM}$  і  $S'_H$  вказані зі штрихами, тобто ці значення не ідеальні і при реальних вимірюваннях мають певні відхилення від своїх номінальних значень. В результаті чого, при застосуванні ненадлишкових методів буде мати місце систематична складова похибки, що обумовлена нестабільністю параметрів функції перетворення. Крім того, нелінійна функція перетворення підлягає лінеаризації, що також стає джерелом похибки від нелінійності, або підлягає розподіленню її на лінійні ділянки, що звужує робочий діапазон вимірювання. Для вирішення задач по зменшенню похибки від нелінійності і нестабільності функції перетворення у роботі в якості методу дослідження було обрано метод надлишкових вимірювань (МНВ).

Як відомо [24–26], для реалізації надлишкових вимірювань складається математична модель у вигляді системи рівнянь, що описує такти вимірювання, розподілені в часі. Визначення тактів вимірювання здійснювалось за наступною методикою. Спочатку визначається кількість змінних в представленій ФП, на основі якої формується кількість тактів вимірювання. Далі за допомогою стандартних джерел з нормованими характеристиками формуються нормовані за значенням потоки випромінювання  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$ , які і вимірюються. Таким чином, в кожному такті виконуються вимірювання контрольованої величини  $\Phi_x$ , нормованих за значенням потоків випромінювання  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$  або їх комбінації. Як видно з рівняння (2), логарифмічна ФП має 4 змінні. Отже, необхідно сформулювати 4 такти вимірювання, що будуть описуватися 4 рівняннями величин.

Представимо математичну модель у вигляді наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} U'_{R1} = S'_H \ln(\Phi_0 / \Phi_T + 1) - U'_{RM}, \\ U'_{R2} = S'_H \ln((\Phi_0 + \Delta\Phi_0) / \Phi_T + 1) - U'_{RM}, \\ U'_{R3} = S'_H \ln((\Phi_x) / \Phi_T + 1) - U'_{RM}, \\ U'_{R4} = S'_H \ln((\Phi_x + \Delta\Phi_0) / \Phi_T + 1) - U'_{RM}, \end{cases} \quad (3)$$

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

Для рішення даної системи відносно контрольованої величини  $\Phi_x$  знайдемо різниці напруг ( $U'_{R4} - U'_{R3}$ ) і ( $U'_{R2} - U'_{R1}$ ) та виразимо їх через параметр  $S'_H$ . В результаті чого отримаємо наступне рівняння величин:

$$\frac{U'_{R2} - U'_{R1}}{\ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + 1\right)} = \frac{U'_{R4} - U'_{R3}}{\ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_x + \Phi_T} + 1\right)}. \quad (4)$$

Як видно з отриманої рівності (4), величина нормованого потоку  $\Phi_0$  стоїть у певному співвідношенні до  $\Phi_x$ . То ж, є підстави більш детально розглянути це співвідношення. Для цього спочатку необхідно отримати рівняння надлишкових вимірювань контрольованого потоку. Тож, в результаті розв'язання рівності (4) було отримано наступний вираз:

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

В отримане рівняння (5) не входять параметри  $U'_{RM}$  і  $S'_H$ , тобто результат вимірювання контрольованої величини  $\Phi_x$  не залежить від параметрів ФП та їх відхилень від номінальних значень. Таким чином, МНВ сприяють виключенню систематичної складової похибки, що обумовлена нестабільністю параметрів функції перетворення, а також дозволяють працювати за результатами вимірювання без додаткової лінеаризації логарифмічної ФП. Слід зазначити, що такий результат досягається, якщо за час проведення циклу вимірювань, що реалізує запропоновані 4 такти вимірювання, зміни параметрів залишаються сталими.

## 5. Результати комп'ютерного моделювання МНВ при логарифмічній функції перетворення

### 5.1. Комп'ютерне моделювання по визначенню впливу нормованих потоків на результат вимірювання

На основі запропонованої вище заміни ( $S/I_s = 1/\Phi_T$ ) було отримано значення темнового потоку  $\Phi_T = 1,111 \cdot 10^{-8}$  Вт. Робочий діапазон контрольованого потоку випромінювання було задано в межах  $\Phi_x = (0,90 \cdot 10^{-5} \div 0,97 \cdot 10^{-3})$  Вт. На основі рівняння (4) було задано діапазон нормованого потоку  $\Phi_0$  в межах  $(0,80 \cdot 10^{-5} \div 0,96 \cdot 10^{-3})$  Вт. Для проведення комп'ютерного моделювання кожен з цих обох діапазонів був розділений на 14 кроків. Дослідження також проводилися і при трьох значеннях нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$ , що становлять відповідно  $0,001 \cdot 10^{-3}$  Вт,  $0,01 \cdot 10^{-3}$  Вт та  $0,1 \cdot 10^{-3}$  Вт. Значення похибки відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$  було обрано  $\Delta_\Phi = 0,1 \cdot 10^{-6}$  Вт. Крім того, були задані межі змін для параметрів  $U'_{RM}$  і  $S'_H$ , що лежать в рамках  $\pm 1,0$  %.

В результаті проведення комп'ютерного моделювання в середовищі Mathcad15.0 були отримані наступні дані відносної похибки вимірювання при різних значеннях нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$ , які представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Відносні похибки вимірювань при різних значеннях нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$ , (%)

$\Delta\Phi_0=0,001 \cdot 10^{-3}$ Вт														
потік	$\Phi_{01}$	$\Phi_{02}$	$\Phi_{03}$	$\Phi_{04}$	$\Phi_{05}$	$\Phi_{06}$	$\Phi_{07}$	$\Phi_{08}$	$\Phi_{09}$	$\Phi_{010}$	$\Phi_{011}$	$\Phi_{012}$	$\Phi_{013}$	$\Phi_{014}$
$\Phi_{x1}$	0,34	0,43	0,46	0,48	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52
$\Phi_{x2}$	0,13	0,04	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$\Phi_{x3}$	0,15	0,07	0,04	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
$\Phi_{x4}$	0,16	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x5}$	0,17	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x6}$	0,17	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x7}$	0,17	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x8}$	0,18	0,09	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x9}$	0,18	0,09	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x10}$	0,18	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x11}$	0,18	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x12}$	0,18	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x13}$	0,18	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x14}$	0,18	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
$\Delta\Phi_0=0,01 \cdot 10^{-3}$ Вт														
$\Phi_{x1}$	0,17	0,28	0,32	0,35	0,36	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40
$\Phi_{x2}$	0,13	0,05	0,01	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$\Phi_{x3}$	0,15	0,07	0,04	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,01	0,01	0,02
$\Phi_{x4}$	0,16	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x5}$	0,16	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x6}$	0,16	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x7}$	0,17	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x8}$	0,17	0,09	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x9}$	0,17	0,09	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x10}$	0,17	0,09	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x11}$	0,17	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x12}$	0,17	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x13}$	0,17	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x14}$	0,17	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
$\Delta\Phi_0=0,1 \cdot 10^{-3}$ Вт														
$\Phi_{x1}$	0,15	0,03	0,02	0,05	0,07	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13
$\Phi_{x2}$	0,12	0,06	0,04	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$\Phi_{x3}$	0,12	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x4}$	0,12	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x5}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x6}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x7}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x8}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x9}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x10}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x11}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x12}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	<b>0,00</b>
$\Phi_{x13}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
$\Phi_{x14}$	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01

Слід зауважити, що табличні значення відносних похибок вимірювання не мають нульового значення, а складають величини малого порядку (тисячні відсотка).

З наведених даних (табл. 1) видно, що більший вплив на похибку вимірювання справляє величина нормованого потоку  $\Phi_0$  ніж  $\Delta\Phi_0$ . Так, зміна на 2 порядки значення нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$  суттєво не впливає на результат. Однак слід зауважити, що все ж найкращі результати по точності серед представлених 3-х значень  $\Delta\Phi_0$  були отримані при  $\Delta\Phi_0=0,01\cdot 10^{-3}$  Вт.

## **5. 2. Комп'ютерне моделювання по визначенню співвідношення між нормованим і контрольованим потоками**

Як видно з даних, які були наведені в табл. 1, між контрольованим потоком  $\Phi_x$  і нормованим  $\Phi_0$  спостерігається певна закономірність. Для її визначення було використано пакет аналізу даних Excel для нелінійної функції. Використовуючи опцію пошуку рішення, було знайдено оптимальне значення  $\Phi_0$ , при якому виконується близькість до нуля значення похибки вимірювання. Таким чином було знайдено співвідношення між  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , що складає 3:1. Отже, збільшення в 3 рази значення нормованого потоку  $\Phi_0$  відносно контрольованого потоку  $\Phi_x$  дозволить збільшити діапазон вимірювань, при якому похибка буде мати величину малого порядку (навіть за 1 цикл вимірювання).

Комп'ютерне моделювання проводилося при попередніх даних як і в п. 5. 1, але вже при збільшеному в 3 рази потоку  $\Phi_0$  відносно потоку  $\Phi_x$ . Дослідження також проводилося і при різних значеннях нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$ . В результаті були отримані наступні значення відносних похибок, які представлені в табл. 2.

Слід зауважити, що табличні значення відносних похибок вимірювання не мають нульового значення, а складають величини малого порядку (тисячні відсотка).

Як видно з табличних даних (табл. 2), при співвідношенні значень між потоками  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , що складає 3:1, стає можливим збільшити діапазон вимірювань, при якому похибка має величину малого порядку. Також слід зауважити, що зміна на 2 порядки значення нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$  суттєво не впливає на результат вимірювання. Однак, було встановлено, що оптимальним є значення  $\Delta\Phi_0=0,01\cdot 10^{-3}$  Вт. В цьому випадку при значеннях потоку  $\Phi_0=1,06\cdot 10^{-3}$  Вт стає можливим вимірювати з відносною похибкою, що складає тисячні відсотка, контрольований потік в ширшому діапазоні  $\Phi_x=(0,16\cdot 10^{-3}\div 0,97\cdot 10^{-3})$  Вт.





### 5. 3. Комп'ютерне моделювання впливу похибок відтворення при умові забезпечення знайденого співвідношення між величинами

З практичної точки зору представляє інтерес вплив на результат вимірювання підвищення похибки відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання  $\Phi_0$  і  $\Delta\Phi_0$ . Отже, було проведено комп'ютерне моделювання при збільшенні на один порядок похибки відтворення нормованого потоку з  $\Delta\phi=0,1\cdot 10^{-6}$  Вт до  $\Delta\phi=0,1\cdot 10^{-5}$  Вт, а також при умові співвідношенні значень між потоками  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , що складає 3:1. В результаті були отримані наступні значення відносних похибок, які представлені в табл. 3.

Слід зауважити, що табличні значення відносних похибок вимірювання не мають нульового значення, а складають величини малого порядку (тисячні відсотка).

Як видно з табличних даних (табл. 3), збільшення похибки відтворення нормованих за значенням потоків випромінювання призводить до звуження діапазону, в якому забезпечується відносна похибка вимірювання малого порядку. В цьому випадку також, як і в попередніх випадках, оптимальним є значення нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$ , що складає  $0,1\cdot 10^{-3}$  Вт.

Було розглянуто випадок, коли не було проведено збільшення в 3 рази нормованого потоку  $\Phi_0$ , але похибка відтворення нормованих потоків була збільшена на 1 порядок. Оскільки значення нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$  чинить незначний вплив на результат, то було обрано значення потоку  $\Delta\Phi_0$ , що складає 0,01 мВт. Результати такого моделювання представлено в табл. 4.

Таким чином, без збільшення нормованого потоку  $\Phi_0$  втричі, але при збільшенні похибки відтворення нормованих потоків на 1 порядок, призводить лише до поодиноких випадків зменшення відносної похибки до величин малого порядку (табл. 4). Причому, це виявляється, коли між  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$  є співвідношення, як 3 до 1. Однак в такому випадку необхідне знання поточного (прогнозованого) значення контрольованого потоку, що є не завжди відомим.

Слід зауважити, що табличні значення відносних похибок вимірювання не мають нульового значення, а складають величини малого порядку (тисячні відсотка).

Подальше збільшення похибки відтворення нормованих потоків на 2 порядки з  $\Delta\phi=0,1\cdot 10^{-6}$  Вт до  $\Delta\phi=0,1\cdot 10^{-4}$  Вт призводить до значного погіршення результатів, а особливо при малих значеннях контрольованої величини. Крім цього, діапазон стає ще вужчим і переміщується в область високих значень контрольованої і нормованої величин. Однак найкращим в цьому випадку є значення нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$ , що складає  $0,01\cdot 10^{-3}$  Вт, що забезпечує відносну похибку вимірювань малого порядку при співвідношенні значень  $\Phi_0=(2,08\cdot 10^{-3}\div 2,89\cdot 10^{-3})$  Вт та відповідних значень  $\Phi_x=(0,67\cdot 10^{-3}\div 0,97\cdot 10^{-3})$  Вт.

При дослідженні було розглянуто випадок при одночасному збільшенні на 1 порядок похибки відтворення нормованих потоків і при збільшенні похибки відтворення темного потоку  $\Phi_T$  (в межах  $\pm 10\%$ ). Комп'ютерне моделювання показало незалежність отриманого результату від впливу похибки відтворення темного потоку, тобто результати залишились такими, як в табл. 3.

Таблиця 3

Відносні похибки вимірювань при різних значеннях нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$ , (%)

$\Delta\Phi_0=0,001 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$														
ПОТІК	$\Phi_{01}$	$\Phi_{02}$	$\Phi_{03}$	$\Phi_{04}$	$\Phi_{05}$	$\Phi_{06}$	$\Phi_{07}$	$\Phi_{08}$	$\Phi_{09}$	$\Phi_{010}$	$\Phi_{011}$	$\Phi_{012}$	$\Phi_{013}$	$\Phi_{014}$
$\Phi_{x1}$	4,59	4,90	5,02	5,08	5,12	5,15	5,16	5,18	5,19	5,20	5,20	5,21	5,22	5,22
$\Phi_{x2}$	0,03	0,26	0,37	0,42	0,46	0,48	0,50	0,51	0,52	0,53	0,53	0,54	0,54	0,55
$\Phi_{x3}$	0,31	0,02	0,09	0,14	0,17	0,20	0,21	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27
$\Phi_{x4}$	0,41	0,12	0,02	0,04	0,07	0,10	0,11	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16
$\Phi_{x5}$	0,46	0,17	0,07	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11
$\Phi_{x6}$	0,49	0,21	0,10	0,04	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08
$\Phi_{x7}$	0,51	0,23	0,12	0,07	0,03	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06
$\Phi_{x8}$	0,53	0,24	0,14	0,08	0,05	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
$\Phi_{x9}$	0,54	0,25	0,15	0,09	0,06	0,04	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
$\Phi_{x10}$	0,55	0,26	0,16	0,10	0,07	0,05	0,03	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,02
$\Phi_{x11}$	0,55	0,27	0,16	0,11	0,08	0,05	0,04	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,01
$\Phi_{x12}$	0,56	0,28	0,17	0,12	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x13}$	0,56	0,28	0,18	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x14}$	0,57	0,29	0,18	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Delta\Phi_0=0,01 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$														
$\Phi_{x1}$	3,28	3,69	3,84	3,92	3,97	4,00	4,02	4,04	4,05	4,07	4,08	4,08	4,09	4,10
$\Phi_{x2}$	0,07	0,23	0,34	0,39	0,43	0,45	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52
$\Phi_{x3}$	0,32	0,03	0,07	0,13	0,17	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26
$\Phi_{x4}$	0,41	0,13	0,02	0,03	0,07	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16
$\Phi_{x5}$	0,45	0,18	0,07	0,02	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11
$\Phi_{x6}$	0,48	0,21	0,10	0,05	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08
$\Phi_{x7}$	0,50	0,23	0,12	0,07	0,03	0,01	<b>0,00</b>	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06
$\Phi_{x8}$	0,52	0,24	0,14	0,08	0,05	0,03	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
$\Phi_{x9}$	0,53	0,25	0,15	0,09	0,06	0,04	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
$\Phi_{x10}$	0,54	0,26	0,16	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,02
$\Phi_{x11}$	0,54	0,27	0,16	0,11	0,08	0,05	0,04	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,01
$\Phi_{x12}$	0,55	0,27	0,17	0,12	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x13}$	0,55	0,28	0,17	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x14}$	0,56	0,28	0,18	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Delta\Phi_0=0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$														
$\Phi_{x1}$	0,34	0,90	1,14	1,27	1,35	1,41	1,45	1,48	1,51	1,53	1,55	1,55	1,58	1,58
$\Phi_{x2}$	0,29	0,01	0,14	0,21	0,25	0,28	0,30	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,36	0,37
$\Phi_{x3}$	0,37	0,11	<b>0,00</b>	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21
$\Phi_{x4}$	0,41	0,16	0,06	<b>0,00</b>	0,03	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14
$\Phi_{x5}$	0,43	0,19	0,10	0,04	<b>0,00</b>	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10
$\Phi_{x6}$	0,45	0,21	0,12	0,06	0,03	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07
$\Phi_{x7}$	0,45	0,23	0,13	0,08	0,05	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
$\Phi_{x8}$	0,46	0,24	0,14	0,09	0,06	0,03	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08
$\Phi_{x9}$	0,47	0,24	0,15	0,01	0,07	0,04	0,03	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,02
$\Phi_{x10}$	0,47	0,25	0,16	0,11	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,01	0,02
$\Phi_{x11}$	0,47	0,25	0,16	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x12}$	0,48	0,26	0,17	0,12	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x13}$	0,48	0,26	0,17	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x14}$	0,48	0,26	0,17	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

Таблиця 4

Відносні похибки вимірювань при  $\Delta\Phi_0=0,01$  мВт, (%)

потік	$\Phi_{01}$	$\Phi_{02}$	$\Phi_{03}$	$\Phi_{04}$	$\Phi_{05}$	$\Phi_{06}$	$\Phi_{07}$	$\Phi_{08}$	$\Phi_{09}$	$\Phi_{010}$	$\Phi_{011}$	$\Phi_{012}$	$\Phi_{013}$	$\Phi_{014}$
$\Phi_{x1}$	1,67	2,77	3,20	3,43	3,57	3,67	3,74	3,79	3,84	3,87	3,90	3,92	3,94	3,96
$\Phi_{x2}$	1,25	0,45	0,13	0,03	0,14	0,21	0,26	0,30	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42
$\Phi_{x3}$	1,46	0,69	0,38	0,22	0,12	0,05	<b>0,00</b>	0,04	0,07	0,09	0,11	0,13	0,14	0,15
$\Phi_{x4}$	1,54	0,77	0,47	0,31	0,21	0,15	0,10	0,06	0,03	<b>0,00</b>	0,01	0,03	0,04	0,06
$\Phi_{x5}$	1,58	0,82	0,52	0,36	0,26	0,19	0,15	0,11	0,08	0,06	0,04	0,02	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
$\Phi_{x6}$	1,61	0,85	0,55	0,39	0,29	0,23	0,18	0,14	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03
$\Phi_{x7}$	1,63	0,87	0,57	0,41	0,31	0,25	0,20	0,16	0,13	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05
$\Phi_{x8}$	1,64	0,88	0,58	0,43	0,33	0,26	0,21	0,17	0,15	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06
$\Phi_{x9}$	1,65	0,89	0,59	0,44	0,34	0,27	0,22	0,19	0,16	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07
$\Phi_{x10}$	1,66	0,90	0,60	0,45	0,35	0,28	0,23	0,19	0,17	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08
$\Phi_{x11}$	1,66	0,91	0,61	0,45	0,35	0,29	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09
$\Phi_{x12}$	1,67	0,91	0,62	0,46	0,36	0,29	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09
$\Phi_{x13}$	1,67	0,92	0,62	0,46	0,36	0,30	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10
$\Phi_{x14}$	1,67	0,92	0,62	0,47	0,37	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10

#### 6. Обговорення результатів комп'ютерного моделювання впливу співвідношення між потоками на результат вимірювання

При дослідженні впливу нормованих величин на результат вимірювання, як витікає з отриманих результатів (табл. 1), було виявлено, що більший вплив справляє величина нормованого потоку  $\Phi_0$  ніж  $\Delta\Phi_0$ . Це обумовлено рівнянням величин (4), де величина нормованого потоку  $\Phi_0$  стоїть у певному співвідношенні до  $\Phi_x$ . Так, зміна величини нормованого потоку  $\Phi_0$  призводить до суттєвіших змін значень відносних похибки. Натомість зміна на 2 порядки значення нормованого потоку  $\Delta\Phi_0$  суттєво не впливає на результат. Вочевидь такий механізм впливу величини нормованого потоку  $\Phi_0$  є тим фактором регулювання процесу, завдяки якому можна впливати на відносну похибку вимірювання. Це не розходиться з практичними даними, що наведені в роботах [7, 9, 17], автори яких теж пов'язують вплив величин певних параметрів каналу (величина темного струму, введення поправок) на точність вимірювання.

Для доведення ствердження про критерії впливу величини нормованого потоку  $\Phi_0$  на діапазон високоточних вимірювань необхідно уважно його дослідити. При зіставленні отриманих значень відносних похибок була виявлена певна закономірність між контрольованою  $\Phi_x$  і нормованою величиною  $\Phi_0$ , при якій спостерігалось близькість до нуля даної похибки. Так, при значеннях потоку  $\Phi_0=0,56 \cdot 10^{-3}$  Вт і  $\Delta\Phi_0=0,1 \cdot 10^{-3}$  Вт стає можливим вимірювати з відносною похибкою, що складає тисячні відсотка, контрольований потік в ширшому діапазоні  $\Phi_x=(0,08 \cdot 10^{-3} \div 0,23 \cdot 10^{-3})$  Вт. При збільшеному значенні нормованого потоку  $\Phi_0$  спостерігалось розширення діапазону, в якому відносна похибка складає тисячні відсотка. Тож для виявлення закономірності між потоками  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , при якій спостерігається збільшення діапазону вимірювань контрольованої величини з високою точністю, був проведений комп'ютерний аналіз. В результаті такого

аналізу з використанням опції пошуку рішення було встановлено, що співвідношення між нормованим потоком  $\Phi_0$  і контрольованою величиною  $\Phi_x$  повинно становити як 3 до 1. Таким чином, дотримання співвідношення між нормованою  $\Phi_0$  і контрольованою величиною  $\Phi_x$  дає змогу отримати результат високої точності в широкому діапазоні значень. Про це свідчать результати досліджень, що наведені в табл. 2. Наприклад, при значеннях потоку  $\Phi_0=1,06 \cdot 10^{-3}$  Вт і  $\Delta\Phi_0=0,1 \cdot 10^{-3}$  Вт стає можливим вимірювати з відносною похибкою, що складає тисячні відсотка, контрольований потік в ширшому діапазоні  $\Phi_x=(0,16 \cdot 10^{-3} \div 0,97 \cdot 10^{-3})$  Вт. Тобто, при дотриманні співвідношення між нормованим потоком  $\Phi_0$  і контрольованою величиною  $\Phi_x$ , як 3 до 1, дає змогу більш ніж в 5 разів розширити діапазон вимірювання, в якому відносна похибка має величину малого порядку. Це означає, що врахування даного співвідношення між нормованим і контрольованим потоками відкриває можливість для ефективного регулювання діапазоном високоточного вимірювання. Це також не розходиться з висновками робіт [7, 17], автори яких теж пов'язують підвищення точності вимірювання з дотриманням встановлених поправок до параметрів.

Але, в той самий час, на похибку вимірювання чинить вплив і методична похибка. В цьому сенсі особливий інтерес має вплив запропонованого співвідношення між нормованим і контрольованим потоками на методичну похибку. Це обумовлено тим, що похибка відтворення нормованих потоків є складовою методичної похибки запропонованого методу надлишкових вимірювань. Дослідження проводилися при збільшенні даної похибки на 1 і на 2 порядки. Було встановлено, що збільшення похибки на 1 порядок при збільшенні нормованого потоку  $\Phi_0$  втричі відносно  $\Phi_x$ , призводить до звуження діапазону вимірювань, в якому значення відносної похибки прямує до нуля (табл. 3). Крім того, при початкових значеннях контрольованої величини відносна похибка приймає неприйнятні значення. Але, в той самий час, якщо ж не збільшувати нормований потік  $\Phi_0$  втричі відносно  $\Phi_x$ , то це призведе лише до поодиноких випадків зменшення відносної похибки до величин малого порядку (табл. 4). Слід зазначити, що в цьому випадку буде спостерігатися відношення між  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , як 3 до 1. Однак це накладає вимоги до знання поточного значення контрольованого потоку, що є не завжди відомим. Таким чином, отримані результати свідчать, що збільшення нормованого потоку  $\Phi_0$  втричі відносно  $\Phi_x$  є доцільним. Подальше збільшення похибки відтворення вже на 2 порядки стає прийнятним лише на дуже вузькому діапазоні малих значень відносної похибки і при великих значеннях контрольованої величини. Це обґрунтовується тим, що похибка відтворення нормованого потоку, в цьому випадку, стає спів розмірною за значенням з контрольованим потоком  $\Phi_x$  (особливо при малих значеннях потоку  $\Phi_x$ ). Таким чином, отримані результати, на відміну від результатів в [8], свідчать про вплив методичної похибки (похибки відтворення надлишкових потоків) не лише на точність вимірювання, а і на вимірювальний діапазон.

Слід зазначити, що на точність вимірювання чинить вплив і величина темного струму, як це показано і в роботі [9]. Тож, науковий інтерес має дослідження впливу похибки відтворення темного потоку. Комп'ютерне моделю-

вання проводилося при похибці відтворення темного потоку  $\Phi_T$  в межах  $\pm 10\%$ . Дослідження показало, що, при знайденому співвідношенні між потоками, а також при збільшенні похибки відтворення нормованих потоків на 1 порядок, похибка відтворення темного потоку не чинить вплив на результату вимірювання. Це, вочевидь, пояснюється малою величиною самого значення темного потоку.

Таким чином, при умові виконання співвідношення нормованого потоку  $\Phi_0$  до контрольованого  $\Phi_x$ , як 3 до 1, стає можливим збільшити діапазон вимірювань, при якому відносна похибка складає тисячні відсотка.

Такі висновки можна вважати доцільними з практичної точки зору, оскільки дозволяють обґрунтувати дотримання співвідношення між нормованою  $\Phi_0$  і контрольованою величиною  $\Phi_x$ , як 3 до 1, при якому стає можливим проведення технологічних процесів з високою точністю. При цьому, стає можливим значно розширити діапазон вимірювань, при якому відносна похибка має величину малого порядку (тисячні відсотка), тобто дозволяє проводити весь технологічний процес від його початку до кінця з високою точністю. Але, таке збільшення нормованого потоку  $\Phi_0$  накладає вимоги до високої потужності каліброваного джерела випромінювання. Однак у випадках, коли відоме поточне (або прогнозоване) значення контрольованого потоку, то збільшувати в 3 рази нормований потік  $\Phi_0$  не потрібно. В цьому випадку рекомендовано лише дотримуватися співвідношення між  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , як 3 до 1, навіть при збільшеній на 1 порядок похибці відтворення нормованих потоків. Це дає можливість знизити вимоги до потужності та точності каліброваного джерела випромінювання.

З теоретичної точки зору триманні результати дозволяють стверджувати, що при застосуванні МНВ ваговим параметром між нормованими потоками  $\Delta\Phi_0$  і  $\Phi_0$  слід вважати потік  $\Phi_0$ . Так, співвідношення між нормованою  $\Phi_0$  і контрольованою величиною  $\Phi_x$ , як 3 до 1, дозволяє підвищити точність вимірювання, а також розширити діапазон вимірювань, при якому відносна похибка складає тисячні відсотка. Це є однією з переваг застосування знайденого співвідношення між потоками. Однак неможливо не відмітити, що такі високі результати по точності отримуються у випадку, коли за час проведення тактів вимірювань зміни параметрів залишаються сталими. Крім того, МНВ, як і будь-яким іншим методам, притаманна методична похибка, що обумовлена похибкою відтворення нормованих потоків. Так, збільшення похибки відтворення нормованих потоків призводить до звуження діапазону, при якому відносна похибка має величину малого порядку. Однак слід зазначити, що збільшення похибки відтворення темного потоку, в цьому випадку, не чинить вплив на результат вимірювання. Тож прийнятним залишається випадок, коли похибки відтворення нормованих потоків залишається якомога меншою. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень.

## 7. Висновки

1. Проведене комп'ютерне моделювання представленої математичної моделі при різних значеннях нормованих потоків випромінювання при змінах параметрів функції перетворення в межах  $\pm 1,0\%$ . Проведеними дослідженнями бу-

ло встановлено, що найбільших вплив серед нормованих потоків було виявлено потік  $\Phi_0$ . Це проявляється у тому, що більший вплив серед нормованих потоків на похибку вимірювання справляє величина потоку  $\Phi_0$ . Завдяки цьому можна стверджувати, що керуючи величиною нормованого потоку  $\Phi_0$  можна розширювати діапазон вимірювань, при якому відносна похибка величину малого порядку (тисячні відсотка).

2. Знайдене таке співвідношення між значеннями контрольованого потоку та найбільш впливовим з нормованих, яке забезпечує в широкому діапазоні вимірювань найменшу похибку. Завдяки отриманому співвідношенню значень між потоками  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , що складає 3:1, стає можливим збільшити діапазон вимірювань, при якому відносна похибка має величину малого порядку. Наприклад, при значеннях потоку  $\Delta\Phi_0=0,1\cdot 10^{-3}$  Вт і  $\Phi_0=1,06\cdot 10^{-3}$  Вт (що відповідає 5 кроку) стає можливим вимірювати з відносною похибкою, що складає тисячні відсотка, контрольований потік в ширшому діапазоні  $\Phi_x=(0,16\cdot 10^{-3}\div 0,97\cdot 10^{-3})$  Вт. У порівнянні з випадком, де не використовується це відношення і при  $\Delta\Phi_0=0,1\cdot 10^{-3}$  Вт та  $\Phi_0=0,35\cdot 10^{-3}$  Вт (що відповідає 5 кроку), значення становитиме лише  $\Phi_x=0,08\cdot 10^{-3}$  Вт. Це свідчить про можливість підвищення точності в широкому діапазоні шляхом застосування заданого співвідношення між потоками  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ . Таким чином, була отримана точність, яку можна порівняти з точністю зразкових мір.

3. Проведено комп'ютерне моделювання впливу похибки відтворення на результат вимірювання при умові забезпечення знайденого співвідношення між контрольованою та найбільш впливовою величинами. Встановлено, що збільшення похибки відтворення нормованих за значенням потоків випромінення на 1 порядок призводить до звуження діапазону, в якому забезпечується відносна похибка вимірювання малого порядку. Особливо це звуження проявляється у випадку, коли не застосовувати співвідношення між потоками  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , як 3 до 1 (в цьому випадку висувуються вимоги до знання поточного значення контрольованого потоку). Таким чином, для зменшення впливу похибки відтворення нормованих потоків на 1 порядок, виконання співвідношення між потоками  $\Phi_0$  і  $\Phi_x$ , як 3 до 1, є бажаним. Результати дослідження показали, що вимоги до дотримання похибки відтворення нормованих потоків якомога меншою все ще залишаються високими. Проведено комп'ютерне моделювання впливу похибки відтворення темного потоку. Було встановлено, що похибка відтворення темного потоку не чинить вплив на результат вимірювання.

## Література

1. 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), С. 32–37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dostovernost-izmeritelnoy-informatsii-v-sistemah-upravleniya-problemy-i-resheniya/viewer>
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. Shcherban', V., Kolysko, O., Melnyk, G., Sholudko, M., Shcherban', Y., Shchutska, G. (2020). Determining tension of yarns when interacting with guides and operative parts of textile machinery having the torus form. *Fibres and Textiles*, 4, 87–95. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT\\_2020\\_4\\_12.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT_2020_4_12.pdf)
4. 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)
5. 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 guides. *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)
6. Годованюк, В. М., Докторович, І. В., Юр'єв, В. Г., Фодчук, І. М., Шорок, Є. О. (2018). Додаткові похибки, що виникають в освітлювачах. *Вісник Хмельницького національного університету*, 3 (261), 253–257. URL: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018\\_3/jrn/pdf/43.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018_3/jrn/pdf/43.pdf)
7. Танкевич, Є. М., Яковлева, І. В., Варський, Г. М. (2016). Підвищення точності вимірювальних каналів напруги систем керування електроенергетичних об'єктів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 1, 79–84. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/download/1880/1880/>
8. Степаняк, М. М., Скальський, В. Р., Степаняк, М. В. (2010). Дослідження можливості підвищення точності вимірювання температури обертових об'єктів. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, 686, 13–23. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/34026/1/02.pdf>
9. Яненко, О. П., Михайленко, С. В., Лісничук, 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)
10. Wu, J., Chen, Y., Gao, S., Li, Y., Wu, Z. (2015). Improved measurement accuracy of spot position on an InGaAs quadrant detector. *Applied Optics*, 54 (27), 8049. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.54.008049>
11. Hidalgo-López, J. A., Fernández-Ramos, R., Romero-Sánchez, J., Martín-Canales, J. F., Ríos-Gómez, F. J. (2018). Improving Accuracy in the Readout of Resistive Sensor Arrays. *Journal of Sensors*, 2018, 1–12. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/9735741>
12. 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>
13. Zhang, J., Qian, W., Gu, G., Mao, C., Ren, K., Wu, C. et. al. (2019). Improved algorithm for expanding the measurement linear range of a four-quadrant detector. *Applied Optics*, 58 (28), 7741. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.58.007741>
14. Hobbs, M. J., Tan, C. H. and Willmott, J. R. (2013). Evaluation of phase sensitive Hobbs, M. J., Tan, C. H., Willmott, J. R. (2013). Evaluation of phase



sensitive detection method and Si avalanche photodiode for radiation thermometry. *Journal of Instrumentation*, 8 (03), P03016–P03016. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/03/p03016>

15. Петровська, Г., Демкович, І. (2010). Пристрій для вимірювання поглинання тонкоплівкових покриттів фототепловим методом. *Теоретична електротехніка*, 61, 128–134. URL: [http://elit.lnu.edu.ua/pdf/61\\_17.pdf](http://elit.lnu.edu.ua/pdf/61_17.pdf)

16. Riazimehr, S., Kataria, S., Bornemann, R., Haring Bolívar, P., Ruiz, F. J. G., Engström, O. et. al. (2017). High Photocurrent in Gated Graphene–Silicon Hybrid Photodiodes. *ACS Photonics*, 4 (6), 1506–1514. doi: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b00285>

17. 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>

18. Qin, J., Cui, S., Dai, J. (2020). Noise Analysis and Compensation Strategy of Photoelectric Detection Circuit. *Journal of Physics: Conference Series*, 1601, 022047. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1601/2/022047>

19. Chen, C.-C., Chen, C.-L., Lin, Y. (2016). All-Digital Time-Domain CMOS Smart Temperature Sensor with On-Chip Linearity Enhancement. *Sensors*, 16 (2), 176. doi: <https://doi.org/10.3390/s16020176>

20. Shcherban', V., Korogod, G., Kolysko, O., Kolysko, M., Shcherban', Y., Shchutska, G. (2020). Computer simulation of multiple measurements of logarithmic transformation function by two approaches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (108)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218517>

21. 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>

22. Соболева, Н. А., Меламид, А. Е. (1974). *Фотоэлектронные приборы*. Москва: «Высшая школа», 376. URL: <https://lib.convdocs.org/docs/index-20291.html>

23. 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)

24. Кондратов, В. Т. (2015). Теория избыточных и сверхизбыточных измерений: сверхизбыточные измерения сопротивления резисторов и резистивных сенсоров. Сообщение 1. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 4, 7–22. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vott\\_2015\\_4\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vott_2015_4_3)

25. 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)