

УДК 536.532

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА БАЗІ ТЕРМОЧУТЛИВИХ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

© Котляров Володимир, Скоропад Пилип, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проведено аналітичний огляд існуючих контактних засобів вимірювання температури, зокрема термоперетворювачів на базі термочутливих кварцових резонаторів. Проаналізовано основні фактори впливу на їхні метрологічні характеристики та запропоновано способи їх покращення.

Проведен аналитический обзор существующих контактных средств измерения температуры, в частности термопреобразователей на базе термочувствительных кварцевых резонаторов. Проанализированы основные факторы влияния на их метрологические характеристики и предложено пути их улучшения.

Analytical review of the existing contact temperature measurement instruments, in particular temperature converters based on thermosensitive quartz resonators has realized. Also have analyzed the main influencing factors to their metrological characteristics and proposed ways to improve them.

Вступ. Одним з найпоширеніших параметрів, як в промисловості, так і в наукових дослідженнях, є температура, вимірювання якої становить левову частку серед усіх видів вимірювань. Існує багато методів визначення цього параметра: за допомогою контактних засобів вимірювання (термоелектричні та терморезистивні перетворювачі температури, термістори, оптоволоконні сенсори тощо) [1] і різноманітних методів термометрії за випромінюванням (пірометри, тепловізори) [2, 3]. Вибір оптимального, для певних умов вимірювального експерименту, методу вимірювання температури зумовлений необхідною точністю та доступністю об'єкта вимірювання.

Для прецизійних вимірювань застосовувати безконтактні методи вимірювання температури нецільно, оскільки такі засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) мають істотний недолік — неоднозначність визначення термодинамічної температури об'єкта за терморадіаційним потоком від нього, який реєструється пірометром, що, передовсім, і визначає появу методичної похибки вимірювання [4].

Одними із прецизійних контактних вимірювальних термоперетворювачів є перетворювачі з частотним вихідним сигналом, що забезпечують високу завадостійкість та точність вимірювання температури, зокрема, на основі прецизійного перетворення частоти на код та відсутності втрат інформації під час її перетворення та передавання через лінії зв'язку.

Серед термоперетворювачів з частотним вихідним сигналом слід виділити перетворювачі, що створені на

основі термочутливих кварцових резонаторів (ТКР), використання яких, на наш погляд, є перспективним. Однак відсутність необхідної інформації про метрологічні характеристики ТКР, таких як дані про характер залежності похибки вимірювання від гістерезису та стабільності їх номінальної статичної характеристики перетворення (НСХП) є основним гальмом у створенні високоточних термометрів на їх основі, що і визначає головні завдання та мету виконуваних досліджень.

1. Аналітичний огляд стану проблеми метрологічних характеристик контактних термоперетворювачів

1.2. Термоперетворювачі опору. Такий ЗВТ, чутливим елементом (ЧЕ) якого переважно є метал (мідь, нікель або платина) і опір якого залежить від температури, називається термоперетворювачем опору [5]. Опір таких перетворювачів збільшується зі зростанням температури, тобто вони мають додатний температурний коефіцієнт опору (ТКО). Від інших перетворювачів термоперетворювачі опору відрізняються високою точністю. Деякі з них дають змогу виконувати вимірювання з похибкою, що не перевищує $\pm 0,026$ К і мають нестабільність опору в часі меншу, ніж $\pm 0,1$ К/рік, а окремі зразки і до $\pm 0,003$ К/рік [6,7].

Велике значення вимірювального струму, з одного боку, збільшує абсолютну чутливість перетворювача, пропорційно до вимірювального струму, а з іншого боку – спричиняє додаткове нагрівання перетворювача, що викликає додаткову похибку. Для усунення

впливу на результат вимірювання неінформативного опору комутаційних дротів та перехідних контактів, з метою підвищення точності вимірювання, необхідно використовувати чотирипровідну схему комутації термоперетворювача [8].

1.2. Перетворювачі термоелектричні. Основною відмінністю цих термоперетворювачів (чутливим елементом яких є термопари) є широкий температурний діапазон (від мінус 270 °С до понад 2000 °С) і незначний внутрішній опір, завдяки чому істотно знижуються неінформативні електромагнітні наведення на перетворювач термоелектричний (ПТ) [9].

Незважаючи на істотну перевагу – широкий діапазон вимірювання – у ПТ є й істотні недоліки: важко виміряти температуру з похибкою, нижчою за ± 1 К [10]; недоліком також є й складність реалізації процесу вимірювання, на результат якого, передовсім, впливає нестабільність підтримування температури злутів порівняння; більшість ПТ мають нелінійну НСХП, але порівняно з іншими, суттєвішими недоліками, цей недолік не домінує [11].

З метою підвищення достовірності й точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами, вимірювання їх вихідної електрорушійної сили слід виконувати компенсаційним методом, змінюючи при цьому полярність, щоб уникнути негативного впливу неінформативних термоелектричних ефектів на результат вимірювання.

1.3. Термістори. Для вимірювання температури широко застосовують і напівпровідникові терморезистори, які називають термісторами. Їхній опір, на відміну від металевих термоперетворювачів, суттєво змінюється з температурою. Термістори, зазвичай, мають нелінійну вольтамперну характеристику та від'ємний температурний коефіцієнт опору. Існують термістори й з додатним ТКО, які називають позисторами [6].

Терморезистори виготовляються на основі напівпровідникових оксидів металів, спресованих для одержання заданої форми. Механічна міцність і захист від впливу навколишнього середовища забезпечується за допомогою металевого корпусу або захисного ізолювального шару. Термістори, порівняно з іншими типами температурних перетворювачів, мають високу чутливість, але низьку відтворюваність НСХП [6]. Згідно з [5], типове значення ТКО для термісторів становить -5 %/К, тоді як для платинового термоперетворювача опору ТКО не перевищує значення

$+0,3925$ %/К. Важливою перевагою термісторів є їхній високий опір навіть за криогенних температур. До переваг також можна зарахувати простоту виконання. Але є у термісторів і суттєві недоліки: низька точність вимірювання та досить вузький діапазон вимірюваних температур: від мінус 60 °С до 150 °С (для деяких зразків він розширений до 300 °С) [12].

Залежність опору термістора від температури описується експоненційною залежністю:

$$R_q = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (1)$$

де A – стала, що залежить від фізичних властивостей матеріалу і габаритів, а B – коефіцієнт, що залежить від фізичних властивостей матеріалу термістора [5].

Зауважимо, що термістори мають низьку відтворюваність НСХП, тобто їхні характеристики можуть істотно відрізняються від зразка до зразка. Для кожного окремого термістора необхідно визначити коефіцієнти A та B і внести їх в паспорт термоперетворювача.

Під час вибору термістора необхідно враховувати його коефіцієнт власного нагрівання. Для зниження похибки, викликані власним нагріванням термістора, необхідно збільшувати площу його поверхні або ж зменшувати вимірювальний струм. Однак це приводить або до збільшення теплової інерційності термоперетворювача на основі термістора, або, відповідно, до зменшення його абсолютної чутливості.

Із залежності (1) можна зробити висновок про те, що термістор має істотний недолік, який полягає у тому, що його НСХП – нелінійна. Хоча вплив нелінійності і можна зменшити апаратно-програмним шляхом, використовуючи нелінійні апроксимуючі функції, коефіцієнти яких підбирають методом найменших квадратів або іншими методами параметричної ідентифікації, але ці методи є дуже складними і в будь-якому випадку повністю усунути нелінійність неможливо. Як наслідок – низька точність під час вимірювання температури [7].

1.4. Термочутливі кварцові резонатори. Одними із перспективних засобів для прецизійного вимірювання температури, які позбавлені багатьох розглянутих вище недоліків традиційних термоперетворювачів, на наш погляд, є ТКР.

Термочутливі кварцові резонатори мають невисоку теплову інерційність, високу точність та поріг чутливості до $\pm 10^{-6}$ К [13], прості у застосуванні. Для використання ТКР його достатньо під'єднати двома

дротами до генератора. Такий резонатор має високу ударну та вібраційну міцність, що дає змогу проводити вимірювання температури в складних експлуатаційних умовах [13].

З метою докладного визначення метрологічних та експлуатаційних характеристик ТКР його дослідження слід розпочати із ознайомлення з фізичними властивостями чутливого елемента, на основі якого створено сам ТКР.

Кристалічний кварц хімічно стійкий, він не розчиняється в кислотах, за винятком плавикової кислоти [14]. Існує в природі в чотирьох модифікаціях. З них в техніці в основному застосовується низькотемпературна модифікація – α -кварц, що характеризується наявністю п'єзо ефекту.

Орієнтація ЧЕ щодо кристалографічних осей, яка найістотніше визначає його властивості, характеризується терміном «зріз». Для отримання різноманітних зрізів кварцу, які відрізнятимуться, наприклад, визначеними НСХП, важливу роль відіграють залежності констант пружності й гнучкості від температури [15, 16]. Зрізом називають таку групу кристалографічних орієнтацій ЧЕ, за яких вони мають близькі електрофізичні характеристики при тому самому виді власних коливань.

Деякі типи зрізів кварцу показано на рис. 1.

За типом зрізу кварцу резонатори можна поділити на термостабільні кварцові резонатори (КР) і резонатори, частота яких змінюється залежно від температури (ТКР). Власне, останні і є об'єктом наших досліджень.

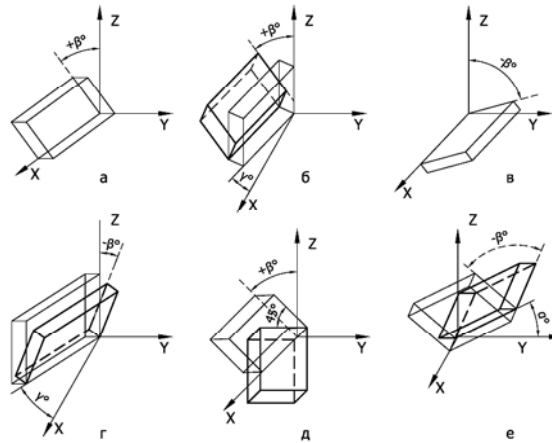


Рис. 1. Найпоширеніші типи зрізу кварцу та їх позначення:
 а – зріз $yx\ell/\beta^\circ$ (AT, CT); б – зріз $yxbl/-\gamma^\circ/\beta^\circ$ (IT); в – зріз $yx\ell/-\beta^\circ$ (BT, DT); г – зріз $yxbl/-\gamma^\circ/-\beta^\circ$ (RT);
 р – зріз $yx\ell s/\beta^\circ/+45^\circ$ (GT); д – зріз $xy\ell s/\alpha^\circ/-\beta^\circ$ (MT, NT)



Рис. 2. Баланс складових граничної абсолютної похибки вимірювання температури ТКР

2. Аналіз метрологічних характеристик ТКР.

Аналіз метрологічних характеристик показує, що в граничну абсолютну похибку ТКР входять такі основні складові: похибка градування, похибка нелінійності НСХП, похибка від нестабільності НСХП ТКР, похибка, викликана зміною потужності, що розсіюється в резонаторі, а також похибка, викликана старінням ТКР. Ці похибки можна достатньо ефективно мінімізувати, усунувши вплив систематичних складових похибок перетворювача та врахувавши індивідуальні особливості його НСХП, а також періодичною перевіркою ТКР з подальшою корекцією його індивідуальної СХП. На результат вимірювання також впливають динамічні похибки, зокрема, похибка від інерційності чутливого елемента перетворювача та похибка від гістерезису його НСХП. На рис. 2. зображено баланс складових граничної абсолютної похибки вимірювання температури ТКР.

Розглянемо докладніше основні складові похибки термочутливого кварцового резонатора.

2.1. Похибка градування. Похибка градування термоперетворювачів на базі ТКР визначається в основному похибкою зразкових засобів вимірювання, що застосовуються для перевірки. Сучасний стан апаратури для вимірювання частоти повністю задовольняє вимоги кварцової термометрії.

У робочому діапазоні досліджуваного нами ТКР (від мінус 50 °С до 125 °С) існує декілька реперних точок, в яких можна проводити метрологічну перевірку ТКР. Серед цих точок особливо вирізняється потрійна точка води. Її відтворюваність досягає $\pm 0,00002$ К, а похибка не перевищує $\pm 0,0001$ К [17]. Для градування ТКР за температур, відмінних від реперних, використовують термостати. Похибка градування таких приладів, як правило, не перевищує $\pm 0,01$ К [18].

2.2. Похибка нелінійності. Кварцові перетворювачі температури виготовляють як на основі ТКР з лінійною НСХП, так і на основі ТКР з нелінійною НСХП [13]. Коли йдеться про лінійність НСХП, то мають на увазі нелінійність у вузькому діапазоні температур. Наприклад, для вимірювання температури тіла людини не потрібно виготовляти термометр з широким діапазоном температур (наприклад, від мінус 50 °С до 100 °С), а достатньо забезпечити діапазон $35\div 40$ °С. В цьому діапазоні НСХП можна вважати лінійною, а відхилення НСХП від прямої не є суттєвим.

Вплив похибки від нелінійності можна зменшити до нехтовно малого значення, використовуючи різноманітні апарати та методи математичних розрахунків, зокрема за допомогою методу рівномірного наближення та кусково-лінійної апроксимації [19]. А завдяки сучасним засобам обчислювальної техніки практична реалізація цього не викликати жодних проблем.

2.3. Похибка від нестабільності. Оскільки ТКР переважно використовується протягом великих інтервалів часу (місяць, півроку, рік), під час визначення сумарної похибки слід враховувати довгострокову нестабільність. Похибка від нестабільності визначається передусім старінням ТКР. На інтенсивність старіння впливає низка факторів: час його роботи та попередні термотренування, потужність, яка розсіюється в ЧЕ, максимальна температура середовища тощо.

На графіках частотно-часової характеристики більшості резонаторів можна виділити дві ділянки: початкову, з істотною зміною частоти, і ділянку, в якій швидкість старіння ТКР уповільнюється. На основі аналізу даних, отриманих для вузького діапазону в околі 0 °С (табл. 1), можна оцінити старіння ТКР, описаних в роботі [21], значенням $\pm(0,02\dots 0,04)$ К/місяць, прогнозуючи уповільнення старіння до значення $\pm(0,2\dots 0,4)$ К/рік. Зі збільшенням вимірювального діапазону до $0\div 70$ °С старіння деяких ТКР зростає вдвічі, а за максимальної $\theta_{max}=125$ °С – втричі.

Для зменшення похибки від нестабільності частоти, зумовленої старінням ТКР, в перетворювачі температури слід використовувати ТКР з високою добротністю Q, що визначається параметрами еквівалентної схеми ТКР як коливної системи [15]. Необхідно також враховувати, що інтенсивність процесів, які викликають поверхневі, структурні й контактні зміни в ЧЕ, знизиться, якщо резонатори ЧЕ використовують для вимірювання низьких температур, а КР працює в умовах низьких температур.

Підвищена інтенсивність старіння (зміна початкової частоти ТКР) спостерігається протягом перших кількох тижнів або місяців після їх виготовлення. Тому в термоперетворювачах потрібно використовувати попередньо зістарені ТКР. Також слід відкидати ТКР з надто високою нестабільністю за максимальної робочої температури. У схемах генераторів перетворювачів температури необхідно використовувати елементи, за яких зміна частоти від старіння ТКР не буде суттєвою, навіть після 5–6 тижнів неперервної роботи кварцового генератора.

Таблиця 1

Нестабільність частоти ТКР, викликані старінням (при температурі 0 °С)

Тип ТКР	Значення нестабільності	Джерело
Герметизовний, описаний в роботі [20]	$\pm(0,02 \dots 0,03)$ К за місяць	[21]
Те саме	$\pm 0,03$ К за місяць	[22]
Герметизований (зріз LC, $f_0=28,2$ МГц)	Менше ніж $\pm 0,01$ К за місяць	[23]
Вакуумований, описаний в роботі [20]	Менше ніж $\pm 0,01$ К за рік	[21]
Вакуумований (зріз Y, $f_0=5$ МГц)	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$ К за місяць	[24]

Ефективним засобом зменшення похибки від старіння є періодична перевірка ТКР з подальшою корекцією НСХП.

2.4. Динамічна похибка. Вимірювання температури можуть проводитись в середовищах, для яких характерна різна швидкість зміни температури: від 10^{-4} °С/год (для ультрастабільних термостатів) до 10^3 °С/год та вище. Наприклад, для ТКР, описаних в роботі [20], швидкість зміни температури досліджуваного середовища, згідно з технічним завданням, не повинна перевищувати значення 20 °С/хв. Якщо це значення перевищити, то збільшиться нерівномірність температурного поля в ТКР (зміниться градієнт температури в ЧЕ), виникнуть механічні коливання, які змінять частоту ТКР, що стане причиною динамічної похибки. Така зміна частоти в першому наближенні лінійно залежить від швидкості зміни температури досліджуваного середовища:

$$\frac{\Delta f}{f} = k \frac{dq}{dt}, \tag{2}$$

де k – стала, що залежить від конструкції ТКР.

У ТКР, описаних в роботі [20], динамічна похибка мала такі значення: при зміні температури досліджуваного середовища 20 К/год та 20 К/хв динамічна похибка становила $\pm 0,002$ К та $\pm 0,1$ К відповідно. Ці дані вказують на те, що якщо швидкість буде гранично наближеною до технічного завдання на ТКР, описаних у роботі [21], то цією похибкою не можна нехтувати. В цих експериментах попередньо підібрану швидкість зміни температури контролювали низькоінерційним термоперетворювачем та таймером. Динамічну похибку можна знизити, зокрема зменшенням розмірів ЧЕ ТКР.

Зміна частоти ТКР через появу градієнта температури переважно відновлюється протягом часу, що не перевищує декількох годин. Тому термоперетворювач за деякий час до початку особливо точних вимірювань слід помістити в досліджуване середовище

або в середовище, температура якого близька до температур досліджуваного середовища.

Оскільки наші метрологічні дослідження не мають на меті вимірювання динамічних температур досліджуваного середовища, то динамічною похибкою можна знехтувати.

2.5. Похибка від зміни потужності, що розсіюється в резонаторі. Для кварцового резонатора зміна амплітуди коливань суттєво не впливає на вихідний сигнал, проте, залежно від варіації потужності, що розсіюється в резонаторі, змінюється його власна температура. Відповідно – і його вихідна частота. Зміну цієї частоти Δf_0 можна визначити із залежності [25]:

$$\Delta f_0 = \frac{U_p S}{4k s A R_e q_0^3} \cdot \Delta U_p, \tag{3}$$

де U_p та ΔU_p – напруга на резонаторі і зміна цієї напруги, В; S – чутливість ТКР, Гц/К; k – коефіцієнт, що залежить від конструкції, умов охолодження резонатора; s – стала Стефана–Больцмана; A – площа поверхні п'єзоелемента, см^2 ; R_e – еквівалентний активний опір ТКР, кОм; q_0 – температура, К. Наприклад, значення зміни частоти $\Delta f_0 = \pm 1,1$ Гц розраховане при $U_p = 3$ В; $\Delta U_p = 0,001$ В; $S = 200$ Гц/К; $k = 0,9$; $s = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт· см^{-2} ·К $^{-4}$; $A = 1$ см^2 ; $R_e = 1$ кОм; $q_0 = 300$ К. А це відповідає температурній похибці $\pm 0,005$ К.

Як бачимо із залежності (3), похибка, викликана зміною потужності, що розсіюється в ТКР, зменшується зі збільшенням температури і зі зменшенням значення чутливості.

Для зменшення цієї похибки необхідно забезпечити постійність амплітуди напруги на ТКР, зменшити абсолютне значення струму, яке протікає в резонаторі, а також забезпечити стабільність напруги джерела живлення.

2.6. Похибка від інерційності чутливого елемента. В разі використання контактних методів вимірювання температури виникає похибка від інерційності ЧЕ перетворювача температури, пов'язана з тим, що реальний термоприймач не може миттєво набувати значення температури середовища, а тому реальну температуру середовища термоприймач фіксуватиме з певною затримкою в часі. Значення затримки залежить від конструкції ТКР, агрегатного стану досліджуваного середовища, умов теплообміну між середовищем і ЧЕ.

Для герметизованих ТКР у металевому корпусі [20], значення показника теплової інерційності, що дорівнює 36,8 % від асимптотичного значення вимірюваної температури, становить $5 \div 6$ с у воді [21] та $72 \div 80$ с у повітрі [20]. Значення цього показника у разі вимірювання температури за допомогою вакуумованих ТКР в скляному корпусі [20] становить 30 с [20] та $90 \div 100$ с [21] у воді і 180 с у повітрі [20].

Для вакуумованого ТКР в скляному корпусі, описаного в роботі [20], значення коефіцієнта теплової інерційності, під час вимірювання температури у воді, що циркулює, становить 90 с. Інтервал часу, необхідний для встановлення показів з похибкою до $\pm 0,01$ К, при вимірюванні температури в спокійному повітрі не повинен перевищувати 30 хв [20]. Зменшити теплову інерційність можна завдяки зменшенню габаритних розмірів, а також завдяки використанню ТКР без захисного корпусу (в повітряному середовищі), а це, своєю чергою, може спричинити частотну нестабільність.

2.7. Похибка від гістерезису. Особливе місце в балансі похибок займає похибка від впливу самої перетворювальної величини – температури. Цей вплив залежить від діапазону вимірювання, а також від того, чи ТКР постійно міститься у вимірюваному середовищі, чи ні. Проблема полягає в тому, що температура може змінити структуру перетворювача настільки, що під час повторних вимірювань тієї самої температури результати відрізнятимуться від попередніх, що призведе до виникнення похибки. Ця похибка, викликана впливом зміни вимірвальних

температур, проявляє себе через гістерезис, тобто через незбіг показів термометра при вимірюванні тієї самої температури після його термоциклу. В ширшому сенсі явище гістерезису полягає у неможливості відтворити частоту резонатора при повторному вимірюванні тієї самої температури. Фізична сутність явища гістерезису остаточно не з'ясована [26].

Похибка від гістерезису в основному залежить від перепаду температур і описується виразом [13]:

$$\Delta_{\text{гистер}} = K_{\text{ТН}}(q_{\text{max}} - q_{\text{min}}) = K_{\text{ТН}} \cdot \Delta q, \quad (4)$$

де Δq – діапазон температур термоциклу, в якому здійснено термострибок, К; $K_{\text{ТН}}$ – коефіцієнт нециклічності термоперетворювача, що характеризує старіння резонатора і визначається із залежності [27]:

$$K_{\text{ТН}} = (L'_k - L_k) / L_k, \quad (5)$$

де L_k – значення індуктивності (за температури 20°C) еквівалентної схеми ТКР, Гн; L'_k – значення індуктивності еквівалентної схеми ТКР за температури 20°C після декількох циклів вимірювання температури в заданому діапазоні температур [27].

В загальному випадку цей коефіцієнт залежить від орієнтації ЧЕ в конструкції ТКР. Для ТКР зрізу LC він лежить в межах $(0,5 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$. Для ТКР з основною частотою 28 МГц після термоциклу ($-80 \rightarrow +240 \rightarrow -80$) $^\circ\text{C}$ зміщення початкової частоти становило 20 Гц, що при чутливості 10^3 Гц/К становить: $\Delta_{\text{гистер}} = \pm 0,02$ К; для ТКР з основною частотою 5 МГц та і чутливості 200 Гц/К, похибка від гістерезису також становить: $\Delta_{\text{гистер}} = \pm 0,02$ К, але після термоциклу ($0 \rightarrow +100 \rightarrow 0$) $^\circ\text{C}$.

Для ТКР з ЧЕ LC-зрізу ($f_0 = 28$ МГц) в діапазоні температур від мінус 80°C до 250°C похибка від гістерезису становить $\pm 0,05$ К, а при зміні температури на кожні 10°C у цьому самому діапазоні температур ця похибка приблизно дорівнювала $\pm 0,001$ К [23]. Для вакуумованих ТКР, за даними роботи [20], в діапазоні температур $0 \div 100^\circ\text{C}$ похибка від гістерезису дорівнює $\pm(0,001 \dots 0,003)$ К після термотренування і відбору резонаторів, а без відбору ТКР ця похибка становить $\pm 0,02$ К.

Таблиця 2

**Похибка від гістерезису
в деяких типах кварцових резонаторів**

Тип резонатора	ТКР, зріз Y	ТКР, зріз LC	КР, зріз AT
Похибка від гістерезису, К	$\pm 0,03 \dots 0,04$	$\pm 0,01 \dots 0,02$	$\pm 0,005 \dots 0,01$

В роботі [28] досліджена похибка від гістерезису для резонаторів з різними зрізами (Y , LC , AT) в діапазоні температур від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (випробували без відбору по 5 резонаторів різного зрізу з $f_0 = 5\text{ МГц}$). Отримані результати наведено в табл. 2.

Похибку від гістерезису також досліджено у вужчих діапазонах (зокрема, в діапазонах $0\div 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $50\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) і з меншою кількістю термоциклів. Ці дослідження показали, що гістерезис проявляється в еквідистантному зсуві НСХП, значення якого приблизно пропорційне до значення термоциклу. У деяких резонаторів проходить незворотна зміна частоти, у інших – значення частоти відновлювалось за кілька годин. Збільшення кількості термоциклів на деякі резонатори (наприклад, з 2 до 4) викликає збільшення похибки (у цьому випадку на 25–40 %).

З наведених даних можна зробити висновок, що для п'єзокварцових резонаторів значення похибки, викликані гістерезисом, відрізняється залежно від типу зрізу п'єзоелемента, зокрема, від значення його температурного коефіцієнта частоти 1-го порядку d_f' , що визначається такою залежністю [28]:

$$d_f^{(n)} = \frac{1}{n! f_0} \left(\frac{\partial^n f}{\partial q^n} \right)_{q=q_0}, \quad (6)$$

де q і q_0 – поточне і калібрувальне значення температури. Можна зауважити певну кореляцію варіаційних рядів значень похибки, викликані гістерезисом, і значень d_f' для ТКР зі зрізами Y ($d_f' \approx 90 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$), LC ($d_f' \approx 35 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$) та термо-стабільних AT ($d_f' \approx 0$). Також варто зазначити, що для ТКР значення похибки від гістерезису, як величини випадкової, відрізняється не тільки залежно від типу зрізу ЧЕ, але й змінюється від зразка до зразка.

Вказати причину виникнення похибки, викликані гістерезисом, важко. Це сукупність факторів, що охоплюють механічні напруження на поверхні кристала й електродів, непружні процеси в тримачах, залишкові деформації струмопідводів від кристала кварцу до виводів перетворювача.

Істотно впливає на значення похибки, викликані гістерезисом, технологія виготовлення резонаторів [13, 15, 27]. У роботі [29] для зменшення похибки від гістерезису перетворювача пропонують сам перетворювач обробити за допомогою обладнання, яке потребує значних матеріальних затрат. А саме:

- очищення моноблока кварцу шляхом електродифузії при температурі $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ з прикладанням постійної напруги 5 кВ протягом 8 годин до електродів, які розміщено на поверхні моноблока;
- термоцикування в діапазоні криогенних температур.

Здійснити перераховані вище операції в нестаціонарних або заводських умовах важко. Простішим способом зменшити вплив гістерезису на сумарну похибку можна шляхом відбору ТКР з нижчим значенням похибки від гістерезису, а також з використанням режимів термотренування. Ще одним способом зменшення похибки є звуження значень температур термоциклу, а також збільшення їх кількості [15, 28].

Оскільки похибка від гістерезису є важкопрогнозованою [28], пропонуємо, використовуючи сучасні засоби обчислювальної техніки, зберігати історію вимірювань температури за допомогою ТКР та на її основі обчислювати поточні значення гістерезису. Для цього потрібно попередньо ретельно дослідити вплив температурного циклу на похибку від гістерезису і зробити висновок про можливість або неможливість визначати похибку від гістерезису за допомогою попередньої температурної історії. Маючи попередню температурну історію та пов'язану з цією історією похибку від гістерезису, можемо надалі враховувати її під час одержання результату вимірювання температури.

Висновки. Обґрунтовано доцільність використання ТКР у термометрії.

Встановлено, що похибка від впливу гістерезису на ТКР досягає $\pm 0,02\text{ К}$, що у балансі граничної абсолютної похибки вимірювання температури становить понад 50 %.

Проаналізовано основні способи мінімізації похибки від гістерезису ТКР, що дає змогу зменшити граничну абсолютну похибку вимірювання температури.

Показано перспективність використання ТКР для створення прецизійних термоперетворювачів, що працюють в широкому діапазоні температур і можуть застосовуватись для оснащення ними метрологічних лабораторій Держспоживстандарту України.

1. *Вимірювання температури: теорія та практика* / Я. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник. – Львів : Бескид Біт, 2006. – 560 с. 2. *Гордов А. Н. Основи пирометрії* / Гордов А. Н. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1971. – 448 с. 3.

- Ллойд Дж. Системы тепловидения / Дж. Ллойд ; пер. с англ. под ред. А. И. Горячева – М. : Мир, 1978. – 416 с. 4. <http://www.rto.ru/ru/about.htm> 5. Мэклин Э. Д. Терморезисторы / Мэклин Э. Д. – М. : Радио и связь, 1983. – 208 с. 6. Шашков А. Г. Терморезисторы и их применение / Шашков А. Г. – М. : Энергия, 1967. – 320 с. 7. Суханова Н. Н. Полупроводниковые термопреобразователи с расширенным диапазоном рабочих температур / Н. Н. Суханова, В. И. Суханов, А. Я. Юровский // Датчики и системы. – 1999. – № 7. – С. 49–53. 8. Зайцев Ю. В. Полупроводниковые электрические преобразователи / Зайцев Ю. В. – М. : Радио и связь, 1985. – 120 с. 9. Сосновский А. Г. Измерение температур / А. Г. Сосновский, Н. И. Столярова – М. : Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1970. – 258 с. 10. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювання неелектричних величин / Євген Степанович Поліщук. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2000. – 360 с. 11. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / Преображенский В. П. – М. : Энергия, 1978. – 704 с. 12. Шефтель И. Т. Терморезисторы / Шефтель И. Т. – М. : Наука, 1973. – 416 с. 13. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики / Малов В. В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с. 14. <http://www.sktbelra.ru/> 15. Смагин А. Г., Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А. Г. Смагин, М. И. Ярославский. – М. : Энергия, 1970. – 488 с. 16. Бехман Р. Температурные коэффициенты высших порядков для упругих констант и модулей альфа-кварца / Р. Бехман, А. Д. Баллато, Т. И. Лукашек // Труды Института радиоинженеров. – 1962. Т. 50. № 8. С. 1853-1854. 17. <http://www.tcmcom.ru/catalog/wide/383> 18. <http://www.etalonpribor.com.ua/kalibrator/termostat.html> 19. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер; пер. с англ. В. П. Носко – М. : Мир, 1980. – 456 с. 20. Пекаръ И. К.–И. Кварцевые резонаторы для измерения температуры / И. К.–И. Пекаръ, М. И. Ярославский // Информационно-справочный листок № 001459, Серия «Радиокомпоненты». 1970. – 3 с. 21. Пекаръ И. К.–И. Термочувствительные кварцевые резонаторы для измерения температуры / И. К.–И., М. И. Ярославский // Заводская лаборатория. – 1971. Т. 37. – № 8. С. 986–987. 22. Аушев А. Н. Высокостабильный генератор для кварцевой термометрии / А. Н. Аушев // Труды Института экспериментальной метрологии. – 1974. №51. – С. 31–37. 23. Quartz thermometer 2801A. Проспект фірми Hewlett–Packard. С. 1 – 12. 24. Измерительный комплекс для исследования старения прецизионных кварцевых резонаторов / В. П. Багаев, Л. Е. Ивлев, Э. М. Фромберг [и др.] // Электронная техника. Сер. 9. Радиокомпоненты. – 1971. – № 1. – С. 45–51. 25. Голембо В. А. Частотные преобразователи кварцевых термометров / В. А. Голембо, Я.Н. Гнатив // Отбор и передача информации. – 1971. № 27. – С. 74–79. 26. Пекаръ И. К.–И. Исследования и разработка термочувствительных кварцевых резонаторов : Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук / И. К.–И. Пекаръ, – Воронеж, 1972. – 24 с. 27. Назаров Л. С. Радиоматериалы и радиодетали: учеб. пособ. [для средн. проф.-техн. учеб. заведений] / Л. С. Назаров, Н. В. Никулин – М. : Высш. школа, 1976. – 232 с. 28. Голембо В. А. Пьезокварцевые аналого-цифровые преобразователи температуры / Голембо В. А., Котляров В. Л., Швецкий Б. И. – Львов : Вища школа, 1977. – 172 с. 29. Грабар Ю. Й. Реалізація високоточних вимірювань температури за допомогою п'єзокварцових термометрів: автореф. дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук : спец. 05.11.15 «Метрологія і метрологічне забезпечення» / Грабар Юлія Йосипівна. – Харків, 1999. – 21 с.