

Автоматизований засіб для вимірювання дуже малих коливань температури з допомогою платиногового термометра опору

Проф., д.т.н. С. Яцишин, асп. Г. Федорчук
Національний університет «Львівська політехніка»

Abstract. The instability influence factors of platinum resistance thermometers as the most accurate of the known temperature transducers are analyzed. Possibilities of informative signal processing by means of specialized board are estimated by using the noise performance.

Key words: platinum resistance thermometers, temperature transducers

Вступ. Вимірювання температур проводиться при дослідженні різноманітних фізичних та хімічних процесів у науці чи виробництві. На сьогоднішній день є чимало засобів для вимірювання температури. Одними із найпоширеніших є термометри з терморезистивними первинними перетворювачами.

Терморезистивні перетворювачі займають чільне місце серед засобів вимірювання температури, оскільки вони є стабільні, дешеві та прості в виробництві. Найбільш високу точність вимірювання температури забезпечують платинові терморезистивні перетворювачі. Тому вважаємо доцільним дослідження методів і засобів вимірювання температури за допомогою платинових термометрів опору.

Метою праці є вивчення чинників, що впливають на метрологічні характеристики засобів вимірювання дискретно малих значень температури з допомогою платинових термометрів опору.

Основи вимірювання температури за допомогою терморезистивних перетворювачів.

Принцип дії будь-якого терморезистивного перетворювача базується на здатності металів та напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури.

Термометр опору являє собою дротяний або плівковий резистор, який має відому залежність електричного опору від температури. Найпоширенішим видом термометрів опору вважаються платинові термометри опору (далі за текстом – ПТО). Це пояснюється притаманною їм низкою переваг: добра відтворюваність електричних характеристик, високі стійкість до корозії та точність.

Для ПТО існує 2 температурні області, що описуються чітко визначеними поліномами. За допомогою цих поліномів можна визначити електричний опір сенсора в залежності від температури.

Перша робоча область (від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) описується наступним поліномом [1]:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) \cdot T^3). \quad (1)$$

Для другої робочої області (від $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $850\text{ }^{\circ}\text{C}$) справджується вираз [1]:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \quad (2)$$

де R_0 – електричний опір сенсора при температурі 0°C .

Коефіцієнти до формул 1 і 2 є такими:

$$A = 3.9083 \cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}, \\ B = -5.775 \cdot 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}, C = -4.183 \cdot 10^{-12}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-3}$$

Ще однією перевагою ПТО є практично лінійна номінальна статична характеристика.

• Стабільність ПТО.

Однією з основних проблем, що виникає при роботі з ПТО, є обмежена довготермінова стабільність. Основні властивості ПТО та процесів, що впливають на стабільність опору, найбільш інтенсивно вивчали у 80-их роках 20 століття. Найбільш вивченими процесами є окислення поверхні платини та загартовування вакансій кристалічної ґратки при швидкому охолодженні від високих температур. На стабільність ПТО також впливають виникнення дефектів і дислокацій в платині, забруднення платини домішками, електричні втрати через ізоляційні матеріали чутливого елемента.

• Окислення платини.

Коли мова йде про точні вимірювання опору платини в широкому діапазоні температур, то навіть незначне окислення поверхні дроту призводить до зниження стабільності результатів і повинно бути прийняте до уваги.

Хімічна взаємодія платини та кисню – складний процес, який супроводжується виникненням оксидів, найбільш відомим із яких є PtO , Pt_3O_2 , PtO_2 . Швидкість окислення платини залежить від тиску кисню та швидкості його доступу до платиногового первинного перетворювача. Доступ кисню до платини може бути обмежений наявністю на поверхні платини інших металів і сполук. Тому слід очікувати більший ефект окислення для термометрів з високочистої платини.

Дослідження окислення чутливого елемента ПТО [2] показали, що оптимальний тиск кисню в термометрі становить 11 кПа, виходячи, з одного боку, із зниження інтенсивності окислення платини, а з іншого, із необхідності повного окислення домішок, котрі можуть викликати забруднення платиногового дроту. В роботах по дослідженню окислення платини і його впливу на стабільність ПТО виділяють 2 типи окислення з утворенням двомірного і тримірного оксиду. Найбільш інтенсивне утворення тримірного оксиду PtO_2 відбувається в діапазоні температур $300 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температурах вище від $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ починається розпад оксиду. Опір термометра може змі-

нитися внаслідок окислення на декілька мК в температурному еквіваленті. Є також дані про утворення двошлірного оксиду в діапазоні 20 – 300 °С, розпад якого починається при температурі 450 °С. Експерименти Р. Беррі по довготривалому використанні ПТО при температурах 100 і 200 °С показали, що опір 25-омного термометра завдяки окисленню підвищується на 60–80 мкОм і знижується до початкового після відпалювання при 450 °С [3].

Загалом здатність термометрів опору до окислення залежить від тиску кисню в термометрі, діаметра платиного дроту чутливого елемента, конструкції чутливого елемента. Чим тонший дріт, тим сильніше відчутний ефект окислення на загальному опорі термометра.

- **Механічні напруження в чутливому елементі.**

Платина відноситься до м'яких та пластичних металів. Одним із джерел нестабільності характеристик платинових термометрів є виникнення деформацій та напружень дроту чутливого елемента. В даному випадку велику роль відіграє конструкція термометра, товщина та конфігурація дроту, способи кріплення його на каркасі.

Проблеми пов'язані з деформаціями особливо відчутні при використанні термометра в області температур вищих за 420 °С [4]. При циклічному вимірювання температури виникає декілька різних типів деформації. Пластична деформація виникає, коли дія на дріт перевищує межу текучості. При такій деформації змінюються розміри дроту. По усуненні дії чутливий елемент не повертається у попередній стан. В еталонних платинових термометрах пластична деформація не є частим явищем і може виникнути при трясінні, механічних і теплових ударах.

Пружна деформація виникає, якщо зусилля, прикладене до дроту під час стиснення та розтягу, менше від межі текучості платини. Модуль пружності платини змінюється з температурою. Відзначається відхилення від лінійної залежності зміни величини модуля пружності при температурах вищих за 40 °С, після чого стається різке падіння значення модуля пружності. Якщо платиновий дріт розширюється та вільно повертається при охолодженні, займаючи те саме положення на каркасі, то рівень напруження та пружної деформації при одній і тій ж температурі є постійним у процесі циклічного нагріву. Складова опору, викликана пружною деформацією, майже квадратично змінюється з температурою і добре вписується в залежність $R(T)$, якій притаманний квадратичний характер. Якщо платиновий дріт через тертя об каркас повертається при охолодженні термометра до іншого рівня деформації, то при циклічних вимірюваннях температури повинно спостерігатись явище суттєвого гістерезису в значенні опору [4].

Третій вид деформації, що може помітно впливати на вимірювання опору платиного термометра є непружна (пластична або в'язка) деформація. Ця деформація зумовлена явищем релаксації, пов'язаним із внутрішнім тертям в металі. Непружна деформація не відновлюється негайно після усунення напруження, а може зберігатись протягом певного відрізка часу або до прикладення сили протилежного напрям-

ку. Непружна деформація притаманна чутливим елементам, у яких платиновий дріт звинутий у спіраль і розміщений на каркасі таким чином, що точок дотику з каркасом дуже мало.

- **Незворотній дрейф опору термометра.**

Описані вище процеси, що впливають на стабільність термометра, носять більш-менш зворотній та контролюючий характер. Однак, дуже часто, особливо у високотемпературній області, відзначають постійний дрейф опору термометра, який часто називають процесом «старіння». Цей процес відрізняється для різних конструкцій і сортів платини. Найбільш ймовірно такий дрейф зв'язаний із зміненням структури платини.

Всі елементи просторової ґратки платини знаходяться у постійному русі, відбуваються коливання і переміщення атомів, виникають дефекти. На характер і концентрацію дефектів впливає температура і ступінь деформації платиного дроту.

Виникнення тріщин, зсувів, порожнин у платині сильно позначається на опорі термометра, часто призводить до незворотного зростання опору і зміни функції $R(T)$. У практиці використання термометрів необхідно враховувати можливість деформування структури, оберігати термометр від різких механічних ударів.

Причиною дрейфу опору платинових термометрів при тривалій експлуатації в області високих температур може бути також забруднення платини іншими хімічними елементами, що містяться в матеріалі захисної трубки. Проблема зміни опору в результаті забруднення тісно пов'язана з необхідністю ретельного виконання технологічних операцій з очищення та відпалу під час виготовлення термометра. Газ, що заповнює захисну трубку, містить кисень для того, щоб домішки металів окислялись на поверхні і не проникали вглиб платини. На здатність домішок хрому, заліза, нікелю проникати крізь кварц сильний вплив має склад кварцу та окислювальна атмосфера, що оточує термометр [5].

- **Методи і засоби вимірювання слабких сигналів термометра.**

- **Методи вимірювання**

Існує чимало схем вимірювання для термометрів опору, які залежать від їхнього значення опору. Якщо необхідно поміряти мале значення опору з великою точністю, то потрібно зважати, що окрім опору терморезистора впливає й опір провідників. В такому разі використовуються схеми, де вплив опору провідників є практично відсутнім.

Для вимірювання опору в діапазоні від 1 Ом до 1 МОм використовують міст Вінстона, оскільки в такій схемі є відчутний вплив провідників. Тоді для вимірювання малих опорів з допомогою зазначеного моста ПТО (R_x) під'єднують з використанням чотири-затискної схеми (рис. 1). Необхідно зважати, що тоді вплив опору провідників не можна повністю компенсувати. Це пов'язано з тим, що провідники R_{L1} – R_{L4} чинять незначний вплив на результат вимірювання опору, оскільки вони додаються до значення опорів резисторів R_1 та R_3 .

Враховуючи, що під час вимірювання міст Вінстона не зрівноважений, то опір первинного перетворювача визначають за значенням діагональної напруги моста за формулою:

$$R_x = \frac{R_3 \cdot (U_{out} \cdot (R_1 + R_2) + U_{in} \cdot R_1)}{U_{in} \cdot R_2 - U_{out} \cdot (R_1 + R_2)} \quad (3)$$

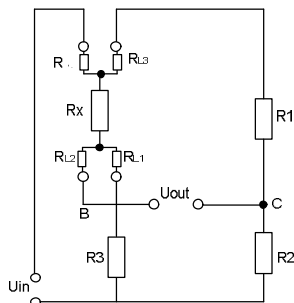


Рис.1. Міст Вінстона з використанням 4-затискної схеми

• Засоби вимірювання

Відповідно до обраної схеми, розраховувались та підбирались складові елементи - резистори плечей моста та аналого-цифровий перетворювач (далі за текстом – АЦП), які могли б забезпечити високу роздільчу здатність і достатню точність вимірювання опору первинного перетворювача.

При виборі АЦП необхідно зважати на наступні важливі параметри:

- Розрядність (у бітах). Визначає, з якою точністю дискретизовано вхідний сигнал.
- Напруга живлення.
- Шумові характеристики.
- Напруга зміщення та її температурний дрейф.

Існує багато типів АЦП, які відрізняються між собою принципом дії. Найчастіше при точних вимірюваннях використовують сигма-дельта АЦП. Це пов'язано з тим, що вони відносяться до найбільш стабільних та точних. Тому було вибрано сигма-дельта АЦП фірми Texas Instruments ADS1231. Цей АЦП є 24-розрядним, має незначні напругу зміщення та її температурний дрейф. Вибраний АЦП має вбудований підсилювач. Тим самим, уникаємо потреби у додатковому підсилювачеві.

При виборі резисторів для мостової схеми необхідно знати, з якою точністю повинна вимірюватись температура. При точному вимірювання температури слід зважати на значення струму, що протікає через терморезистор. Адже, коли значення струму є великим, виникає похибка самонагрівання. Для того, щоб уникнути цієї похибки, розраховують максимальний струм самонагрівання. Відповідно до обраного значення вибираються номінали резисторів плечей моста.

Згодом із обраних елементів проектують друковану плату, основними складовими елементами якої є обрана мостова схема та АЦП. Для того, щоб зробити плату більш універсальною, замість безпосереднього під'єднання ПТО його ж підключають через клем. Виходи АЦП, призначені для комунікації (за допомогою SPI-інтерфейсу) з мікроконтролером, також підведено до клем.

• Шумові ефекти та явища при вимірюванні малих значень температур термометром опору

Проведено дослідження шумових характеристик спроектованої й виготовленої плати (без підключеного ПТО). Отримані результати представлено у вигляді графіків рис.2, на яких чорним кольором позначені реальні дані, а червоним кольором – дані, відфільтровані за допомогою операції усереднення. Вимірювання проводились однократно впродовж 12 годин, а згодом – те саме, але протягом десяти хвилин. Результати досліджень приведено в табл.1.

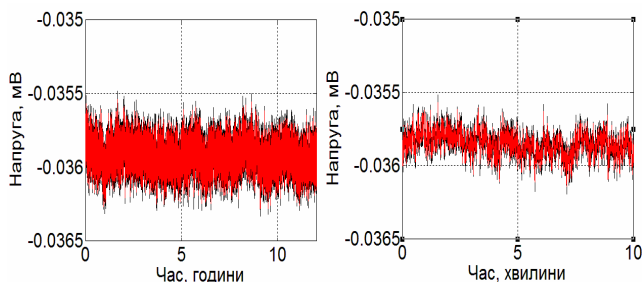


Рис.2. Шуми в спроектованому засобі при тривалості вимірювання: а) 12 год.; б) 10 хв.

Таблиця 1.

Результати досліджень шумових характеристик плати підсилення сигналів ПТО

Тривалість досліджень	12 годин	10 хвилин
Середнє значення:	-0,0359 мВ	-0,0358 мВ
Стандартне відхилення	0,1354 мВ (0,059 мК)	0,0941 мВ (0,057 мК)
Дрейф	-0,0167 мВ/год	

Висновки.

1. Розроблено автоматизований засіб для вимірювання дуже малих коливань температури у часі. В його складі міст Вінстона, платиновий термометр опору та плата для аналого-цифрового опрацювання вимірювальної інформації.
2. Розглянуто фактори впливу на стабільність платинових термометрів опору як найточніших із відомих первинних перетворювачів температури.
3. Досліджено можливості опрацювання інформативних сигналів згаданих термометрів завдяки використанню спеціалізованої плати з вивченими шумовими характеристиками (дрейфу – 16,7 мкВ/год.), що дає змогу вимірювати коливання температур – 10 мК/год. при чутливості схеми 1,645 мкВ/мК.

[1]. Frank Bernhard: Technische Temperaturmessung Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

[2]. R.J. Berry, in Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, ed. by J.F. Schooley, vol. 5 (AIP, New York, 1982), p.743.

[3]. R.J. Berry, Effects of Pt Oxidation on Platinum Resistance Thermometry, Metrologia, 1980, v.16, p. 117.

[4]. <http://temperatures.ru>

[5]. Marcarino P., Dematteis R., Gallorini M., and Rizzio E., Contamination of Platinum Resistance Thermometers at High Temperature Through Their Silica Sheaths, Metrologia, 1989, 26, pp. 175-181.