

УДК 621.4.001.4:681.2;681.5;621.3 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.333-341](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.333-341)

Г. О. Корогод, канд. техн. наук, Н. В. Чупринка, доц., канд. техн. наук,

А. М. Кириченко, канд. техн. наук

Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

e-mail: korogod.go@knutd.com.ua, chuprinka.nv@knutd.com.ua, kirichenko.am@knutd.com.ua

Комп'ютерне моделювання впливу надлишковості на точність визначення поточних параметрів логарифмічної функції перетворення сенсора

Досліджено вплив значень каліброваних потоків випромінювання на точність визначення параметрів логарифмічної функції перетворення фотодіода, а також визначені взаємозалежності параметрів між собою. Встановлено, що для отримання високоточних значень параметрів функції перетворення необхідно сформулювати надлишкові такти вимірювання каліброваних потоків випромінювання фіксованих значень. Проаналізовано вплив величини відхилення темнового потоку на точність визначення параметрів логарифмічної функції перетворення фотодіода.

параметри логарифмічної функції перетворення, надлишковість, калібровані потоки випромінювання

Постановка проблеми. В рамках тенденцій сучасного виробництва та при наукових дослідженнях необхідно дотримуватися високих норм контролю якості вимірювання. На точність результату вимірювання головним чином впливає точність самого сенсора, оскільки від точності вимірювання сенсора залежить точність всьому подальшого вимірювання. На точність сенсора, в свою чергу, впливають різні фактори, серед яких основними є стабільність параметрів функції перетворення сенсора, вид функції перетворення сенсора та діапазон вимірювання. Визначення і контроль параметрів сенсора є однією з головних підстав для отримання достовірної інформації оскільки дозволяє своєчасно виявити відхилення в роботі сенсора та всієї автоматизованої системи в цілому. Таким чином, існує необхідність у безперервному моніторингу сенсорів та у вдосконаленні підходів по визначенню метрологічної надійності сенсорів та їх калібруванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На вирішення питань щодо визначення поточних значень параметрів функції перетворення сенсорів присвячено багато наукових праць. Так, в роботі [1] пропонується метод оптимізації процесу калібрування резистивних датчиків температури на основі вимірювання постійної часу. В роботі [2] запропонована модель використання нелінійного поліноміального алгоритму для зменшення впливу температури на точність вимірювання. Однак, в зазначених роботах не було висвітлено можливості визначення поточних значень параметрів функції перетворення сенсора з метою проведення метрологічного контролю. Дослідженнями в роботах [3–5] підкреслюють важливість розробки нових концепцій оцінки невизначеності вимірювань, а також упереджувати поступові відмови з заданою ймовірністю для забезпечення відповідності сучасним вимогам і стандартам. Як одним з підходів у аналізі надійності сенсора є моделювання терміну служби сенсора за розподілом Вейбулла при різних вхідних даних [6]. Застосування математичних підходів по упорядкуванню пар вхідних даних відповідно до їх відносної важливості та отримання стабільних значень також розглядалися в роботі [7]. У дослідженні [8] було запропоновано ймовірнісну модель для розділення впливу навколишнього середовища та внутрішнього дрейфу пристрою, що підвищує точність

визначення змін характеристик сенсора. При побудови цієї моделі аналізуються дані тривалого експерименту, що є не завжди прийнятним для швидкоплинних процесів. На самостійний вияв та діагностування робочого стану самих датчиків направлена робота [9]. Однак для цього застосовується система багатосенсорного об'єднання, що також може вносити похибки в результат вимірювання через не співпадіння характеристик сенсорів. В роботі [10] було запропоновано використання перемикаючого фільтра Калмана для корекції збоїв у роботі сенсорів. Цей метод є достатньо стійким до можливих хибних сигналів з сенсора завдяки можливості вибору найбільш підходящої моделі вимірювань серед інших моделей, що відповідають встановленим сценаріям несправності. Такий підхід потребує наявності великої кількості моделей, що не завжди можуть безпосередньо описати всі стани несправності, а також потребують ефективної обробки великої кількості даних. В роботі [11] показано, що використання безсерверних архітектур та стандартів цифрової комунікації, таких як OPC-UA, сприяє забезпеченню точності та надійності вимірювань у розподілених сенсорних мережах. В роботі [12] була представлена адаптивна математична модель вагового агрегування з багатофакторною оцінкою обробки потоків із різнорідних сенсорів.

Незважаючи на практичну і наукову значущість зазначених результатів, не було розглянуто в повній мірі можливість безпосереднього визначення поточних значень параметрів при нелінійній функції перетворення (ФП) сенсора. Для комплексного вирішення поставленої задачі успішно застосовуються методи надлишкових вимірювань [13–16]. Так, в роботі [13] були представлені рівняння надлишкових вимірювань параметрів логарифмічної ФП сенсора без проведення додаткових заходів по її лінеаризації. В роботі [16] описано вплив значень каліброваних потоків випромінювання на точність самого вимірювання, але не було визначено їх вплив на точність визначення поточних параметрів ФП сенсора. Тому, дослідження методів надлишкових вимірювань по впливу значень каліброваних потоків випромінювання на точність визначення параметрів нелінійної ФП сенсора є актуальною.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення точності вимірювання поточних значень параметрів нелінійної функції перетворення сенсора

Виклад основного матеріалу. Як було зазначено в роботах [13–16], методи надлишкових вимірювань (МНВ) є ефективними при роботі з нелінійною ФП на всій вхідній характеристиці сенсора, а також надають можливість визначити поточні параметри сенсора.

В роботі для проведення моделювання в якості сенсора було обрано фотодіод як один з найбільш затребуваних на виробництві. Як відомо, функція перетворення (ФП) фотодіода, що описує його роботу в фотогальванічному режимі (з навантаженням), має вигляд:

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

де U_R – напруга на навантаженні;

S'_H – тепловий потенціал ($kT/q = S'_H$, де k – стала Больцмана ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура навколишнього середовища або блоку стабілізації температури; q – заряд електрона ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл));

Φ_x – потік оптичного випромінювання, що падає на фотодіод;

Φ_T – темновий потік фотодіода ($S_I/I_s = 1/\Phi_T$ де S_I – струмова (монохроматична) чутливість фотодіода; I_s – темновий струм фотодіода);

U_{RM} – падіння напруги на омичних елементах діода.

Для визначення параметрів функції перетворення фотодіода S'_H та U_{RM} за допомогою МНВ, необхідно сформулювати надлишковість і побудувати відповідну математичну модель МНВ. Математична модель МНВ представляє собою систему рівнянь величин, що описують такти вимірювання не лише фізичної величини, що вимірюється, а також такти вимірювання нормованих величин однієї природи з вимірювальною. Кількість таких тактів, що складають собою один цикл вимірювання, залежить від кількості невідомих величин, які потрібно визначити. Оскільки розглядається можливість визначення двох параметрів ФП (S'_H та U_{RM}), то необхідно сформулювати два додаткових такти вимірювання нормованих величин – каліброваних за значеннями потоків випромінювання Φ_0 і $\Delta\Phi_0$ [13]. В результаті формування тактів вимірювання таких каліброваних потоків, отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} U'_{R1} = S'_H \ln((\Delta\Phi/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \\ U'_{R2} = S'_H \ln((\Phi_0/\Phi_T)+1) - U_{RM}. \end{cases} \quad (2)$$

Згідно з [13] визначення параметрів S'_H та U_{RM} здійснюється відповідно до виразів:

$$S'_H = \frac{U'_{R2} - U'_{R1}}{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)} \quad (3)$$

та

$$U_{RM} = S'_H \ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + 1\right) - U'_{R1} = (U'_{R2} - U'_{R1}) \frac{\ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_T} + 1\right)}{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)} - U'_{R1}. \quad (4)$$

В роботі науковий інтерес представляло дослідження впливу значень каліброваних потоків випромінювання Φ_0 і $\Delta\Phi_0$ на точність визначення параметрів S'_H та U_{RM} згідно з рівнянь (3) і (4), а також визначення взаємозалежності параметрів S'_H та U_{RM} між собою.

Комп'ютерне моделювання проводилося на прикладі кремнієвого фотодіода ФД307 з параметрами: темновий струм фотодіода $I_s=0,003$ мкА, струмова чутливість $S_k=0,27$ А/Вт (при $\lambda=0,55$ мкм). На основі прийнятих виразів, були отримані наступні значення: темнового потоку $\Phi_T=1,11 \cdot 10^{-8}$ Вт та крутизни перетворення $S'_H=0,025$ (при температурі навколишнього середовища $T=20^\circ\text{C}$). Нормовані за значенням потоки оптичного випромінювання обрані, відповідно, $\Phi_0=0,05$ Вт і $\Delta\Phi_0=0,80$ Вт.

Для визначення взаємних зв'язків параметрів S'_H та U_{RM} було проведено дослідження кожного параметра окремо.

Визначення поточного значення параметра S'_H проводилися згідно з рівнянням (3) при значеннях каліброваних потоків $\Phi_0=0,05$ Вт і $\Delta\Phi_0=0,80$ Вт з похибкою відтворення $1 \cdot 10^{-7}$ Вт, а також при різних значеннях відхилень параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень.

Спочатку розглядався випадок, коли при вимірюваннях в перших двох тактах, згідно з (2), відхилення кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень

становило $\pm 1\%$. В результаті обробки даних за рівнянням надлишкових вимірювань були отримані значення параметра S'_H , що лежить в межах від 0,025455 до 0,025042. Отримані значення відповідають відхиленню параметра S'_H в межах 0,82 %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 1% на 0,18%. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H лежать в межах $\pm 1\%$, а зміна U_{RM} в межах $\pm 10\%$. Це свідчить про незалежність результату визначення параметра S'_H від величини відхилення параметра U_{RM} .

Розглядався також випадок, коли при вимірюваннях в перших двох тактах, згідно з (2), відхилення кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень становило $\pm 10\%$. В результаті обробки даних за рівнянням надлишкових вимірювань були отримані значення параметра S'_H , що лежить в межах від 0,02772 до 0,02276. Отримані значення відповідають відхиленню параметра S'_H в межах (9,80÷9,84) %, що відрізняється від змодельованого значення в 10% на (0,2÷0,16)%. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H залишалися в межах $\pm 10\%$, а зміна U_{RM} була зменшена до меж $\pm 1\%$. Це підтверджує раніше зроблений висновок про незалежність результату визначення параметра S'_H від величини відхилення параметра U_{RM} .

Подальші дослідження були направлені на встановлення залежності точності визначення параметра S'_H від значення каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$. Для цього була застосована вбудована функція «Розв'язувач» табличного редактора Excel. В результаті були знайдені значення потоків: $\Phi_0 = 0,08$ Вт та $\Delta\Phi = 0,008$ Вт, при яких забезпечується отримання значення параметра S'_H максимально приближеного до його реального значення (з похибкою визначення параметра 0,0005%). Слід зазначити, що такі значення були отримані при умові, що за час проведення циклу вимірювання зміни параметрів ФП повинні залишатися сталими.

Для визначення залежності параметра U_{RM} від параметра S'_H були розглянуті аналогічні випадки при значеннях каліброваних потоків $\Phi_0 = 0,05$ Вт і $\Delta\Phi_0 = 0,80$ Вт з похибкою відтворення $1 \cdot 10^{-7}$ Вт.

Для випадку, коли відхилення кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень становило $\pm 1\%$, були отримані значення параметра U_{RM} , що лежить в межах від 0,0096 до 0,0104 В. Отримані значення відповідають відхиленню параметра U_{RM} в межах (3,74÷3,67)%, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 1% на (2,74÷2,67) %. У випадку, коли відхилення параметра S'_H збільшено до $\pm 10\%$, а зміна U_{RM} залишається в межах $\pm 1\%$, розраховане значення параметра U_{RM} буде приймати значення від 0,0096 В до 0,0103 В. Отримані значення відхилень параметра U_{RM} будуть лежати в межах (4,16÷3,24) %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 1% на (3,16÷2,24) %.

При вимірюваннях з відхиленням кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень в межах $\pm 10\%$, були отримані значення параметра U_{RM} , що лежить в межах від 0,0105 В до 0,0094 В. Отримані значення відповідають відхиленню параметра U_{RM} в межах (4,83÷5,75) %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 10% на (7,26÷4,25) %. У випадку, коли при вимірюваннях в перших двох тактах відхилення параметра S'_H лежать в межах $\pm 1\%$, а зміна U_{RM} в межах $\pm 10\%$, розраховане значення параметра U_{RM} буде приймати значення від 0,0105 В до 0,0095 В. Отримані значення відповідають відхиленню параметра U_{RM} в межах (5,25÷5,32) %, що відрізняється від реального (змодельованого) значення в 10% на (4,75÷4,68) %.

Таким чином, дослідження показали, що похибка визначення поточного значення параметра U_{RM} залежить як від значень відхилень самого параметра U_{RM} , так і

від значень відхилення параметра S'_H . Крім того, різниця відхилень мінімального і максимального значення параметра U_{RM} в кожного окремого випадку свідчить і про залежність від значень каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$.

На основі залежності параметра U_{RM} від значень відхилення параметра S'_H і раніше розрахованих оптимальних значень каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$, були проведені аналогічні розрахунки параметра U_{RM} при наступних даних: $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт.

В результаті чого, були отримані наступні результати:

1. При обробці даних за рівнянням надлишкових вимірювань (4) і при відхиленні кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень, що становило $\pm 1\%$, було отримане значення відхилення параметра U_{RM} , яке становить $0,98\%$, що забезпечує відносну похибку визначення поточного значення параметра U_{RM} в межах $0,02\%$. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H лежать в межах $\pm 10\%$, а зміна U_{RM} в межах $\pm 1\%$.

2. При обробці даних за рівнянням надлишкових вимірювань (4) і при відхиленні кожного з параметрів S'_H та U_{RM} від їх номінальних значень в межах $\pm 10\%$ були отримані значення відхилення параметра U_{RM} в межах $(9,97\div 9,98)\%$, що забезпечує відносну похибку визначення поточного значення параметра U_{RM} в межах $(0,03\div 0,02)\%$. Такі ж результати були отримані для випадку, коли відхилення параметра S'_H лежало в межах $\pm 1\%$, а зміна U_{RM} залишалася в межах $\pm 10\%$.

Таки чином, при значеннях потоків: $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт також забезпечується отримання значення параметра U_{RM} максимально приближеного до його реального значення (з похибкою визначення параметра $(0,03\div 0,02)\%$).

В результаті дослідження було встановлено, що шляхом встановлених оптимальних значень каліброваних потоків $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт отримують значення параметрів S та U_{RM} , які максимально приближеними до їх поточних значень.

В роботі також розглянуто вплив параметра Φ_t на результат визначення поточних значень величин U_{RM} та S'_H . Дослідження проводилося при рекомендованих значеннях каліброваних потоків $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт з похибкою відтворення $1\cdot 10^{-7}$ Вт, а також при відхиленнях параметрів U_{RM} та S'_H в межах $\pm 10\%$. В результаті були отримані наступні результати, які наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив відхилень параметра Φ_t на результат визначення поточних значень параметрів U_{RM} та S'_H

Відхилення параметра Φ_t від номінального значення (%)	Похибка визначення параметра U_{RM} (%)	Похибка визначення параметра S'_H (%)
$\pm 10\%$	$(24,04\div 26,58)\%$	$0,0005\%$
$\pm 1\%$	$(2,49\div 2,52)\%$	$0,0005\%$
0%	$0,02\%$	$0,0005\%$

Джерело: розроблено авторами

Аналіз табл.1 показав, що відхилення параметра Φ_t від номінального значення в межах $\pm 10\%$ значно впливає на визначення параметра U_{RM} і не впливає на визначення параметра S'_H . На думку авторів, це пов'язано з фізичними властивості даних параметрів: S'_H пов'язаний з навколишньою температурою, а U_{RM} та Φ_t – з конструктивними параметрами самого сенсора.

Для встановлення впливу каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ на точності визначення параметра U_{RM} при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$ також був використаний

табличний редактор Excel. При застосованні вбудованої функції «Розв'язувач» за допомогою симплекс-методу було встановлено, що для отримання значення параметра U_{RM} максимально приближеного до його реального значення необхідно встановити наступні значення каліброваних потоків: $\Phi_0 = 2,95 \cdot 10^{-5}$ Вт та $\Delta\Phi = 1,59 \cdot 10^{-3}$ Вт. Однак, при визначенні параметра S'_H такі значення каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ проводять до збільшення відносної похибки визначення параметра S'_H з 0,0005% до 0,08%.

Подальші дослідження впливу значень каліброваних потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ на похибки визначення поточних значень параметрів U_{RM} та S'_H , наведені в табл. 2 і 3:

Таблиця 2 – Вплив параметрів Φ_0 та $\Delta\Phi$ на похибку визначення поточних значень U_{RM} (%) при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$

Φ_0 (Вт)	$\Delta\Phi$ (Вт)										
	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$2.39 \cdot 10^{-3}$	$3.19 \cdot 10^{-3}$	$4.79 \cdot 10^{-3}$	$5.59 \cdot 10^{-3}$	$6.39 \cdot 10^{-3}$	$7.19 \cdot 10^{-3}$	$8.79 \cdot 10^{-3}$	$9.59 \cdot 10^{-3}$	$10.39 \cdot 10^{-3}$	$11.19 \cdot 10^{-3}$
$2.95 \cdot 10^{-5}$	0.002	0.142	0.231	0.341	0.378	0.409	0.436	0.478	0.495	0.511	0.525
0.008	2.403	2.426	2.439	2.454	2.458	2.461	2.464	2.469	2.470	2.472	2.473
0.016	2.423	2.444	2.455	2.467	2.471	2.474	2.476	2.480	2.482	2.483	2.484
0.024	2.432	2.451	2.462	2.473	2.477	2.479	2.481	2.485	2.486	2.487	2.488
0.032	2.437	2.455	2.466	2.476	2.480	2.482	2.484	2.488	2.489	2.490	2.491
0.040	2.440	2.458	2.468	2.479	2.482	2.484	2.486	2.489	2.491	2.492	2.492
0.056	2.445	2.462	2.472	2.482	2.485	2.487	2.489	2.492	2.493	2.494	2.495
0.064	2.447	2.464	2.473	2.483	2.486	2.488	2.490	2.492	2.494	2.494	2.495
0.072	2.448	2.465	2.474	2.483	2.486	2.489	2.490	2.493	2.494	2.495	2.496
0.080	2.449	2.466	2.475	2.484	2.487	2.489	2.491	2.494	2.495	2.496	2.496
0.096	2.451	2.467	2.476	2.485	2.488	2.490	2.492	2.495	2.496	2.496	2.497
0.104	2.452	2.468	2.477	2.486	2.489	2.491	2.492	2.495	2.496	2.497	2.498

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Вплив параметрів Φ_0 та $\Delta\Phi$ на похибку визначення поточних значень S'_H (%) при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$

Φ_0 (Вт)	$\Delta\Phi$ (Вт)										
	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$2.39 \cdot 10^{-3}$	$3.19 \cdot 10^{-3}$	$4.79 \cdot 10^{-3}$	$5.59 \cdot 10^{-3}$	$6.39 \cdot 10^{-3}$	$7.19 \cdot 10^{-3}$	$8.79 \cdot 10^{-3}$	$9.59 \cdot 10^{-3}$	$10.39 \cdot 10^{-3}$	$11.19 \cdot 10^{-3}$
$2.95 \cdot 10^{-5}$	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
0.008	0.003	0.002	0.002	0.0016	0.0015	0.0014	0.0013	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011
0.016	0.0025	0.0019	0.0016	0.0012	0.0011	0.0010	0.0010	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008
0.024	0.0022	0.0016	0.0013	0.0010	0.0009	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006
0.032	0.0020	0.0015	0.0012	0.0009	0.0008	0.0008	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
0.040	0.0019	0.0014	0.0011	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005
0.056	0.0017	0.0013	0.0010	0.0008	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004
0.064	0.0017	0.0012	0.0010	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004
0.072	0.0016	0.0012	0.0010	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
0.080	0.0016	0.0012	0.0009	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
0.096	0.0015	0.0011	0.0009	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
0.104	0.0015	0.0011	0.0009	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004

Джерело: розроблено авторами

Аналіз таблиць 2 і 3 показав, що при похибці відтворення Φ_t в межах $\pm 1\%$ збільшення значень параметрів Φ_0 та $\Delta\Phi$ для параметра U_{RM} призводить до збільшення похибки визначення, а для параметра S'_H – до зменшення. Це свідчить про те, що навіть шляхом корегування потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$ неможливо виключити вплив похибки відтворення потоку Φ_t на точність одночасного визначення параметрів U_{RM} та S'_H . Тож,

наявність відхилення потоку Φ_T від його нормованого значення свідчить про конструктивні зміни в самому сенсорі, що є сигналом для його заміни.

Для визначення поточного значення величини Φ_T , згідно з [13], необхідно провести додатковий 3й такт вимірювання каліброваного потоку, який складається з двох потоків Φ_0 та $\Delta\Phi$. В цьому випадку система (2) прийме вид (5):

$$\begin{cases} U'_{R1} = S'_H \ln((\Delta\Phi_0/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \\ U'_{R2} = S'_H \ln((\Phi_0/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \\ U'_{R3} = S'_H \ln(((\Phi_0 + \Delta\Phi_0)/\Phi_T)+1) - U_{RM}; \end{cases} \quad (5)$$

В результаті рішення системи (5) отримаємо наступний вираз:

$$\frac{(U'_{R2} - U'_{R1})}{(U'_{R3} - U'_{R2})} = \frac{\ln\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_T}{\Delta\Phi_0 + \Phi_T}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta\Phi_0}{\Phi_0 + \Phi_T} + 1\right)}. \quad (6)$$

З рівняння (6) значення величини Φ_T можна отримати шляхом використання методу ітерацій. Якщо отримане значення Φ_T буде відрізнятися від номінального більше ніж на 1%, то це свідчить про метрологічну ненадійність сенсора.

Висновки. В результаті застосування МНВ для фотодіоду з логарифмічною ФП, були отримані наступні висновки: 1) визначення поточного значення параметра S'_H не залежить від відхилень параметра U_{RM} , 2) визначення поточного значення параметра U_{RM} залежить як від відхилень параметра S'_H , та і від значень відхилень самого параметра U_{RM} , 3) значення каліброваних потоків Φ_0 і $\Delta\Phi$ впливають на точність визначення поточних значень параметрів S'_H та U_{RM} , 4) для отримання значення параметрів S'_H та U_{RM} , що максимально приближені до їх поточних значень, необхідно встановити значення каліброваних потоків $\Phi_0=0,08$ Вт та $\Delta\Phi=0,008$ Вт, 5) на точність визначення параметра U_{RM} сильний вплив має також і величина темнового потоку Φ_T , 6) відхилення величини Φ_T від номінального значення свідчить про конструктивні зміни сенсора, що є сигналом до його заміни. Рекомендоване відхилення Φ_T не повинно перевищувати 1%.

Список літератури

1. Klebba M., Frącz A., Brodzicki M., Rzepkowska A., Wąż M. Time constant as the main component to optimize the resistance temperature sensors' calibration process. *Sensors*. 2024. Vol. 24 (2). P. 487. DOI: 10.3390/s24020487.
2. Wang L., Tao H.-B., Dong H., Shao Z.-B., Wang F. A non-linear temperature compensation model for improving the measurement accuracy of an inductive proximity sensor and its application-specific integrated circuit implementation. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (17). P. 5010. DOI: 10.3390/s20175010.
3. Пановик У. П., Гідей Р. В., Богоніс О. О. Інтегровані метрологічні системи в індустрії 4.0. *Наукові записки Української академії друкарства*. 2024. № 1 (68). С. 71–82.
4. Глухов С., Сакович Л., Козел В., Семеха С., Бабій О. Побудова автоматизованої системи метрологічного забезпечення цифрових вимірювальних приладів з використанням інформаційних технологій. *International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects : 9th Int. Sci. and Practical Conf.* (May 19–20, 2024). № 45 (201). P. 603–607. DOI: 10.51582/interconf.19-20.05.2024.061.
5. Varshney A., Garg N., Nagla K. S., Nair T. S., Jaiswal S. K., Yadav S., Aswal D. K. Challenges in sensors technology for Industry 4.0 for futuristic metrological applications. *MAPAN*. 2021. № 2. P. 215–226. DOI: 10.1007/s12647-021-00453-1.

6. Kang Q., Lin Y., Tao J. A reliability analysis of a MEMS flow sensor with an accelerated degradation test. *Sensors*. 2023. Vol. 23 (21). P. 8733. DOI: 10.3390/s23218733.
7. Awad M., Kiese T. S., Assaghir Z., Ventura A. Convergence of sensitivity analysis methods for evaluating combined influences of model inputs. *Reliability Engineering and System Safety*. 2019. Vol. 189. P. 109–122. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.050.
8. Yang C., Bohlin G., Oechtering T. Environmental variation or instrumental drift? A probabilistic approach to gas sensor drift modeling and evaluation. *IEEE Sensors*. 2024. P. 1–4. DOI: 10.1109/SENSOR60989.2024.10784897.
9. Zhu M., Li J., Wang W., Chen D. Self-detection and self-diagnosis methods for sensors in intelligent integrated sensing system. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21 (17). P. 19247–19254. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3090990.
10. Aswal N., Sen S., Mevel L. Switching Kalman filter for damage estimation in the presence of sensor faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 175. P. 109116. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109116.
11. Гонсьор О., Демідов О. Застосування безсерверних систем для обробки метрологічних метаданих в ІоТ. *ISTCMTM*. 2024. Vol. 85 (4), № 4. С. 25–29. DOI: 10.23939/istcmtm2024.04.025.
12. Пановик У., Гідей Р. Математичне моделювання процесу агрегації та обробки вимірювальної інформації в автоматизованих метрологічних системах моніторингу. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2025. Vol. 82 (2). P. 37–44. URL: <https://vottp.khmnpu.edu.ua/index.php/vottp/article/view/478> (дата звернення: 18.06.2025).
13. Shcherban' V., Korogod G., Chaban V., Kolysko O., Shcherban' Yu., Shchutska G. Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 98 (2/5). P. 16–22. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160830.
14. Shcherban' V., Korohod H., Chupryna N., Kolysko O., Shcherban' Y., Shchutska G. Computer analysis of multiple measurements with the sensor's quadratic transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 1 (5/121). P. 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.273299.
15. Shcherban' V., Korohod H., Kolysko O., Kyrychenko A., Shcherban' Y., Shchutska G. Determining features in the application of redundancy for the thermistor cubic transformation function using computer simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1 (5/127). P. 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.297619.
16. Shcherban' V., Korogod G., Kolysko O., Kolysko M., Shcherban' Yu., Shchutska G. Computer simulation of logarithmic transformation function to expand the range of high-precision measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and Controlling System*. 2021. Vol. 2 (9/110). P. 27–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227984.

References

1. Awad, M., Kiese, T. S., Assaghir, Z., & Ventura, A. (2019). Convergence of sensitivity analysis methods for evaluating combined influences of model inputs. *Reliability Engineering and System Safety*, 189, 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.050>
2. Aswal, N., Sen, S., & Mevel, L. (2022). Switching Kalman filter for damage estimation in the presence of sensor faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 175, 109116. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109116>
3. Glukhov, S., Sakovych, L., Koziel, V., Semekha, S., & Babii, O. (2024, May 19–20). Construction of an automated system for metrological support of digital measuring instruments using information technologies. In *International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects. 9th International Scientific and Practical Conference* (No. 45 (201), pp. 603–607). <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.05.2024.061> [in Ukrainian].
4. Honsior, O., & Demidov, O. (2024). Application of serverless systems for processing metrological metadata in IoT. *ISTCMTM*, 85(4), 25–29. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2024.04.025> [in Ukrainian].
5. Kang, Q., Lin, Y., & Tao, J. (2023). A reliability analysis of a MEMS flow sensor with an accelerated degradation test. *Sensors*, 23(21), 8733. <https://doi.org/10.3390/s23218733>
6. Klebba, M., Frącz, A., Brodzicki, M., Rzepkowska, A., & Wąż, M. (2024). Time constant as the main component to optimize the resistance temperature sensors' calibration process. *Sensors*, 24(2), 487. <https://doi.org/10.3390/s24020487>
7. Mykytyuk, Z., Shymchyshyn, O., Zvorskyi, A., & Markiv, D. (2024). Automation of microclimate control processes in residential premises. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, 4(1), 155–162. <https://doi.org/10.23939/ict2024.01.155>
8. Panovyk, U. P., Hidei, R. V., & Bohonis, O. O. (2024). Integrated metrological systems in Industry 4.0. *Scientific Notes of the Ukrainian Academy of Printing*, 1(68), 71–82 [in Ukrainian].
9. Panovyk, U., & Hidei, R. (2025). Mathematical modeling of the process of aggregation and processing of measurement information in automated metrological monitoring systems. *Measuring and Computing*

- Devices in Technological Processes*, 82(2), 37–44. vottp.khmn.edu.ua/index.php/vottp/article/view/478 [in Ukrainian].
10. Shcherban', V., Korogod, G., Chaban, V., Kolysko, O., Shcherban', Yu., & Shchutska, G. (2019). Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 98(2/5), 16–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160830>
 11. Shcherban', V., Korohod, H., Chuprynska, N., Kolysko, O., Shcherban', Y., & Shchutska, G. (2023). Computer analysis of multiple measurements with the sensor's quadratic transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5/121), 17–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273299>
 12. Shcherban', V., Korohod, H., Kolysko, O., Kyrychenko, A., Shcherban', Y., & Shchutska, G. (2024). Determining features in the application of redundancy for the thermistor cubic transformation function using computer simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5/127), 33–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297619>
 13. Shcherban', V., Korogod, G., Kolysko, O., Kolysko, M., Shcherban', Yu., & Shchutska, G. (2021). Computer simulation of logarithmic transformation function to expand the range of high-precision measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and Controlling System*, 2(9/110), 27–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227984>
 14. Varshney, A., Garg, N., Nagla, K. S., Nair, T. S., Jaiswal, S. K., Yadav, S., & Aswal, D. K. (2021). Challenges in sensors technology for Industry 4.0 for futuristic metrological applications. *MAPAN*, 2, 215–226. <https://doi.org/10.1007/s12647-021-00453-1>
 15. Wang, L., Tao, H.-B., Dong, H., Shao, Z.-B., & Wang, F. (2020). A non-linear temperature compensation model for improving the measurement accuracy of an inductive proximity sensor and its application-specific integrated circuit implementation. *Sensors*, 20(17), 5010. <https://doi.org/10.3390/s20175010>
 16. Yang, C., Bohlin, G., & Oechtering, T. (2024). Environmental variation or instrumental drift? A probabilistic approach to gas sensor drift modeling and evaluation. *IEEE Sensors*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSOR560989.2024.10784897>
 17. Zhu, M., Li, J., Wang, W., & Chen, D. (2021). Self-detection and self-diagnosis methods for sensors in intelligent integrated sensing system. *IEEE Sensors Journal*, 21(17), 19247–19254. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3090990>

Korohod Hanna, PhD tech. sci., Nataliia Chuprynska, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Anton Kyrychenko, PhD
Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine

Computer Modeling of the Impact of Redundancy on the Accuracy of Determining the Current Parameters of the Sensor Logarithmic Transformation Function

Determination and control of sensor parameters is one of the main reasons for obtaining reliable information, since it allows timely detection of deviations in the operation of the sensor and the entire automated system as a whole. Therefore, the purpose of the work is to increase the accuracy of measuring the current values of the parameters of the nonlinear sensor transformation function.

Computer modeling was carried out using the example of a silicon photodiode FD307 photodiode with a logarithmic conversion function. As a result of the modeling, such values of calibrated fluxes were found, which ensure that the values of the parameters of the conversion function are obtained as close as possible to their real (simulated) values. At the same time, the values of the relative errors of parameter determination are hundreds and thousandths of a percent. The work also considered the influence of the dark flux parameter on the accuracy of determining the current values of the parameters of the conversion function. It was established that the deviation of the value of the dark flux value from its nominal value significantly affects the voltage value on the ohmic elements of the diode and does not affect the value of the thermal potential. For high-precision measurement of the current parameters of the conversion function, the recommended deviation of the dark flux should not exceed one percent.

As a result of applying redundant methods for a photodiode with a logarithmic transformation function, the following conclusions were obtained: 1) determining the current value of the thermal potential according to the equation of redundant measurements does not depend on the voltage deviations on the ohmic elements of the diode, 2) determining the current value of the voltage on the ohmic elements of the diode according to the corresponding equation of redundant measurements depends on the thermal potential deviations, 3) the values of the calibrated flows affect the accuracy of determining the current values of the parameters of the logarithmic transformation function, 4) to obtain the values of the parameters of the transformation function that are as close as possible to their current values, it is necessary to set fixed values of the calibrated flows, 5) the accuracy of determining the voltage on the ohmic elements of the diode is also strongly influenced by the value of the dark flux, 6) the deviation of the value of the dark flux from the nominal value indicates structural changes in the sensor, which is a signal to replace it.

logarithmic transformation function parameters, redundancy, calibrated radiation fluxes

Одержано (Received) 05.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025