

КАЛІБРУВАННЯ КВАРЦОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ СЕКУНДОМІРІВ МЕТОДОМ ЗІСТАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВОЇ КАМЕРИ

Олег Мещеряк, Олег Величко, д.т.н., проф.

Державне підприємство “Укрметрестандарт”, Україна; e-mail: velychko@hotmail.com

Резюме

Вимірювання інтервалів часу з невисокою точністю на інтервалах від кількох секунд до кількох годин, або діб є актуальними для деяких широких застосувань у різних сферах діяльності. Такі вимірювання широко застосовуються в технологічних процесах різноманітних підприємств під час приготування та контролю за якістю приготування ліків, під час технічного обслуговування технічних засобів та механізмів, хімічних технологічних процесах тощо. Для таких вимірювань широко застосовуються ручні електронні кварцові секундоміри, які, не зважаючи на свою не надто високу точність вимірювань, повинні гарантувати користувачам точність вимірювань у встановленому технічною документацією допуску, так як ризики застосування не перевірених засобів вимірювальної техніки є досить високими, або взагалі неприйнятними, особливо в медичній галузі. Питання калібрування кварцових електронних секундомірів різними методами залишається актуальним для багатьох їх застосувань. У статті розглянуто калібрування кварцових електронних секундомірів методом зіставлення з використанням цифрової камери. Розроблено схему калібрування секундомірів і створено модель вимірювання при калібруванні, виходячи з розробленої схеми калібрування. Визначено внесок кожної складової моделі вимірювання в результат калібрування та відповідні невизначеності складових моделі. Складено бюджет невизначеності вимірювань виходячи із запропонованої моделі калібрування секундомірів. Проаналізовано вплив найбільш суттєвих впливних величин на точність результатів вимірювань. Розкрито зміст кількісних та якісних показників поправок, які необхідно враховувати під час калібрування для досягнення найвищої точності вимірювань. Описаний в статті метод калібрування секундомірів може бути використаним у калібрувальних лабораторіях, які мають відповідне обладнання та еталони.

Ключові слова

Секундомір, час та частота, метод зіставлення, калібрування, невизначеність вимірювань, цифрова камера.

1. Вступ

Широко відомо, що вимірювання часу та частоти є найбільш точними вимірюваннями, та застосовуються в різноманітних високоточних галузях науки та техніки. Невизначеності вимірювань часу і частоти можуть досягати 10^{-17} . В той же час, не дивлячись на такі високі можливості з точності вимірювань, актуальними є також і вимірювання інтервалів часу з невисокою точністю, наприклад до 1 секунди, на інтервалах від кількох секунд до кількох годин, або навіть діб. Такі вимірювання широко застосовуються в технологічних процесах різноманітних підприємств, наприклад, під час приготування та контролю за якістю приготування ліків, під час технічного обслуговування технічних засобів та механізмів, хімічних технологічних процесах тощо. Для таких вимірювань широко застосовуються ручні електронні кварцові секундоміри, які, не зважаючи на свою не надто високу точність вимірювань, повинні гарантувати користувачам точність вимірювань у встановленому технічною документацією допуску, так як ризики застосування не перевірених засобів вимірювальної техніки є досить високими, або взагалі неприйнятними, особливо в медичній галузі. Для забезпечення необхідної достовірності результатів вимірювання більшість користувачів обирає процедуру калібрування відповідно до вимог стандарту [1]. Питання калібрування кварцових електронних секундомірів різними методами залишається актуальним для багатьох їх застосувань.

2. Недоліки

Згідно публікації [2] секундоміри можуть бути відкалібровані трьома основними методами: метод прямого порівняння (direct comparison method) [3], метод часової бази (time base method) [4], метод підсумовування (totalized method) [5]. Також всі ці методи описані в публікації Національного інституту стандартів і технологій США [6], яка є найбільш відомою та найбільш всеохоплюючою в цьому питанні.

Метод прямого порівняння є найбільш простим та представляє собою порівняння інтервалу часу, що виміряний секундоміром з еталонним інтервалом, що може бути заданий сигналами радіо, провідної мережі, або просто іншим відкаліброваним еталонним секундоміром. Перевагою такого методу є його дешевизна (відсутність затрат на дороге обладнання), а недоліком – найменша точність, оскільки на точність впливає реакція людини, яка може становити декілька десятих часток секунди.

Метод часової бази полягає у визначенні відносної похибки кварцового генератора секундоміра за допомогою безконтактних технологій, з використанням індуктивних, акустичних або оптичних датчиків. Перевагою такого

методу є швидкість проведення вимірювань (як правило, це декілька хвилин) та його висока точність, оскільки в ньому повністю виключена реакція людини. Але цей метод підходить не для всіх типів секундомірів, потребує високошвидкісного спеціалізованого обладнання та має суттєвий недолік – в ньому відсутнє опробування (перевірка його запуску та зупинки) секундоміра. Крім того, є ризики впливу програмного забезпечення, що пов'язує частоту кварцового генератора із зміною індикаторів секундоміра.

Метод підсумовування є широко вживаним у метрологічних лабораторіях. Суть його полягає одночасному натисканні оператором кнопок старту та стопу на секундомірі та частотомірі, забезпечуючи синхронний запуск секундоміра і частотоміра, при цьому на частотомір постійно подається від генератора періодичний сигнал 1 кГц. Недоліком такого методу є вплив на результати вимірювань реакції оператора (хоч і значно менший ніж в методі прямого порівняння) та неможливість одночасного калібрування двох або більше секундомірів на одному еталонному обладнанні. Також, цей метод потребує значного часу вимірювань, оскільки вимірювання потрібно проводити по декілька раз у кожній точці калібрування.

В [2] та [6] в методі підсумовування додатково застосовують цифрову камеру для виключення реакції оператора. При цьому, в [6] розглядається використання камери тільки в режимі фотографування, що обмежує точність методу роздільною здатністю секундоміра. А в [2] пропонується знімати 2 коротких відео (на початку в кінці вимірювань) та здійснювати їх розкадровку. Цей метод є найбільш близький до запропонованого в цій публікації, він має ряд переваг, таких як: виключення реакції людини, висока точність (до 10^{-7}), опробування запуску та зупинки секундоміра. Але він має і ряд суттєвих недоліків, а саме: для його виконання потрібне специфічне обладнання (лічильник), якого немає в комерційному продажі, точність методу жорстко залежить від швидкості зйомки камери та потребує високошвидкісну камеру (240 або 420 кадрів за секунду), в методі не наведені математична модель вимірювання та бюджет невизначеності, а також, що є дуже важливо – цей метод не передбачає визначення наявності та величину постійного зміщення відліку часу секундоміра, що обумовлене передчасним відображенням секундоміром першої секунди при вимірюванні. Таке зміщення присутнє не у всіх секундомірів, але у значній кількості із тих, що є в комерційному продажі. В запропонованому в цій статті методі зазначені недоліки усунути.

3. Мета

Метою дослідження є дослідження методу калібрування кварцових електронних секундомірів з використанням цифрової камери.

4. Метод досліджень, що застосовується

Основним завданням є дослідження методу, який поєднує метод зіставлення показів секундоміра із показами частотоміра, та метод зіставлень показів секундоміра з еталонною шкалою часу, використовуючи цифрову камеру. Поєднання цих двох методів дає змогу провести опробування секундоміра, визначити наявність та величину постійного зміщення відліку часу секундоміра, що обумовлене передчасним відображенням секундоміром першої секунди при вимірюванні та визначити відносне відхилення показів секундоміра, що дає змогу розрахувати відхилення та розширену невизначеність вимірювання для будь-якого інтервалу часу в діапазоні його вимірювань.

Для визначення постійного зміщення показів секундоміра достатньо проводити серію з десяти коротких, наприклад, 3 секундних, вимірювань. Це значно скорочує час використання еталонного обладнання та дає змогу здійснювати одночасне калібрування практично необмеженої кількості секундомірів. Крім того, десятикратне вимірювання дає змогу значно підвищити точність таких вимірювань, в порівнянні з трикратними вимірюваннями, які зазвичай проводяться на довгих інтервалах, при використанні методу зіставлення із використанням генератора та частотоміра. Також, запропонований метод не передбачає використання високошвидкісного специфічного обладнання, необхідні частотомір, генератор та стандарт частоти є практично в кожній лабораторії, яка займається вимірюваннями часу та частоти, звичайна цифрова камера також не є зараз чимось особливим.

Для проведення досліджень як об'єкт калібрування було обрано секундомір Nitrah Kat.Nr.38.2014 виробництва TFA Dostmann GmbH & Co. KG (далі – секундомір).

Калібрування виконувалось в два етапи відповідно до схем калібрування, зображених на рис. 1. Пунктирною лінією зображено процес одночасного натискання кнопок запуску (зупинки) вимірювань на частотомірі та секундомірі. Значком блискавки зображено процес відеозйомки показів шкали часу та секундоміра.

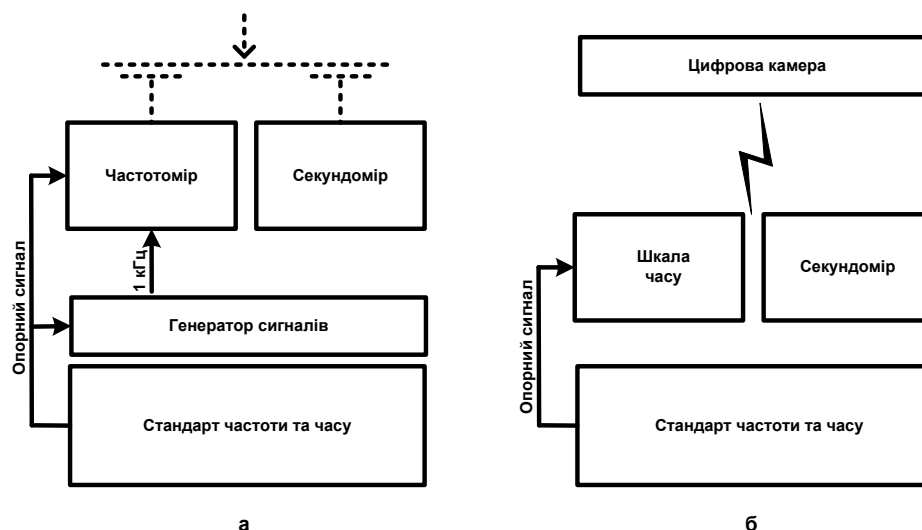


Рис. 1. Схема калібрування секундомірів:
 а – визначення постійного зміщення показів секундоміра;
 б – визначення відносного відхилення показів секундоміра

Для проведення досліджень було застосовано наступні еталонні та допоміжні засоби:

- цезієвий стандарт частоти Symmetricom 5071A зі шкалою часу (вихід 5 МГц, відносне відхилення частоти становить $5 \cdot 10^{-13}$, розширена невизначеність відносного відхилення частоти на інтервалі усереднення від 1 с до $5 \cdot 10^{-12}$);
- частотомір Agilent 53131A (діапазон частот від 0,1 до 225 МГц), використовувався в режимі підрахунку імпульсів з ручним управлінням, з подачею на нього опорного сигналу від стандарту частоти (відносна розширена невизначеність $2 \cdot 10^{-9}$);
- генератор (синтезатор) HAMEG HM8134-2, використовувався під опорним сигналом від стандарту частоти для подачі на частотомір періодичного сигналу 1 кГц (розширена невизначеність 10^{-7});
- вимірювач параметрів довкілля «Атмосфера-1» (діапазони вимірювань: температури – від 5 °С до 40 °С, вологості – від 10 % до 90 %, тиску – від 650 гПа до 1080 гПа, розширені невизначеності вимірювання становлять: для температури – 0,4 °С, для вологості – 0,3 %, для тиску – 0,8 гПа);
- цифрова камера смартфона Samsung Galaxy M21 (SM-M215FZKUSEK) з частотою зйомки 30 кадрів за секунду (використовувалася як допоміжне обладнання).

Для проведення калібрування може застосовуватися інше еталонне та допоміжне обладнання, що може забезпечити виконання необхідних функцій та точність вимірювань. При використанні стандарту частоти, який не має візуальної шкали часу, може застосовуватися синхронometr Ч7-15 або аналогічне обладнання.

Під час першого етапу були отримані значення, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Визначення постійного зміщення показів секундоміра

Покази частотоміра t_{fi}, c	Покази секундоміра t_{swi}, c	Відхилення показів секундоміра Δ_{fi}, c	Постійне зміщення показів секундоміра Δ_{ip}, c	Стандартна невизначеність постійного зміщення показів секундоміра $u(\Delta_{ip}), c$
3,073	3,10	0,027	-0,001	0,005
2,348	2,36	0,012		
2,464	2,46	-0,004		
2,174	2,17	-0,004		
2,004	1,99	-0,014		
2,051	2,03	-0,021		
1,714	1,71	-0,004		
2,681	2,67	-0,011		
2,280	2,27	-0,010		
2,667	2,69	0,023		

Відхилення показів секундоміра Δ_{fi} визначається за виразом:

$$\Delta_{fi} = t_{swi} - t_{fi} \quad (1)$$

Постійне зміщення показів секундоміра Δ_{tp} визначається за виразом:

$$\Delta_{tp} = \Delta_{tp} / 10. \quad (2)$$

Стандартна невизначеність постійного зміщення показів секундоміра $u(\Delta_{tp})$ визначається за виразом:

$$u(\Delta_{tp}) = \frac{S(\Delta_{tp})}{\sqrt{10}}, \quad (3)$$

де $S(\Delta_{tp})$ – середнє квадратичне відхилення (СКВ) відхилень показів секундоміра Δ_{tp} .

Як видно з табл. 1, постійне зміщення показів секундоміра є незначним і з великою вірогідністю є результатом впливу реакції оператора. Однак, пропускати цей етап не рекомендується, оскільки частими є випадки, коли постійне зміщення показів секундоміра може перевищувати 0,5 с.

Для проведення другого етапу було знято два відео тривалістю декілька секунд кожне (далі – перше та друге вимірювання). Перше відео знімалось в перший день спостереження, а друге відео – на другий день спостереження. Для зручності шкалу секундоміра було переведено в режим годинника. Для отримання фотографій із знятих відео було використано програму-конвертор Free video to jpg converter 5.0 виробництва компанії Digital Wave Ltd.

Результати другого етапу вимірювань наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Визначення відносного відхилення показів секундоміра

Покази шкал часу				Відносне відхилення показів секундоміра	Відносна стандартна невизначеність відхилення показів секундоміра, обумовлена частотою зйомки камери
S_{X1}	S_{S1}	S_{X2}	S_{S2}	σ_t	$w(\sigma_t)$
25.07.2022 19:02:09,767 (68529,767 с)	25.07.2022 16:42:09,000 (60129,000 с)	26.07.2022 14:24:51,800 (138291,800 с)	26.07.2022 12:04:49,000 (129889,000 с)	$-2,91 \cdot 10^{-5}$	$8,28 \cdot 10^{-7}$

Відносне відхилення показів секундоміра σ_t визначається за виразом:

$$\sigma_t = \frac{S_{X2} - S_{S2} - (S_{X1} - S_{S1})}{S_{S2} - S_{S1}}, \quad (4)$$

де S_{X1} – покази шкали часу секундоміра при першому вимірюванні, с;

S_{X2} – покази шкали часу секундоміра при другому вимірюванні, с;

S_{S1} – покази шкали часу еталону при першому вимірюванні, с;

S_{S2} – покази шкали часу еталону при другому вимірюванні, с.

Покази шкали часу записані у форматі із зазначенням дати, годин, хвилин та секунд, в дужках відображено покази цих же шкал у секундах, починаючи з першої секунди першого дня спостережень.

Як можна побачити, в табл. 1 покази шкал часу відображено з трьома знаками після коми в розряді секунд, хоча на самих фотографіях (рис. 1) покази шкал часу відображаються з точністю лише до секунди. Записи часток секунд в табл. 1 з'явилися завдяки тому, що на рис. 1 зображені не просто фотографії, відзняті в будь-який момент часу, а фотографії з розкадрованого відео, де відстань між кожним фото (кадром) становить 1/30 с

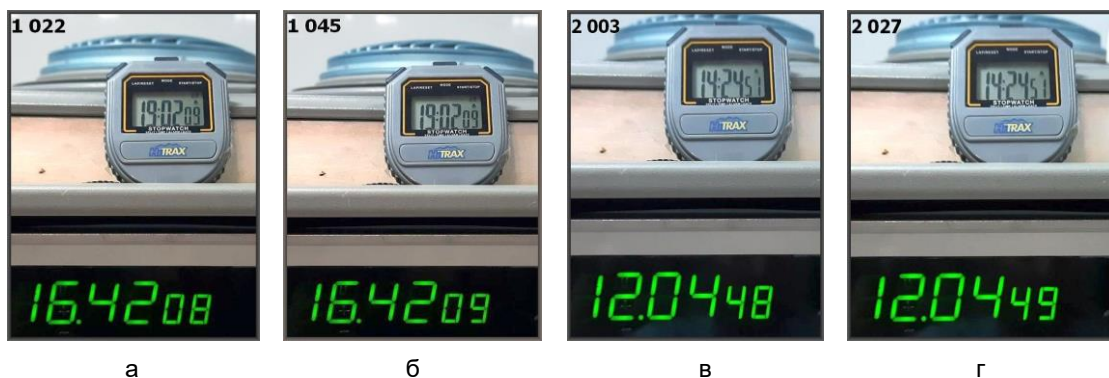


Рис. 1 Фотографії показів шкал часу еталона та секундоміра

На рис. 1, а зображено фото, на якому відбулася зміна показів шкали часу секундоміра (з 19:02:08 на 19:02:09), на рис. 1, б зображено фото, на якому відбулася зміна показів шкали часу еталону (з 16:42:08 на 16:42:09), на рис. 1, в зображено фото, на якому відбулася зміна показів шкали часу секундоміра (з 14:24:50 на 14:24:51), на рис. 1, г зображено фото, на якому відбулася зміна показів шкали часу еталону (з 12:04:48 на 12:04:49). В лівому верхньому куті фотографій проставлено порядковий номер дня спостережень та, через пробіл – порядковий номер кадру.

В табл. 2 заноситься покази шкали часу еталона з фотографій, зображених на рис. 1, б і рис. 1, г без часток секунд, а з фотографій, зображених на рис. 1, а і рис. 1, в – покази шкали часу секундоміра із частками секунд, що обчислюються за виразом:

$$t_{ps} = \frac{(N_{KS} - N_{KX})}{30}, \quad (5)$$

де t_{ps} – частки секунди, що до додаються до показів шкали часу секундоміра;

N_{KS} – порядковий номер кадру, на якому відбулася зміна показів шкали часу еталона;

N_{KX} – порядковий номер кадру, на якому відбулася зміна показів шкали часу секундоміра.

Відносна стандартна невизначеність відхилення показів секундоміра, обумовлена частотою зйомки камери обчислюється за виразом:

$$w(\sigma_t) = \frac{I_v}{\alpha \cdot (S_{S2} - S_{S1})} \quad (6)$$

де I_v – інтервал мінливості при шестикратному застосуванні показів шкали часу у виразі (4), $I_v = 0,2$ с, оскільки інтервал мінливості для кожного показу становить $\frac{1}{30}$ с, а для шести показів: $6 \cdot \frac{1}{30} \text{ с} = 0,2 \text{ с}$;

α – обраний коефіцієнт, $\alpha = \sqrt{3}$, оскільки приймається, що закон розподілу інтервалу мінливості I_v є рівномірним.

Описаний метод калібрування секундомірів може бути використаним у калібрувальних лабораторіях, які мають відповідне обладнання та еталони. Міжлабораторні порівняльні випробування (МПР) є однією з форм експериментальної перевірки діяльності лабораторій, зокрема калібрувальних, з метою визначення технічної компетентності у певному виді діяльності. Успішні результати проведення МПР для лабораторії є підтвердженням компетентності в проведенні певних видів вимірювань конкретним фахівцем на конкретному обладнанні [7-9].

В [10] представлено результати МПР калібрування електронного секундоміра HS-45 виробництва фірми Citizen Watch Co., Ltd (Японія) у точках від 30 с до 3600 с. Порівняння результатів, отриманих під час калібрування вимірювача часу десятьма лабораторіями, відбувалося за радіальною схемою протягом 2016 р. Визначені відхилення отриманих кожною лабораторією результатів та оцінено коректність отриманих результатів з урахуванням невизначеності вимірювань за допомогою критерію за статистикою функціонування для обраних інтервалів часу. Однією із складових загальної невизначеності калібрування секундоміра була поправка, зумовлена помилкою оператора при натисканні ним кнопки “старт”/“стоп” секундоміра, яка сягала 0,004 с.

5. Оцінювання невизначеності калібрування

При оцінюванні невизначеності калібрування секундоміра використані положення рекомендації [11, 12].

Математична модель вимірювання має вигляд:

$$E_{tXi} = \Delta_{Xi} + \Delta_p + \Delta_S + \Delta_f + \Delta_g + \Delta_{Xd}, \quad (7)$$

де E_{tXi} – виміряне відхилення показів секундоміра;

Δ_{Xi} – відхилення показів секундоміра, що визначається за виразом:

$$\Delta_{Xi} = \sigma_t \cdot t_i, \quad (8)$$

де t_i – інтервал часу, на якому калібрується секундомір (точка калібрування);

Δ_p – поправка, обумовлена постійним зміщенням показів секундоміра;

Δ_S – поправка, зумовлена відхиленням еталонної шкали часу (із сертифіката калібрування стандарту частоти);

Δ_f – поправка, зумовлена відхиленням показів частотоміра (із сертифіката калібрування);

Δ_g – поправка, зумовлена відхиленням частоти генератора від номінального значення (із сертифіката калібрування);

Δ_{Xd} – поправка, зумовлена дискретністю показів секундоміра (із паспорту секундоміра).

Стандартна невизначеність відхилення показів секундоміра $u(\Delta_{Xi})$, зумовлена частотою зйомки камери для i -го інтервалу вимірювання, обчислюється за виразом:

$$u(\Delta_{Xi}) = w(\sigma_i) \cdot t_i, \quad (9)$$

Стандартна невизначеність поправки, зумовленої дискретністю показів секундоміра $u(\Delta_{Xd})$ обчислюється за виразом:

$$u(\Delta_{Xd}) = d_e / \alpha, \quad (10)$$

де d_e – роздільна здатність секундоміра в точці калібрування.

Бюджет невизначеності для відхилення показів секундоміра наведений у табл. 3.

Таблиця 3. Бюджет невизначеності вимірювань для відхилення показів секундоміра E_{tXi}

Величина x_i	Оцінка x_i , с	Стандартна невизначеність $u(x_i)$, с	Розподіл	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок у невизначеність $u_i(y)$, с
Δ_{Xi}	Вираз (8)	Вираз (9)	рівномірний	1,0	$u(\delta_{Xi})$
Δ_{tp}	Вираз (2)	Вираз (3)	нормальний	1,0	$u(\Delta_{tp})$
Δ_S	Із сертифікату калібрування	$u(\Delta_S) = U/2$	нормальний	1,0	$u(\Delta_S)$
Δ_f	Із сертифікату калібрування	$u(\Delta_f) = U/2$	нормальний	1,0	$u(\Delta_f)$
Δ_g	Із сертифікату калібрування	$u(\Delta_g) = U/2$	нормальний	1,0	$u(\Delta_g)$
Δ_{Xd}	0	Вираз (10)	рівномірний	1,0	$u(\Delta_{Xd})$
E_{tXi}	$\sum x_i$				U

Внесок у невизначеність визначається за виразом:

$$u_i(y) = u(x_i) \cdot c_i \quad (11)$$

Розширена невизначеність U калібрування секундоміра обчислюється за виразом:

$$U = k \cdot \sqrt{u^2(\Delta_{Xi}) + u^2(\Delta_{tp}) + u^2(\Delta_S) + u^2(\Delta_f) + u^2(\Delta_g) + u^2(\Delta_{Xd})}, \quad (12)$$

де k – коефіцієнт охоплення ($k = 2$), що визначає інтервал, з рівнем довіри, який приблизно дорівнює 95 %, якщо припустити, що розподіл нормальний.

Бюджет невизначеності калібрування секундоміра наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Бюджет невизначеності калібрування секундоміра

Величина x_i	Оцінка x_i , с	Стандартна невизначеність $u(x_i)$, с	Розподіл	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок у невизначеність $u_i(y)$, с
Точка калібрування 30 с					
Δ_{Xi}	-0,0009	0,00002	рівномірний	1	0,00002
Δ_{tp}	-0,0006	0,0051	нормальний	1	0,0051
Δ_{Xd}	0	0,0058	рівномірний	1	0,0058
E_{tXi}	-0,0015				0,0154
Точка калібрування 600 с					
Δ_{Xi}	-0,0175	0,0005	рівномірний	1	0,0005
Δ_{tp}	-0,0006	0,0051	нормальний	1	0,0051
Δ_{Xd}	0	0,0058	рівномірний	1	0,0058
E_{tXi}	-0,0181				0,0154

Величина x_i	Оцінка x_i, c	Стандартна невизначеність $u(x_i), c$	Розподіл	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок у невизначеність $u_i(y), c$
Точка калібрування 900 с					
Δ_{x_i}	-0,0262	0,0007	рівномірний	1	0,0007
Δ_{t_p}	-0,0006	0,0051	нормальний	1	0,0051
Δ_{x_d}	0	0,0058	рівномірний	1	0,0058
$E_{t_{x_i}}$	-0,0268				0,0154
Точка калібрування 3 год					
Δ_{x_i}	-0,3147	0,0089	рівномірний	1	0,0089
Δ_{t_p}	-0,0006	0,0051	нормальний	1	0,0051
Δ_{x_d}	0	0,5774	рівномірний	1	0,5774
$E_{t_{x_i}}$	-0,3153				1,1549
Точка калібрування 1 доба (режим годинника)					
Δ_{x_i}	-2,5179	0,0715	рівномірний	1	0,0715
Δ_{t_p}	-		нормальний		
Δ_{x_d}	-		рівномірний		
$E_{t_{x_i}}$	-2,5179				0,1430

В табл. 4 свідомо опущено поправки $\Delta_s, \Delta_f, \Delta_g$, оскільки оцінка їх величин та пов'язаних з ними невизначеностей на декілька порядків менше ніж у інших величин бюджету невизначеності.

В точці калібрування 1 доба поправки $\Delta_{t_p}, \Delta_{x_d}$ не враховані, оскільки точка калібрування зазначена для режиму годинника.

Результати калібрування секундоміра наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Результати калібрування секундоміра

Інтервал часу t_i	Роздільна здатність секундоміра d_e, c	Вимірне відхилення показів секундоміра $E_{t_{x_i}}, c$	Розширена невизначеність U, c
30 с	0,01	-0,001	0,015
600 с	0,01	-0,018	0,015
900 с	0,01	-0,027	0,015
3 год	1	-0,315	1,155
1 доба (режим годинника)	-	-2,518	0,143

7. Висновки

Представлений метод з достатньою точністю дає змогу калібрувати електронні секундоміри, є економічно вигідним, дозволяючи значно заощаджувати час використання еталонного обладнання, не потребує коштів для закупівлі специфічного обладнання, а також дає змогу калібрувати секундомір в будь-якій точці діапазону вимірювань, в тому числі на довгих інтервалах, та передбачає можливість одночасного калібрування значної кількості секундомірів. Метод може бути використаним не тільки для калібрування електронних секундомірів, а і будь-яких пристроїв зі шкалою часу.

Посилання

[1] ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT).

- [2] C. M. Tsui, Y. K. Yan, and H. M. Chan Calibration of Stopwatches by Utilizing High Speed Video Recordings and a Synchronous Counter. NCSLI Measure, vol. 6, September 2011, no. 3, pp.64-71.
- [3] R. M. Graham. Stopwatch Calibrations Part I: The Direct Comparison Method. NCSLI Measure, vol. 1, March 2006, no. 1, pp. 72-73.
- [4] R. M. Graham. Stopwatch Calibrations Part III: The Time Base Method. NCSLI Measure, vol. 1, September 2006, no. 3, pp. 74-75.
- [5] R. M. Graham. Stopwatch Calibrations Part II: The Totalize Method. NCSLI Measure, vol. 1, June 2006, no. 2, pp. 72-73.
- [6] J. C. Gust, R. M. Graham, M. A. Lombardi. Stopwatch and Timer Calibrations. NIST USA Special Publication 960-12 (2009 edition), <https://tf.nist.gov/general/pdf/2281.pdf>.
- [7] ДСТУ EN ISO/IEC 17043:2014. Оцінка відповідності. Загальні вимоги до перевірки кваліфікації лабораторій (EN ISO/IEC 17043:2010, IDT).
- [8] P. Briggs. Proficiency testing for calibration laboratories. XX IMEKO World Congress “Metrology for Green Growth”, Busan, Republic of Korea, 2012, 5 p.
- [9] Velychko, O. Gordiyenko, T. The Data Evaluation of Interlaboratory Comparisons for Calibration Laboratories. In: Velychko, O. editor. Applied Aspects of Modern Metrology. London: IntechOpen, 2021, pp. 21-39, doi: 10.5772/intechopen.99489.
- [10] Velychko O., Shevkun S., Gordiyenko T., Mescheriak O. Interlaboratory comparisons of the calibration results of time meters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling systems, 2018, № 1/9 (91), p. 4-11. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121089.
- [11] ISO/IEC Guide 98–3:2008. Uncertainty of measurement. – Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
- [12] EA-04/02 M. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. EA, 2021, 78 p.