



УКРАЇНА

(19) UA (11) 16665 (13) U
(51) МПК (2006)
G01K 7/30МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ШУМОВИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

1

2

(21) u200602298

(22) 02.03.2006

(24) 15.08.2006

(46) 15.08.2006, Бюл. № 8, 2006 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Шевченко Костянтин Леонідович, Лісовський Олександр Анатолійович

(73) КІЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) Шумовий спосіб вимірювання температури, при якому встановлюють вимірювальний резистор у зоні вимірюваної температури та опорний резистор у термостаті з температурою плавлення льоду, отримують їх шумові напруги, які по черзі підсилюють у смузі частот теплових флуктуацій разом з власними шумами підсилювального тракту, квадратично детектують, усереднюють та роз-

дільно запам'ятовують першу і другу постійні напруги, який **відрізняється** тим, що додатково замикають вимірювальний і опорний резистори з наступним запам'ятовуванням отриманої третьої постійної напруги, з якою по черзі порівнюють першу і другу постійні напруги, отримують першу та другу різниці напруги, розмикають по черзі вимірювальний і опорний резистори, встановлюють відповідне значення опору додаткового резистора у ланцюзі зворотного зв'язку операційного підсилювача, подають першу різницеву напругу на операційний підсилювач через вимірювальний резистор, другу - через опорний резистор, з наступним підсиленням, та отримують четверту та п'яту постійні напруги, які порівнюють між собою, а по отриманій різниці напруг визначають вимірювану температуру за шкалою Цельсія.

Корисна модель відноситься до термометрії і може бути використана для вимірювання температури в екстремальних умовах за рівнем теплових шумів резистивного елемента, розміщеного в агресивному температурному середовищі.

Відомий шумовий спосіб вимірювання температури [див. Геращенко О.А., Гордов Н.А., Лах В.И., Стадник Б.И., Ярышев Н.А. Температурные измерения: Справочник. - К.: Наукова думка, 1984, - С.21-22], заснований на вимірюванні середнього квадрата напруги теплових шумів резистора, розміщеного в зоні вимірюваної температури, і визначенні температури по формулі:

$$T_x = \frac{\bar{U}^2}{4kR\Delta f},$$

де \bar{U} - середній квадрат напруги (дисперсія) теплових шумів резистора; k - постійна Больцмана; R - опір шумового резистора; Δf - смуга частот вимірюваного теплового шуму.

Однак у відомому способі присутня залежність дисперсії напруги теплових шумів не тільки від температури T_x , але і від опору R шумового резистора. Тому, в розрахункову формулу входить опір резистора R , який повинен бути точно відомим. Неминучі температурні зміни опору R і його некон-

трольовані зміни, які зв'язані з роботою в агресивному середовищі, знижують точність вимірювання температури. Крім того, температура, що визначається по зазначеній формулі, відповідає термодинамічній температурі середовища по шкалі Кельвіна. У більшості випадків зручніше результати контролю температури оцінювати по шкалі Цельсія. Однак, у цьому способі змістити початок відліку з абсолютного нуля ("0"K) у нуль шкали Цельсія (273K) важко і зв'язано з додатковими похибками.

Відомий шумовий спосіб вимірювання температури [див. Куинн Т. Температура: Пер. с англ. - М.: Мир, 1985, - С.114-115], у якому порівнюють шумові напруги двох резисторів, один із яких вимірювальний, розміщений у зоні вимірюваної температури, інший опорний - нагрівається до відомої температури. При рівності значень порівнюваних шумових напруг невідому температуру визначають по формулі:

$$T_x = \frac{R_2}{R_1} T_0,$$

де R_1 - опір вимірювального резистора; R_2 - опір опорного резистора; T_0 - температура опорного резистора;

При такому способі є необхідність плавної змі-

(19) UA (11) 16665 (13) U

ни опору опорного резистора R_2 , що розташований у термостаті, до досягнення рівності значень шумових напруг при $T_0 = \text{const}$ ($T_X R_1 = T_0 R_2$), що знижує точність вимірювання температури.

Відомий також шумовий спосіб вимірювання температури [див. Саватеев А.В. Шумовая термометрия, - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987, - С.60-62], який полягає в тім, що встановлюють вимірювальний резистор у зоні вимірюваної температури та опорний резистор у термостаті з температурою плавлення льоду, отримують їх шумові напруги, які по черзі підсилюють у смузі частот теплових флуктуацій разом з власними шумами підсилювального тракту, квадратично детектують, усереднюють та роздільно запам'ятовують першу і другу постійні напруги.

Крім того, відомий спосіб включає операцію послаблення шумової напруги резистора з більш високою температурою нагрівання за допомогою резистивного атенюатора. При цьому вимірювану температуру T_X з урахуванням рівності порівнюваних опорів ($R_1 = R_2$) визначають по формулі:

$$T_X = \frac{T_0}{\chi^2},$$

де T_0 - температура опорного резистора; χ - коефіцієнт ослаблення атенюатором шумової напруги, що знімається з вимірювального резистора.

Однак, власні шуми вимірювально-перетворювального тракту спотворюють зазначену залежність, що знижує точність вимірювання температури. Джерелом похибки також є неконтрольовані зміни опору вимірювального резистора, що порушують умову рівності опорів вимірювального й опорного резисторів.

В основу корисної моделі покладена задача створити такий шумовий спосіб вимірювання температури, в якому введення нових операцій із шумовими напругами двох резисторів забезпечило б виключення впливу непостійності опору вимірювального резистора відносно опорного і рівня власних шумів підсилювального-перетворювального тракту на результат порівняння температур резисторів, що дозволить підвищити точність вимірювання температури в агресивних середовищах за шкалою Цельсія.

Поставлена задача досягається тим, що в шумовий спосіб вимірювання температури, який полягає в тім, що встановлюють вимірювальний резистор у зоні вимірюваної температури та опорний резистор у термостаті з температурою плавлення льоду, отримують їх шумові напруги, які по черзі підсилюють у смузі частот теплових флуктуацій разом з власними шумами підсилювального тракту, квадратично детектують, усереднюють та роздільно запам'ятовують першу і другу постійні напруги, згідно з корисною моделлю, додатково замикають вимірювальний і опорний резистори з наступним запам'ятовуванням отриманої третьої постійної напруги, з якою по черзі порівнюють першу і другу постійні напруги, отримуємо першу та другу різниці напруги, розмикають по черзі вимірювальний і опорний резистори, встановлюють відповідне значення опору додаткового резистора у ланцюзі зворотного зв'язку операційного підсилювача, подають першу різницеву напругу на опе-

раційний підсилювач через вимірювальний резистор, другу - через опорний резистор, з наступним підсиленням та отримують четверту та п'яту постійні напруги, які порівнюють між собою, а по отриманій різниці напруг визначають вимірювану температуру за шкалою Цельсія.

Введення в запропонований спосіб операцій по запам'ятовуванню третьої напруги, пропорційної власним шумам підсилювально-перетворювального тракту, порівнянню першої і другої запам'ятованої напруг із третьою, отриманню різницьових напруг, які по черзі подають на операційний підсилювач із додатковим резистором у ланцюзі зворотного зв'язку через вимірювальний і опорний резистори, запам'ятовування четвертого і п'ятого підсиленних цим підсилювачем напруг, дозволяє виключити вплив нестабільності опорів вимірювального й опорного резисторів на їхні шумові напруги. Порівняння четвертої і п'ятої запам'ятованих напруг дозволяє одержати різницеву напругу, вільну від напруги власних шумів підсилювально-перетворювального тракту і пропорційну різниці температур вимірювального й опорного резисторів, що дозволяє з високою точністю по різнищевій напрузі розрахувати температуру в агресивних середовищах за шкалою Цельсія.

Корисна модель представлена на зображеннях, де Фіг.1 - шумовий вимірювач температури, Фіг.2 - алгоритм програми.

Шумовий вимірювач температури містить вимірювальний резистор 1 та опорний резистор 2, які включені послідовно, блок програмно керованих ключів 3 з ключами 4 та 5, які паралельно під'єднані відповідно до вимірювального резистора 1 та опорного резистора 2. До виходів блоку керованих ключів 3 підключений диференційний драйвер 6, вихід якого підключено до входу сигнального процесора 7, вихід якого підключений до першого входу керуючого конвертора 8, перший вихід якого підключений до керуючого входу блоку керованих ключів 3, а другий вихід підключено до вимірювального резистора 1 та опорного резистора 2. На другий вхід керуючого конвертора 8 підключений вихід операційного підсилювача 9 з додатковим резистором 10 в ланцюзі зворотного зв'язку. До входу операційного підсилювача 9 підключений вихід блоку керованих ключів 3. Третій вихід керуючого конвертора 8 підключений до дисплея 11.

Шумовий спосіб вимірювання температури здійснюється наступним чином.

У зоні вимірюваної температури T_X (за шкалою Кельвіна) розміщують вимірювальний резистор 1 з номінальним опором R_1 . Опорний резистор 2 з номінальним опором R_2 розміщують у термостаті з температурою $T_0 = 273,15\text{K}$ (точка плавлення льоду).

Першим кроком програми (Фіг.2) є введення значень відомих величин: номінальних опорів вимірювального R_1 та опорного резистора R_2 , додаткового резистора зворотного зв'язку R_3 операційного підсилювача 9, коефіцієнта підсилення шумової напруги K_1 , крутизни квадратичного детектування цієї напруги S коефіцієнта передачі усереднюючої ланки K_2 , смузи частот теплових флуктуацій Δf та температури T_0 опорного резистора.

Середньоквадратичні напруги вимірювального

і опорного резисторів відповідно до формули Найквіста визначаються виразами:

$$U_{n1} = \sqrt{4k\Delta f R_1 T_X}, \quad (1)$$

$$U_{n2} = \sqrt{4k\Delta f R_2 T_0}, \quad (2)$$

де U_{n1} і U_{n2} - середньоквадратичні напруги першого і другого резисторів; k - постійна Больцмана; Δf - смуга частот, у якій вимірюється шумова напруга теплових флуктуацій.

Номинальні опори вимірювального і опорного резисторів при нульовій температурі за шкалою Цельсія (273,15K) вибирають рівними ($R_1=R_2=R$) (крок 3 алгоритму). Однак у процесі вимірювання температури T_X опір вимірювального резистора R_1 змінюється через температурний коефіцієнт опору резистора і його деградації в агресивному середовищі. Тому шумова напруга вимірювального резистора:

$$U_{n1} = \sqrt{4k\Delta f (R + \Delta R) T_X}, \quad (3)$$

де ΔR - неконтрольовані зміни опору вимірювального резистора.

Наступним кроком алгоритму є визначення шумових напруг U_{n1} на вимірювальному та U_{n2} опорному резисторах.

Шумові напруги (2) та (3) по черзі підсилюються одним підсилювачно-перетворювальним трактом (крок 5 алгоритму) зі смугою пропускання Δf і невіддільним рівнем власних шумів, які у шумовій термометрії співрозмірні з інформаційними шумами порівнюваних резисторів. У результаті квадратичного детектування (крок 6) шумових напруг і їхнього усереднення (крок 7) формуються напруги виду:

$$U_1 = \overline{SK_1^2 K_2 (U_{n1} + U_{n3})^2}, \quad (4)$$

$$U_1 = \overline{SK_1^2 K_2 (U_{n2} + U_{n3})^2}, \quad (5)$$

де S - крутизна квадратичного детектування; K_1 - коефіцієнт підсилення шумової напруги; K_2 - коефіцієнт передачі усереднюючої ланки; U_{n3} - середньоквадратична напруга власних шумів підсилювального тракту.

При визначенні середніх значень напруг (4) і (5) варто врахувати, що шуми порівнюваних резисторів і шуми підсилювального тракту між собою не корельовані, що означає:

$$U_{n1}U_{n3} = 0, \quad U_{n2}U_{n3} = 0, \quad (6)$$

З урахуванням співвідношень (6) постійні складові напруг (4) і (5) будуть пропорційні тільки сумі дисперсій шумових напруг:

$$U_1 = SK_1^2 K_2 (\overline{U_{n1}^2} + \overline{U_{n3}^2}), \quad (7)$$

$$U_1 = SK_1^2 K_2 (\overline{U_{n2}^2} + \overline{U_{n3}^2}), \quad (8)$$

Постійні напруги (7) і (8) роздільно запам'ятовуються (крок 8 алгоритму).

Після запам'ятовування напруги (7) і (8) замикають вимірювальний і опорний резистори ($R_1=R_2=0$), за алгоритмом кроки 12, 13. Підсилюють у смузі частот теплових флуктуацій напругу власних шумів, що квадратично детектують і усереднюють. У результаті одержують третю постійну напругу:

$$U_3 = SK_1^2 K_2 \overline{U_{n3}^2}, \quad (9)$$

яку також запам'ятовують, повторення кроку 8.

Далі, першу запам'ятовану напругу U_1 порівнюють із третьою запам'ятованою напругою U_3 і формують різницеву напругу:

$$U_1 - U_3 = SK_1^2 K_2 \overline{U_{n1}^2}, \quad (10)$$

Розмикають по черзі вимірювальний та опорний резистори (крок 15 алгоритму). Подають через вимірювальний резистор з опором $R_1=R+\Delta R$ різницеву напругу (10) на операційний підсилювач із додатковим резистором R_3 у ланцюзі від'ємного зворотного зв'язку. Коефіцієнт підсилення K_3 такого підсилювача визначається вираженням (крок 16):

$$K_3 = \frac{R_3}{R + \Delta R}, \quad (11)$$

Підсилена цим підсилювачем різницева напруга прийме вид (крок 17):

$$U_4 = K_3 (U_1 - U_3) = SK_1^2 K_2 K_3 \overline{U_{n1}^2}, \quad (12)$$

Підставляючи у вираз (12) значення шумової напруги (3) з урахуванням (11), одержуємо четверту постійну напругу:

$$U_4 = 4kSK_1^2 K_2 \Delta f R_3 T_X, \quad (13)$$

яку запам'ятовують (крок 17).

Другу запам'ятовану напругу U_2 порівнюють із третім запам'ятованою напругою U_3 й одержують різницеву напругу:

$$U_2 - U_3 = SK_1^2 K_2 \overline{U_{n2}^2}, \quad (14)$$

Подають різницеву напругу (14) через опорний резистор з опором $R_2=R$ на той же операційний підсилювач із додатковим резистором R_3 у ланцюзі від'ємного зворотного зв'язку. Коефіцієнт підсилення K_4 в цьому випадку буде визначатися опором опорного резистора (повторення кроків 15, 16):

$$K_4 = \frac{R_3}{R}, \quad (15)$$

Підсилена різницева напруга прийме вид (крок 17):

$$U_5 = K_4 (U_2 - U_3) = SK_1^2 K_2 K_4 \overline{U_{n2}^2}, \quad (16)$$

З урахуванням виразів (2) і (16) одержуємо значення п'ятої постійної напруги:

$$U_5 = 4kSK_1^2 K_2 \Delta f R_3 T_0, \quad (17)$$

яку також запам'ятовують (крок 17).

Порівнюють четверту U_4 і п'яту U_5 напруги і визначають їхню різницю:

$$U_4 - U_5 = 4kSK_1^2 K_2 \Delta f R_3 (T_X - T_0), \quad (18)$$

Кроком 20 алгоритму визначають результуючу крутизну перетворення різницевої напруги в температуру [B/°C]:

$$S_0 = \Delta k SK_1^2 K_2 \Delta f R_3, \quad (19)$$

З різницевої напруги (18) визначають вимірювану температуру за шкалою Цельсія (крок 21 алгоритму):

$$\Theta_X = T_X T_0 = \frac{U_4 - U_5}{S_0}, \quad (20)$$

де Θ - вимірювана температура за шкалою Цельсія.

З отриманого виразу (20) видно, що результат вимірювання не залежить від дійсних опорів вимірювального R_1 й опорного R_2 резисторів, а також

дисперсії напруг власних шумів підсилювального тракту \bar{U}_{n3}^2 .

Значення результуючої крутизни S_0 уточнюють у процесі калібрування по реперних точках, що відповідають температурам плавлення і затвердіння чистих металів.

В якості вимірювального резистора з нестабільним опором може бути використана будь-яка шумлива ділянка електричного ланцюга, наприклад, металевий елемент конструкції, частина провідного матеріалу в контрольованому об'єкті, ділянка термоіонізованого газового середовища, продукти згоряння твердого палива і т.п. Таким чином, завдяки виключенню впливу нестабільності опору шумливого термочутливого елемента розширюються функціональні можливості шумової термометрії.

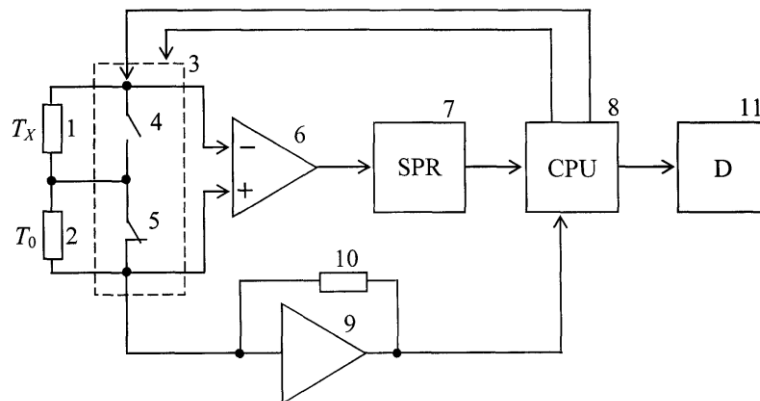
Отримання та обробка шумових напруг резисторів 1 та 2 (Фіг.1) здійснюється в вимірювально-обчислювальному комплексі за розглянутим алгоритмом програми.

Формування шумових напруг (2) та (3) здійснюється за допомогою ключів 4 та 5, які по черзі замикаються та розмикаються за командами керуючого конвертора 8, що подаються на блок керування ключів 3. При розімкненому ключі 4 та замкненому ключі 5 з вимірювального резистора 1 знімається шумова напруга (2), в протилежному положенні ключів 4 та 5 - знімається шумова напруга (3). Кожна шумова напруга вводиться через диференційний драйвер 6 в сигнальний процесор 7, де відбуваються операції фільтрації, усереднення та квадратичного перетворення шумових напруг. При одночасному замиканні ключів 4 та 5 на виході сигнального процесора 7 формується напруга пропорційна власним шумам підсилювально-перетворювального тракту (9). Постійні напруги (7), (8) та (9) вносяться до керуючого конве-

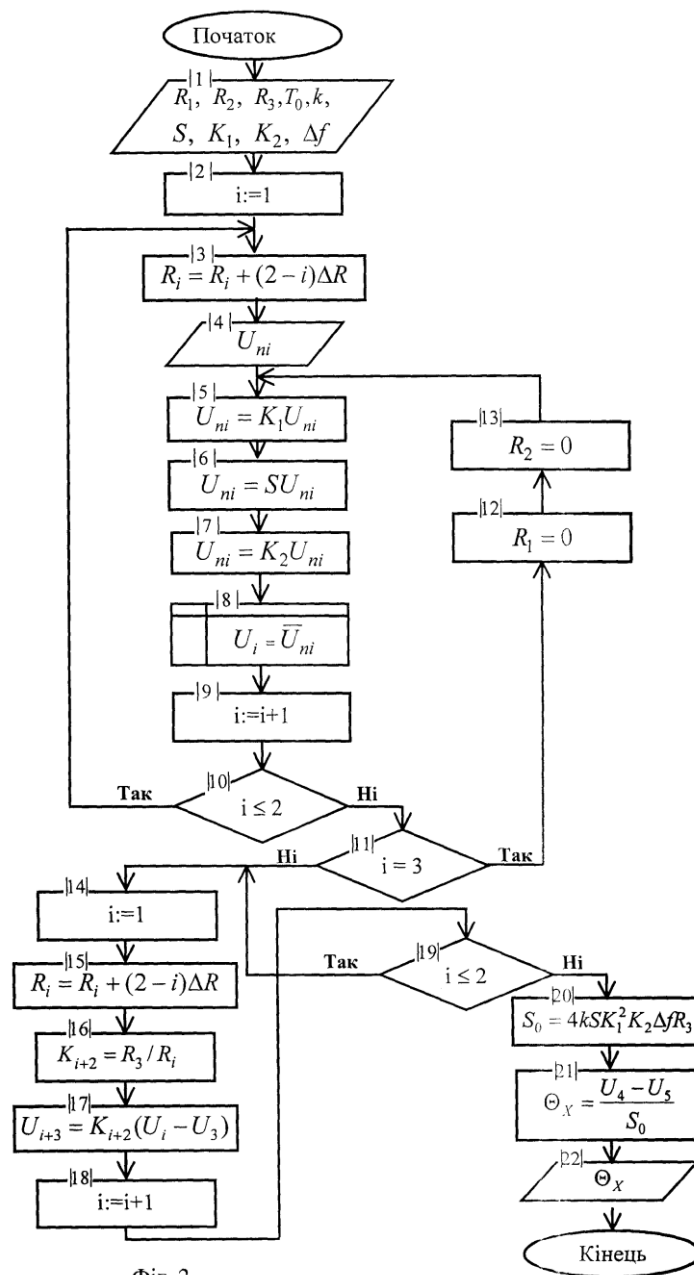
ртора 8, в якому вони запам'ятовуються. В процесорі керуючого конвертора створюються різницеві напруги (10) та (14), які також запам'ятовуються.

Розмикають ключ 4 і через вимірювальний резистор 1 подають від керуючого конвертора 8 різницеву напругу (10) на операційний підсилювач 9, в ланцюг від'ємного зворотного зв'язку якого включено додатковий резистор 10. Далі при розімкненому ключі 5 та замкнутому ключі 4 через опорний резистор 2 на той же операційний підсилювач подають різницеву напругу (14). Підсилені напруги (13) та (17) вводять до керуючого конвертора 8, де вони запам'ятовуються. В процесорі керуючого конвертора 8 порівнюють запам'ятовані напруги і формують різницеву напругу (18). За цією напругою та розрахованій крутизні перетворення (19) визначають вимірювальну температуру за шкалою Цельсія. Результат обчислення виводять на дисплей 11.

Моделювання запропонованого способу на ЕОМ підтвердило можливість виключення впливу нерівності опорів двох шумових резистивних елементів у діапазоні вимірюваних температур за шкалою Цельсія від 200°C до 1300°C. При цьому опір вимірювального резистора змінювався від 10кОм до 30кОм, що відповідало моделюванню його окислювання у високотемпературному середовищі. Час усереднення кожної із шумових напруг вибирався в межах 3-5с при коефіцієнті підсилення підсилювального тракту до 80дБ. Сумарна похибка від залишкового невиключеного рівня власних шумів і його тимчасової нестабільності складала близько 0,1% від вимірюваної температури. Інформаційний тепловий шум моделювався білим шумом у смузі частот 50-150кГц при середній частоті 100кГц і початковому рівні шуму 5-10мкВ. Похибка запам'ятовування підсилених і перетворених напруг приймалася 0,01%, що відповідає точності сучасних цифрових запам'ятовувачих пристроїв.



Фіг. 1.



Фіг. 2.