

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ ПЕРЕХОДУ ДО ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ З НЕЛІНІЙНИМИ БЛОКАМИ

У статті запропоновано метод переходу до індивідуальної функції перетворення вимірювального каналу з декількома нелінійними блоками, який має суттєво нижчу трудомісткість порівняно із традиційним підходом. Пропонований метод подано на прикладі перетворювача температура-частота на базі термістора та мультивібратора на базі операційного підсилювача і мостового перетворювача. Проведений аналіз похибок вимірювального каналу показав, що вони не перевищують $\pm 1^\circ\text{C}$ у діапазоні вимірювання від мінус 20°C до $+100^\circ\text{C}$ при чутливості $0,003^\circ\text{C}$.

Ключові слова: вимірювання температури, термістор, похибка вимірювання, функція перетворення, калібрування, нелінійні блоки.

V. KOCHAN

Research Institute of Intelligent Computer Systems
Western Ukrainian National University

THE METHOD OF REDUCING THE LABOR OF THE TRANSITION TO THE INDIVIDUAL FUNCTION OF CONVERSION OF THE MEASURING CHANNEL WITH NONLINEAR BLOCKS

In scientific research and in the praxis of the engineer often appear spontaneous problems of temperature measurements. However, as a rule of thumb, cheap sensors and simple measuring circuits have large errors and nonlinear conversion characteristics. Therefore, the task of determining an individual conversion characteristic of such Ad-hoc measurement systems is complex and time consuming. In the range from $-(20... 0)^\circ\text{C}$ to $+(100 (120))^\circ\text{C}$, it is reasonable to use the thermistor as a temperature sensor due to its low price, high sensitivity and wide range of nominal resistance. However, the thermistor are characterized by a large variation of its parameters. The permissible deviation of the resistance from the nominal one at 20°C can reach $\pm 20\%$, and the permissible deviation of the temperature coefficient from the nominal one can reach $\pm 5\%$. It is reasonable to determine the individual thermistor conversion function in two reference fixed points. The first point is the melting point of ice. As the second point for calibrating the thermistor, it is reasonable to use the axillary temperature of a healthy person. In the vast majority of cases, this temperature is 36.6°C . The method for a significant simplification of obtaining the individual conversion characteristic for a measuring system with nonlinear blocks is considered in this article. For this purpose, there is developed a technique of considerably lower complexity. The proposed method is illustrated on the case study of the temperature-to-frequency converter. The temperature-to-frequency converter is based on the thermistor as a temperature sensor and the multivibrator. The latter is based on the operational amplifier and the bridge circuit. The error analysis carried out for the whole measuring system revealed that the total measurement error does not exceed $\pm 1^\circ\text{C}$ within the measurement range from -20°C to $+120^\circ\text{C}$ with the sensitivity of 0.003°C . The total error of measurements can be further reduced in approximately 2-4 times when using the mercury thermometer with the error of $\pm 0.1^\circ\text{C}$ to determine individual conversion characteristic of the considered measuring system. The proposed solution combines knowledge from the many fields of knowledge such as electronics, instrumentation, and metrology. Thus, the proposed solution can be used as a base for student training.

Key words: temperature change, thermistor, change of temperature, changeover function, calibration, non-linear blocks.

Вступ. Постановка задачі. Як при проведенні наукових досліджень, так і у практичній діяльності інженера часто виникають одноразові, спонтанні задачі вимірювання температури (так звані Ad-hoc задачі [1]). Наприклад, разовий контроль температури двигунів, підшипників, інших пристроїв та тестування їх захисту від перегріву [2], технології Інтернету речей [2, 3], дослідження теплоємності та теплопровідності матеріалів [3], а також багато інших [4]. Для вирішення таких Ad-hoc задач найчастіше не доцільно купувати спеціалізоване обладнання. Доцільно використати можливість широко розповсюджених сенсорів та простих схем їх ввімкнення. Зокрема, доцільно використовувати схеми різних генераторів, що перетворюють температуру у частоту або період. Такі сигнали легко передавати до пристроїв опрацювання даних, індикації тощо [1]. Але, як правило, дешеві сенсори та прості схеми генераторів мають великі похибки та нелінійні функції перетворення. Тому, при калібруванні таких Ad-hoc вимірювальних каналів (ВК), виникає проблема ідентифікації їх індивідуальних функцій перетворення (ІФП). Тому розглянемо метод зменшення трудомісткості переходу до ІФП ВК з двома нелінійними блоками. При цьому як сенсор використаємо термістор [1], який має ряд переваг над іншими сенсорами при вимірюванні невисоких температур.

1. Відомі засоби вимірювання температури

Більшість приладів і систем вимірювання температури, які випускаються промисловістю, використовують як сенсори термопари та термометри опору [1]. Але термопари [1, 5] мають низьку чутливість ($10\text{--}70\text{ мкВ}/^\circ\text{C}$), що вимагає використання завадостійких ВК [7]. Достатню завадостійкість забезпечують лише аналого-цифрові перетворювачі сигма-дельта та двотактного інтегрування [1, 6]. Крім того, термопари вимагають застосування подовжувальних проводів та схеми компенсації температури вільних кінців, а також її налаштування [1]. Тому при застосуванні термопар як сенсорів температури доцільніше використовувати відповідні спеціалізовані засоби. При цьому слід врахувати, що самі термопари мають відносно велику похибку вимірювання [5]. Найбільш розповсюджені термопари типу К при вимірюванні температури до 300°C мають допустиму похибку $\pm 2,5^\circ\text{C}$ [5]. А їх тестування та корекція їх похибок вимагають спеціальних засобів [8, 9] і методів [10, 11].

Термометри опору [1] можуть забезпечити вищу точність і чутливість. Допустима похибка широко розповсюджених мідних термометрів опору не перевищує $\pm 0,25$ °С при вимірюванні температури 0 °С і $\pm 0,5$ °С при вимірюванні температури 100 °С. Але реалізація високої чутливості вимагає збільшення робочого струму, а це веде до зростання похибки від самонагріву [1, 5]. Другим недоліком термометрів опору при використанні мостових схем вимірювання є значний вплив опору провідників підключення [1]. Тому, при застосуванні термометрів опору як сенсорів температури, також доцільніше використовувати відповідні спеціалізовані засоби. Але, якщо вирішення поставленої Ad-hoc задачі вимагає вимірювання середніх температур, наприклад, у діапазоні від $-(20...30)$ °С до $+(100...120)$ °С, то як сенсори доцільно використати напівпровідникові діоди та термістори [1]. Одним з основних недоліків діодів є випрямлення завади через нелінійну залежність струму сенсора від напруги на ньому. Це не дає реалізувати їх потенційну точність на практиці. Термістори мають лінійну залежність струму сенсора від напруги на ньому. Тобто вони не спотворюють заваду і для них простіше забезпечити потрібну завадостійкість ВК.

Основними перевагами термісторів можна вважати:

1. Можливість вибору термістора з великим опором (опір широко вживаних термісторів при 20°С знаходиться у межах від 10 Ом до 1 МОм).

2. Велика чутливість термісторів – близько 4 %/°С.

3. Можливість вибору термісторів різної конструкції (наприклад, у вигляді шайби) та розмірів (мінімальний розмір – кулька діаметром приблизно 1 мм).

4. Низька ціна.

Вказані переваги дають змогу:

1. Мати дуже малу похибку від нагріву термістора робочим струмом при заданій чутливості. Слід відзначити, що чутливість термістора зменшується лінійно із зменшенням його струму. У той же час потужність, що виділяється на термісторі, зменшується із квадратом струму. Наприклад, стандартний мідний термометр опору при розсіюваній потужності 10 мВт має похибку від самонагріву до 0,2 °С [5]. Якщо його опір 100 Ом, то відповідний струм становить 10 мА, а чутливість – 4 мВ/°С. Якщо застосувати термістор опором 10 кОм відповідний струм буде становити 1 мА, а чутливість – 400 мВ/°С. Але коли задати струм 0,1 мА, то похибка від самонагріву термістора не перевищить 0,002 °С (у 100 разів менша), а чутливість буде 40 мВ/°С (у 10 разів більша). Таким чином, термістори створюють значно більші можливості вдалого компромісу між чутливістю, самонагрівом та допустимим рівнем завад.

2. Через високу чутливість термістора та великий початковий опір можна використовувати найпростіше двопровідне підключення сенсора до входу вимірювального перетворювача. Наприклад, якщо опір кожного провідника сполучення становить 1 Ом, то для стандартного мідного термометра опором 100 Ом похибка буде становити 5 °С. Для термістора опором 10 кОм та чутливістю 4 %/°С похибка не буде перевищувати 0,005 °С, тобто у 1000 разів менше.

3. Завдяки високій чутливості значно спрощується отримання достатньої завадостійкості. При цьому термістори мають лінійну залежність струму сенсора від напруги на ньому. У такому випадку можна успішно застосовувати методи цифрової фільтрації результатів вимірювання температури.

Основним недоліком термісторів є великі похибки вимірювання температури. Таким чином метою даної статті є підвищення точності вимірювання температури термісторами за рахунок переходу до ІФП.

2. Перехід до індивідуальної функції перетворення термістора

Причиною великої похибки вимірювання температури термісторами є великий розкид їх параметрів. Допустиме відхилення опору від номінального при 20 °С сягає ± 20 %, а допустиме відхилення температурного коефіцієнту від номінального сягає ± 5 % [1]. Якщо апроксимувати ці допустимі відхилення, то допустимі максимальні відхилення результатів вимірювання температури за допомогою термісторів від номінальної ФП у діапазоні від -20 °С до 100 °С будуть відповідати показаним на рис. 1. Як видно з нього, ці похибки вимірювання температури сягають 13 °С і не задовольняють вимоги жодних Ad-hoc задач.

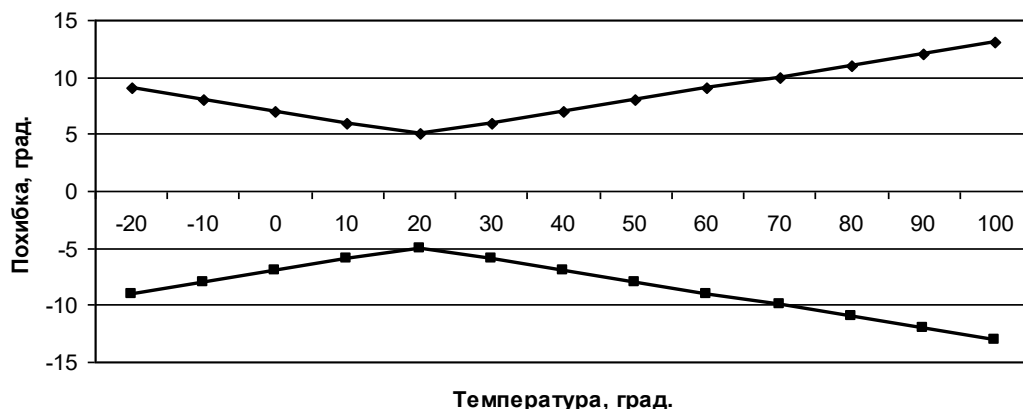


Рис. 1. Похибка вимірювання температури термістором при використанні його номінальної ФП

У цьому випадку найбільш ефективним методом підвищення точності вимірювання є перехід до ІФП термістора. Згідно із [1], ІФП термістора описується експонентою

$$R_T = A \cdot e^{-B/T}, \quad (1)$$

де R_T – опір термістора при температурі T , K (у Кельвінах); A , B – параметри термістора.

Як видно з (1), перехід до ІФП вимагає визначення дійсного опору (калібрування) термістора щонайменше при двох температурах (у двох точках діапазону перетворення). Тоді можна скласти систему двох рівнянь з двома невідомими (параметрами термістора A та B). Рішенням системи будуть формули:

$$B = \frac{\ln R_{T1} - \ln R_{T2}}{\frac{1}{T2} - \frac{1}{T1}}, \quad (2)$$

$$A = \frac{R_{T1}}{e^{-B/T1}}, \quad (3)$$

де R_{T1} , R_{T2} – опір термістора відповідно при температурах $T1$, $T2$ (у Кельвінах).

При переході до ІФП виникає проблема вибору еталонних засобів [12]. При Ad-hoc вимірюваннях, зазвичай, доступу до них немає, але можна використати для калібрування підручні засоби.

Досить просто можна створити температуру 0°C . Для цього слід у холодильнику виготовити кубики льоду, розмолоти їх м'ясорубкою або блендером, змішати з водою та відстояти разом з термістором не менше 20 хв у теплоізолюваній посудині (наприклад, скляній банці обмотаній рушниками). Після витримки у банці має бути суміш води і льоду (а не плавати на поверхні води розмелений лід). Для забезпечення високої точності калібрування треба використати дистильовану воду [13]. Але експериментальні дослідження показали, що при використанні побутової водопровідної води, попередньо кип'яченої, максимальна похибка відтворення температури 0°C не перевищує $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

Як другу точку калібрування при Ad-hoc вимірюваннях доцільно використати температуру тіла здорової людини. У переважній більшості випадків ця температура становить $36,6^\circ\text{C}$. Випадкові відхилення від цього значення, зазвичай, не перевищують $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Якщо виникає підозра, що відхилення температури тіла людини більші, то добитися похибки не більше $\pm 0,2^\circ\text{C}$ можна за допомогою широко розповсюдженого медичного термометра. Але традиційний медичний термометр показує максимальне значення температури оточення після «стріпування». Тому безпосереднє калібрування термістора за поточними показами медичного термометра може вести до великих випадкових похибок (промахів). При калібруванні за допомогою тіла людини, останнє виступає термостатом, який має доволі велику стабільність підтримання температури. Тому результат вимірювання температури тіла людини медичним термометром можна використати для наступного калібрування термістора. Термістор слід розмістити аналогічно до медичного термометра. Тоді похибка відтворення температури також не буде перевищувати $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

Похибка вимірювання температури, яку вносить сам термістор, при його калібруванні у вказаних двох точках і переході до ІФП не перевищує значень, показаних на рис. 2. Ці межі допустимої похибки отримані лінійною екстраполяцією найгіршої комбінації похибок при калібруванні у температурах $(0 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ та $(36,6 \pm 0,2)^\circ\text{C}$. За її результатами було визначено максимальні значення похибки у точках -20°C та $+100^\circ\text{C}$ і між ними було проведено прямі, які показано на рис. 2. Таким чином, прямі, подані на рисунку, показують максимальні значення похибки, яку вносить термістор у похибку ВК. Як видно з рис. 2, при використанні ІФП внесена термістором похибка вимірювання температури стає цілком прийнятною для більшості застосувань. Слід також відзначити, що при використанні більш досконалих реперних точок можливе подальше зменшення похибки термістора. Але треба врахувати, що при тривалій експлуатації при температурах вище $60 \dots 70^\circ\text{C}$, у деяких термісторів починається деградація, тобто починає проявляти себе дрейф їх ФП.

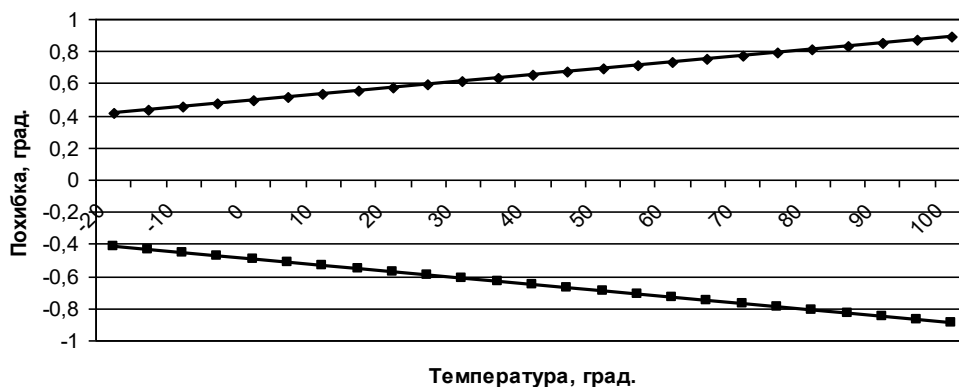


Рис. 2. Похибка вимірювання температури, яку вносить термістор, при переході до ІФП

3. Канал вимірювання температури за допомогою термістора

Як було вказано, при Ad-hoc вимірюваннях доцільно перетворювати опір термістора у частоту або період [1]. Такі сигнали не змінюють інформативний параметр при передачі. Їх легко перетворити як у

аналогову напругу, так і у цифровий код. На рис. 3 подано просту але стабільно працюючу схему перетворювача опору термістора у частоту або період. Її перевагою є те, що частота/період вихідного сигналу залежить лише від параметрів пасивних елементів схеми. При ввімкненні схеми напруга на конденсаторі C1 виходить меншою за напругу на виході подільника R3 і R4. У такому випадку напруга на виході операційного підсилювача OA1 додатна, конденсатор C1 заряджається через термістор R1. OA1 працює у режимі компаратора. Його напруга спрацювання визначається напругою подільника R3 і R4 та струмом змінення, який задається резистором R2. Доцільно вибрати $R3 = R4$. Тоді напруга на неінвертуючому вході OA1 за рахунок струму змінення через R2 буде вищою за половину напруги живлення U_{ps} . А напруга на виході OA1 буде близька до напруги живлення U_{ps} (див. рис. 5). Конденсатор C1 заряджається доки напруга на інвертуючому вході OA1 стане рівною напрузі на його неінвертуючому вході (див. рис. 4). Тоді OA1 змінює стан – напруга на його виході стає близькою до нуля (див. рис. 5). Конденсатор C1 починає розряджатися через термістор R1 (див. рис. 4). Напруга на неінвертуючому вході OA1 за рахунок струму змінення через R2 буде нижчою за половину напруги U_{ps} . Конденсатор C1 розряджатися до цієї напруги. Тоді OA1 знову змінює стан – напруга на його виході стає близькою до напруги живлення U_{ps} (див. рис. 5). Конденсатор C1 знову заряджається доки напруга на інвертуючому вході OA1 стане рівною напрузі на його неінвертуючому вході. Цикли заряду / розряду C1 періодично повторюються (див. рис. 4 та 5).

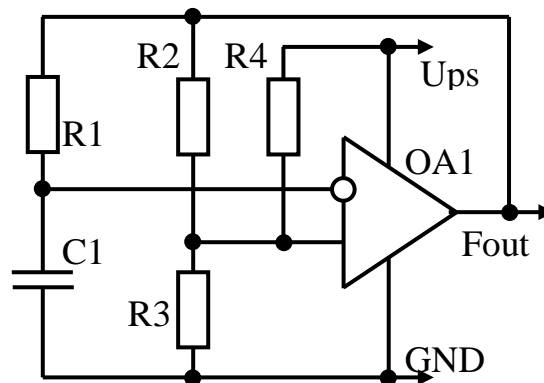


Рис. 3. Схема перетворювача опору термістора у частоту або період

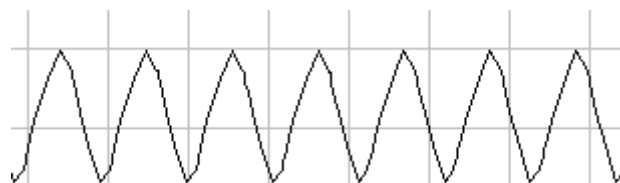


Рис. 4. Форма імпульсів заряду/розряду конденсатора

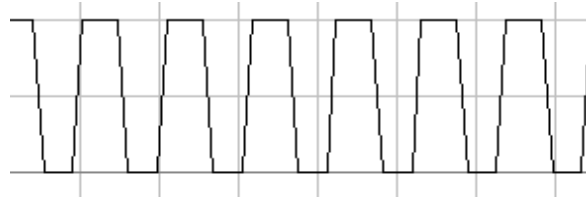


Рис. 5. Форма імпульсів Fout на виході операційного підсилювача OA1

4. Перехід до індивідуальної функції перетворення вимірювального каналу

Найзручніше користуватися наскрізною ФП ВК – залежністю вихідної частоти або періоду від температури. Але у ВК, поданий на рис. 3, входять два структурні елементи, що мають нелінійну ФП – термістор і перетворювач опір-частота. При цьому форма ФП термістора відома (експонента, див. (1) і (2)) [1]. А ФП перетворювача опір-частота – невідома. Відповідно до рекомендацій [14], при невідомій формі ФП для її достовірної ідентифікації при роботі у вузькому діапазоні необхідно не менше 5 точок калібрування. При роботі у широкому діапазоні – не менше 7 точок калібрування. При вимірюванні температури у діапазоні від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ опір термістора міняється не менше, ніж у 100 разів. Це дуже широкий діапазон вимірювання. Реалізувати 7 або більше температурних точок калібрування – трудомістка задача, яка вимагає відповідного еталонного обладнання.

Пропонується метод різкого зменшення кількості точок калібрування за рахунок того, що ФП термістора відома з високою достовірністю. Для цього необхідно виконати наступні операції:

- визначити, згідно із (2) та (3), ІФП термістора. Відповідна методика подана у розділі 3, для цього цілком достатньо двох точок калібрування;
- відповідно до (1), розрахувати опір термістора у 10–15 точках, приблизно рівномірно розміщених у всьому діапазоні вимірювання температури;

- підключити у схему вимірювального перетворювача (див. рис. 3) замість термістора R1 магазин опору;
- послідовно встановити на магазині опору розраховані при виконанні п. 2 значення опору термістора та записати отримані при цьому значення вихідної частоти (або періоду);
- сформуванати наскрізну ФП ВК шляхом співставлення значень температури, для яких при виконанні п. 2 були розраховані значення опору термістора, та отриманих при виконанні п. 4 значень вихідної частоти (або періоду);
- апроксимувати наскрізну ФП ВК. Для цього доцільно використати метод регресійного аналізу або нейронну мережу [15].

Пропонований метод ілюструється наступними рисунками. На рис. 6 подано залежність опору термістора від температури. Значення опору розраховані для 13 точок, рівномірно, що 10 °С, розміщених у діапазоні від -20 °С до 100 °С. На рис. 7 подано залежність частоти вимірювального перетворювача від опору для розрахованих 13 точок. Наскрізну ФП ВК температури отримують шляхом апроксимації залежності отриманої співставленням значень температури (вісь абсцис графіка рис. 6) та відповідних значень вихідної частоти (вісь ординат графіка рис. 7). Слід відзначити, що часто поліноміальна апроксимація не дає добрих результатів. Як це показано на рис. 8 (крива більшої амплітуди), отримана за допомогою регресійного аналізу похибка сумірна з похибкою термістора (див. рис. 2). Майже завжди кращі результати дають нейронні мережі [13]. Отримана (див. рис. 8, крива меншої амплітуди) за допомогою нейронної мережі похибка на порядок менша за похибку термістора (див. рис. 2) – нею можна нехтувати.

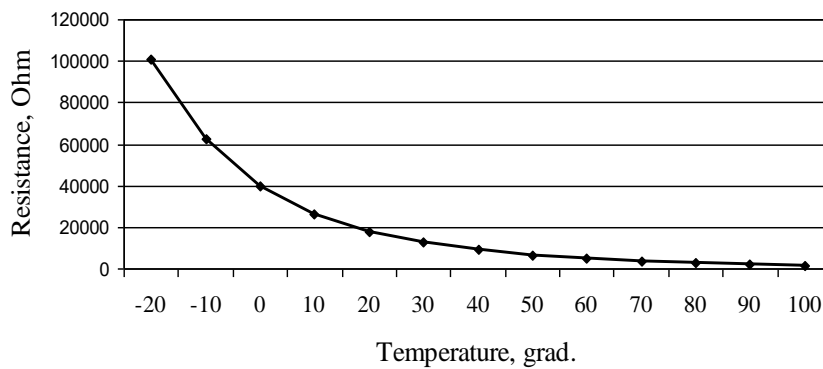


Рис. 6. Залежність опору термістора від температури

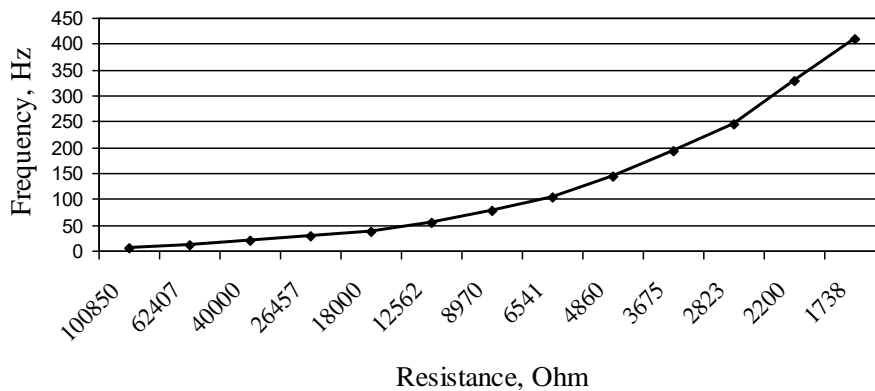


Рис. 7. Залежність вихідної частоти вимірювального перетворювача від опору

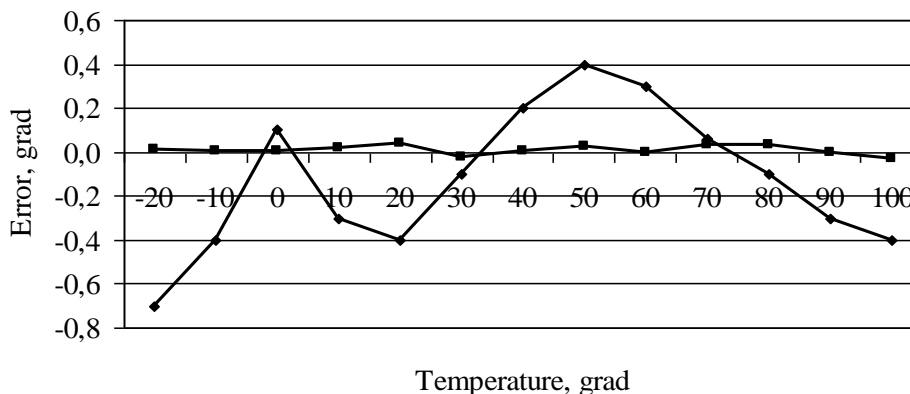


Рис. 8. Залежність похибки апроксимації наскрізної ФП від вимірюваної температури

5. Оцінка похибки вимірювання температури

У похибку вимірювання температури пропонується такі компоненти:

– похибка переходу до індивідуальної ФП ВК. При використанні запропонованого методу (див. розд. 5) ця похибка буде рівною сумі похибок калібрування термістора (див. рис. 2) та апроксимації наскрізної ФП ВК (див. рис. 8);

– похибка вимірювального перетворювача. При використанні запропонованого підходу (див. розд. 5) ця похибка буде визначатися температурними та часовими змінами елементів схеми перетворювача (див. рис. 3). Температурний коефіцієнт широко вживаних керамічних конденсаторів (але не на основі титанату барію), не перевищує $0,05 \dots 0,1 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ і є більшим за температурний коефіцієнт резисторів. Додаткова похибка, яку внесе конденсатор, при зміні температури $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ відносно нормальних умов, відповідно до температурного коефіцієнта термістора $4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, не буде перевищувати $0,125 \dots 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$;

– похибка магазину опору, який використовувався для імітації термістора при виконанні пп. 3, 4 запропонованого методу. При використанні дешевого магазину опору з допустимою похибкою $0,1 \text{ \%}$ ця похибка, відносно температурного коефіцієнта термістора $4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, не буде перевищувати $0,025 \text{ }^\circ\text{C}$.

– похибка нагріву термістора робочим струмом. Для оцінки цієї похибки приймемо, як і при розрахунку наскрізної ФП ВК, що при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ опір термістора $R_{20} = 18 \text{ k}\Omega$, а максимальний робочий струм

$I_T = 0,1 \text{ mA}$. Тоді максимальна потужність P_T , яку розсіює термістор, становить

$$P_T = I_T^2 R_{20} \leq 0,2 \text{ mW}. \quad (4)$$

Для термометрів опору похибка від нагріву робочим струмом не перевищує $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ при розсіюваній потужності $P_{0,2} = 10 \text{ mW}$ [5]. Якщо умови тепловіддачі термістора аналогічні, то похибка від його нагріву робочим струмом не буде перевищувати $0,004 \text{ }^\circ\text{C}$. Такою похибкою можна нехтувати;

– похибка вимірювання вихідної частоти або періоду коливань вимірювального перетворювача. Слід відзначити, що вимірювання частоти або періоду належать до найбільш точних видів вимірювання. У даному випадку похибка вимірювання вихідної частоти практично визначається заданим максимально допустимим часом вимірювання. Щоби мати малий вплив потужності, споживаної перетворювачем на результат вимірювання температури (при розміщенні його у одному корпусі з термістором) ОА1 вибрано мікропотужним, і, відповідно, низькочастотним. Тоді доцільніше вимірювати не частоту, а період коливань вимірювального перетворювача.

Слід відзначити, що похибки від відхилення параметрів елементів ВК від номінальних будуть ліквідовані при переході до його індивідуальної наскрізної ФП. Це дає можливість гнучкого вибору елементів при таких Ad-hoc вимірюваннях. Завадостійкість запропонованого ВК також буде високою. Спади напруги на термісторі сягають 2 V , тому вплив завад нормального виду буде малим. Однак при опрацюванні результатів вимірювання частоти або періоду коливань вимірювального перетворювача можливе використання доволі багатьох методів цифрової фільтрації.

Таким чином, сумарна похибка вимірювання температури цим ВК не буде перевищувати $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Висновки. Як видно з проведеного аналізу, при потребі вимірювати температуру в умовах, близьких до кімнатних, можна не використовувати спеціалізоване обладнання. Вимірювати температуру у діапазоні від $-(20 \dots 30) \text{ }^\circ\text{C}$ до $+(100 \dots 120) \text{ }^\circ\text{C}$ з доволі високою точністю (похибка не більше $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) можна за допомогою термісторів та простих схем генераторів. Для цього слід перейти до індивідуальної ФП сенсора – термістора, або всього ВК. Проведений аналіз похибок ВК показав, що запропонована методика калібрування без використання стандартизованих еталонних засобів дає змогу забезпечити вказану точність таких Ad-hoc вимірювань.

Література

1. Webster J. G. (Ed.). The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook. CRC Press. 1999.
2. Beshley H., Beshley M., Maksymyuk T., & Strykhaluk I. Method of Centralized Resource Allocation in Virtualized Small Cells Network with IoT Overlay. In Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine. 2018. P. 1147-1151.
3. Przystupa K., Vasylykivskiy I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., & Kochan O. Assessment of Electromagnetic Pollution in Towns. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine (PTZE). June 2019. P. 143-146.
4. Ferrero A., Scotti V. Forensic Metrology: A New Application Field for Measurement Experts Across Techniques and Ethics. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2013. Vol. 16. Issue 1. P. 14-17.
5. Бычковский Р.В., Контактные датчики температуры. – М.: Металлургия, 1978. – 238 с.
6. Kester W. A. Data Conversion Handbook. Newnes. 2005.
7. Jun, S., & Kochan, O. Common Mode Noise Rejection in Measuring Channels. Instruments and Experimental Techniques. 2015. Vol. 58. Issue 1. P. 86-89.
8. Wang J., Kochan O., Przystupa K., & Su J. Information-measuring System to Study the Thermocouple with Controlled Temperature Field. Measurement Science Review. 2019. Vol. 19. Issue 4. P. 161-169.

9. Jun S., Kochan O., & Kochan R. Thermocouples with Built-in Self Testing. *International Journal of Thermophysics*. 2016. Vol. 37. Issue 4. P. 37.
10. Jun S., Kochan O., Chunzhi W., & Kochan R. Theoretical and Experimental Research of Error of Method of Thermocouple with Controlled Profile of Temperature Field. *Measurement Science Review*. 2015. Vol. 15. Issue 6. P. 304–312.
11. Yeromenko V., Kochan O. The Conditional Least Squares Method for Thermocouples Error Modeling. In *Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. Berlin, Germany. 2013. Vol. 1. P. 157–162.
12. Birch J. Benefit of Legal Metrology for the Economy and Society. A study for the International Committee of Legal Metrology. 2003. [Online]. Available at: https://www.oiml.org/en/files/pdf_e/e002-e03.pdf.
13. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг; пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
14. Рогельберг И.Л. Сплавы для термопар / И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. – М. Metallurgiya, 1983. – 360 с.
15. Kröse B., van der Smagt P. *An Introduction to Neural Networks*. Amsterdam: University of Amsterdam. 1993.

References

1. Webster J. G. (Ed.). *The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook*. CRC Press. 1999.
2. Beshley H., Beshley M., Maksymyuk T., & Strykhaluk I. Method of Centralized Resource Allocation in Virtualized Small Cells Network with IoT Overlay. In *Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine. 2018. P. 1147-1151.
3. Przystupa K., Vasylykivskiy I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., & Kochan O. Assessment of Electromagnetic Pollution in Towns. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine (PTZE)*. June 2019. P. 143-146.
4. Ferrero A., Scotti V. Forensic Metrology: A New Application Field for Measurement Experts Across Techniques and Ethics. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2013. Vol. 16. Issue 1. P. 14-17.
5. Bychkovskiy R.V., Kontaknyye datchiki temperaturey. – М.: Metallurgiya, 1978. – 238 с.
6. Kester W. A. *Data Conversion Handbook*. Newnes. 2005.
7. Jun, S., & Kochan, O. Common Mode Noise Rejection in Measuring Channels. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015. Vol. 58. Issue 1. P. 86-89.
8. Wang J., Kochan O., Przystupa K., & Su J. Information-measuring System to Study the Thermocouple with Controlled Temperature Field. *Measurement Science Review*. 2019. Vol. 19. Issue 4. P. 161-169.
9. Jun S., Kochan O., & Kochan R. Thermocouples with Built-in Self Testing. *International Journal of Thermophysics*. 2016. Vol. 37. Issue 4. P. 37.
10. Jun S., Kochan O., Chunzhi W., & Kochan R. Theoretical and Experimental Research of Error of Method of Thermocouple with Controlled Profile of Temperature Field. *Measurement Science Review*. 2015. Vol. 15. Issue 6. P. 304-312.
11. Yeromenko V., Kochan O. The Conditional Least Squares Method for Thermocouples Error Modeling. In *Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. Berlin, Germany. 2013. Vol. 1. P. 157–162.
12. Birch J. Benefit of Legal Metrology for the Economy and Society. A study for the International Committee of Legal Metrology. 2003. [Online]. Available at: https://www.oiml.org/en/files/pdf_e/e002-e03.pdf.
13. Kukhling H. *Spravochnik po fizike* / H. Kukhling; per. s nem. – М.: Mir, 1982. – 520 с.
14. Rogelberg I.L. *Splavy dlya termopar* / I.L. Rogelberg, V.M. Beylin. – М. Metallurgiya, 1983. – 360 с.
15. Kröse B., van der Smagt P. *An Introduction to Neural Networks*. Amsterdam: University of Amsterdam. 1993.

Надійшла / Paper received: 07.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020