



УКРАЇНА

(19) UA (11) 28449 (13) U

(51) МПК (2006)

G01K 7/30

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ШУМОВИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

1

2

(21) u200708673

(22) 27.07.2007

(24) 10.12.2007

(72) СКРИПНИК ЮРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ, UA,
КАПАМЄЄЦЬ ТЕТЯНА ПЕТРІВНА, UA(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ, UA

(56)

(57) 1. Шумовий спосіб вимірювання температури, при якому встановлюють резистивний елемент у зоні вимірювання температури, отримують його шумову напругу, яку перетворюють в постійну складову усередненої напруги шляхом підсилення в смузі частот теплових флуктуацій разом з власними шумами підсилювального тракту, квадратичного детектування, усереднення і запам'ятовування, який **відрізняється** тим, що резистивний елемент встановлюють в зоні вимірювання температури шляхом включення в вимірювальне плече мостової схеми за допомогою двопровідної з'єднувальної лінії, одну із діагоналей мостової схеми періодично закорочують, з другої діагоналі мостової схеми по чергово з шумовою напругою отримують додаткову шумову напругу, яку перетворюють в постійну складову усередненої напруги, порівнюють дві постійні

складові усереднених напруг між собою, при цьому їх різницю приводять до нуля зміною співвідношення опорів плечей мостової схеми, вимірюють одну із усереднених напруг та визначають температуру за формулою

$$T_x = \frac{(r_2 + r_3)^2}{r_2 r_3 r_4} \cdot \frac{U_0}{S_n},$$

де r_2, r_3, r_4 - опори плечей моста при нульовій різниці напруг;

U_0 - виміряна одна із усереднених напруг;

S_n - нормована крутизна перетворення.

2. Шумовий спосіб вимірювання температури за п. 1, який **відрізняється** тим, що після вимірювання однієї із усереднених напруг закорочують вимірювальне плече мостової схеми, знову вимірюють одну із усереднених напруг, на значення якої зменшують раніше виміряну одну з усереднених напруг: $U_0 = U'_0 - U''_0$,

де U'_0 - початкова виміряна напруга;

U''_0 - виміряна напруга при закороченому плечі мостової схеми.

Корисна модель відноситься до шумової термометрії і може бути використана для дистанційного вимірювання температури за рівнем теплового шуму резистивного елемента, що розташований на віддаленому об'єкті в агресивному середовищі.

Відомий шумовий спосіб вимірювання температури [див. Геращенко О.А., Гордов Н.А., Лах В.И., Стадник Б.О., Ярышев Н.А. Температурные измерения: Справочник. - К.: Наукова думка, 1984. - с.21-22], оснований на вимірюванні середнього квадрату напруги теплового шуму резистивного елемента, що розташований на віддаленому об'єкті, і визначенні температури за формулою

$$T_x = \frac{\bar{U}^2}{4kR\Delta f}, \quad (1)$$

де \bar{U}^2 - середній квадрат (дисперсія) напруги теплового шуму;

k - постійна Больцмана;

R - опір резистивного елемента;

Δf - смуга частот, в якій виділяється шумова напруга.

При визначенні температури за вказаною формулою необхідно враховувати опір R резистивного елемента, який знаходиться на віддаленому об'єкті і працює в агресивному середовищі. Через незворотні зміни опору резистивного елемента від дії агресивного середовища виникає велика похибка, яку важко врахувати або зкомпенсувати.

Відомий шумовий спосіб вимірювання температури [див. Саватеев А.В. Шумовая термометрия. - Л.: Энергоатомиздат.

(13) U

(11) 28449

(19) UA

Ленинградское отделение, 1987. - с.96-97], при якому разом з вимірюванням дисперсії теплового

шуму \bar{U}^2 безпосередньо вимірюють опір R резистивного елемента і здійснюють операцію ділення вимірюваної дисперсії теплового шуму на додатково виміряний опір резистивного елемента.

Необхідність подачі електричної напруги на віддалений резистивний елемент з метою вимірювання його опору ускладнює реалізацію цього способу. Крім того, додаткова лінія зв'язку шунтує резистивний елемент і є джерелом додаткових завад, що знижує точність вимірювання температури.

Відомий також шумовий спосіб вимірювання температури [див. Патент України на корисну модель №16665, МПК G01K7/30, 2006р.], при якому встановлюють резистивний елемент у зоні вимірювання температури, отримують його шумову напругу, яку перетворюють в постійну складову усередненої напруги шляхом підсилення в смузі частот теплових флуктуацій разом з власними шумами підсилювального тракту, квадратичного детектування, усереднення і запам'ятовування.

У відомому способі похибка від непостійності опору резистивного елемента виключається додатковим вимірюванням опору цього елемента шляхом подачі постійної напруги, пропорційної дисперсії напруги теплового шуму, через резистивний елемент на операційний підсилювач з додатковим резистором в ланцюгу його зворотного зв'язку. При цьому виконується операція ділення постійної напруги, пропорційної дисперсії шумової напруги, на опір резистивного елемента на постійному струмі, що виключає вплив його нестабільності.

При дистанційних вимірюваннях температури ємність лінії зв'язку віддаленого резистивного елемента з вимірювальною схемою шунтує цей резистивний елемент, що змінює смугу пропускання Δf і викликає значну похибку в значенні вимірюємої дисперсії шумової напруги. Виключити цю похибку корекцією омичного опору резистивного елемента на постійному струмі неможливо. Тому точність вимірювання температури віддалених об'єктів з агресивним середовищем (металургійних печей, хімічних та ядерних реакторів) шумовим способом залишається невисокою.

В основу корисної моделі поставлена задача створити такий шумовий спосіб вимірювання температури, в якому шляхом введення нових операцій з шумовими сигналами і обробки результатів проміжних вимірювань за новою формулою забезпечило б виключення впливу ємності з'єднувальної лінії і нестабільності опору самого резистивного елемента на результат вимірювання температури, що дозволить підвищити точність дистанційного вимірювання температури віддалених об'єктів.

Поставлена задача досягається тим, що в шумовий спосіб вимірювання температури, при якому встановлюють резистивний елемент у зоні вимірювання температури, отримують його шумову напругу, яку перетворюють в постійну

складову усередненої напруги шляхом підсилення в смузі частот теплових флуктуацій разом з власними шумами підсилювального тракту, квадратичного детектування, усереднення і запам'ятовування, згідно з корисною моделлю, резистивний елемент встановлюють в зоні вимірювання температури шляхом включення в вимірювальне плече мостової схеми за допомогою двопровідної з'єднувальної лінії, одну із діагоналей мостової схеми періодично закорочують, з другої діагоналі мостової схеми по чергово з шумовою напругою отримують додаткову шумову напругу, яку перетворюють в постійну складову усередненої напруги, порівнюють дві постійні складові усереднених напруг між собою, при цьому їх різницю приводять до нуля зміною співвідношення опорів плечей мостової схеми, вимірюють одну із усереднених напруг та визначають температуру за формулою

$$T_x = \frac{(r_2 + r_3)^2}{r_2 r_3 r_4} \cdot \frac{U_0}{S_n},$$

де r_2, r_3, r_4 - опори плечей моста при нульовій різниці напруг;

U_0 - виміряна одна із усереднених напруг;

S_n - нормована крутизна перетворення.

Доцільно, щоб після вимірювання однієї із усереднених напруг закорочували б вимірювальне плече мостової схеми, знову вимірювали одну із усереднених напруг, на значення якої зменшували раніше виміряну одну з усереднених напруг:

$$U_0 = U'_0 - U''_0$$

де U'_0 - початкова виміряна напруга;

U''_0 - виміряна напруга при закороченому плечі мостової схеми.

Включення резистивного елемента за допомогою двопровідної з'єднувальної лінії в схему чотириплечого моста, одну з діагоналей якого періодично закорочують, з іншої діагоналі моста по чергово знімають дві шумові напруги, які підсилюють в смузі частот теплового шуму, квадратують і інтегрують одними і тими ж перетворювальними ланцюгами, а потім окремо запам'ятовують постійні складові цих напруг дозволяє порівняти два стани мостової схеми при розімкнутій і замкнутій її діагоналі. Зміною опорів плечей моста зводять різницю запам'ятованих порівнюваних напруг до нуля, що забезпечує однозначний зв'язок активної складової комплексного опору резистивного елемента з опорами плечей моста. Вимірюванням однієї із порівнюваних напруг в момент їх рівності визначають дисперсію шумової напруги нагрітого резистивного елемента. Підставляючи в запропоновану формулу значення опорів плечей моста, відповідаючих нульовій різниці порівнюваних напруг, і значення однієї із порівнюваних напруг в момент їх рівності, обчислюють дійсне значення температури резистивного елемента незалежно від величини ємності з'єднувальної лінії і опору самого резистивного елемента, що дозволяє підвищити точність дистанційного вимірювання температури віддалених об'єктів.

На Фіг. приведена вимірювальна схема, за допомогою якої реалізується запропонований шумовий спосіб вимірювання температури.

Резистивний елемент 1, шунтований ємністю 2 двопровідної лінії зв'язку, включений в вимірювальне плече мостової схеми 3, в плечі відношення якої включені низькоомний 4 і високоомний 5 резистори, і в плече порівняння - магазин опорів 6.

В одну діагональ моста включений автоматичний перемикач 7, в іншу діагональ - диференціальний підсилювач 8. До виходу диференціального підсилювача 8 підключені смуговий фільтр 9, квадратичний перетворювач 10, усереднюючий резистор 11 і автоматичний перемикач 12. Керуючі входи автоматичних перемикачів з'єднані між собою і підключені до генератора прямокутної напруги 13. Один вихід автоматичного перемикача з'єднаний з накопичувальним конденсатором 14, другий вхід - з накопичувальним конденсатором 15. Між накопичувальними конденсаторами включений нуль-індикатор 16, а до одного з накопичувальних конденсаторів підключений вольтметр 17. Ключ 18 закорочує вимірювальне плече мостової схеми 3.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Резистивний елемент 1 розміщують на віддаленому об'єкті, температуру якого необхідно дистанційно вимірювати. В резистивному елементі 1 з опором r_1 в результаті нагріву утворюється тепловий шум, який по двопровідній лінії зв'язку з ємністю 2 поступає в вимірювальне плече чотириплечової мостової схеми 3. Через шунтуючу дію ємності лінії зв'язку дисперсія теплового шуму резистивного елемента, поступаючого в мостову схему, знижується до значення:

$$\overline{U}^2 = 4kT_x \Delta f \operatorname{Re} Z, \quad (1)$$

де k - постійна Больцмана;

T_x - термодинамічна температура, що вимірюється;

Δf - смуга частот, в якій виділяється тепловий шум.

$\operatorname{Re} Z$ - активна складова комплексного опору Z резистивного елемента 1, що шунтований ємністю 2.

При паралельній схемі заміщення резистивного елемента 1 з опором r_1 і ємністю C лінії зв'язку активна складова комплексного опору вимірювального плеча мостової схеми 3

$$\operatorname{Re} Z = \frac{r_1}{1 + (2\pi f_0 r_1 C)^2}, \quad (2)$$

де f_0 - центральна частота смуги частот Δf шуму, що вимірюється.

При вказаному положенні автоматичного перемикача 7 через плечі мостової схеми 3 протікає шумовий струм, середнє квадратичне значення якого:

$$i_1 = \sqrt{\overline{U}_1^2} / (\operatorname{Re} Z + r_2 + r_3 + r_4), \quad (3)$$

де r_2 і r_3 - опори плечей відношення 4 і 5;

r_4 - опір магазину опорів 6.

На входи диференціального підсилювача 8 поступає падіння напруги шумового струму (3) на опорах високоомного резистора 5 і 6:

$$U_2 = \frac{r_3 + r_4}{\operatorname{Re} Z + r_2 + r_3 + r_4} \sqrt{\overline{U}_1^2}, \quad (4)$$

Крім шумової напруги U_2 на входи диференціального підсилювача 8 діють теплові шуми самих високоомного резистора 5 і магазину опорів 6. Самому диференціальному підсилювачу 8 притаманні власні шуми теплового та дробового характеру. В результаті підсилюється сума шумових напруг від різних джерел. Але враховуючи, що шуми від незалежних джерел між собою не корельовані, то підсилену диференціальним підсилювачем 8 шумову напругу можливо представити в вигляді середньоквадратичної суми:

$$U_3 = k_1 \sqrt{\overline{U}_2^2 + \overline{U}_{31}^2 + \overline{U}_{41}^2}, \quad (5)$$

де k_1 - коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача 8;

\overline{U}_2^2 - дисперсія шумової напруги U_2 ;

\overline{U}_{31}^2 - дисперсія шумової напруги від теплових шумів високоомного резистора 5 і магазину опорів 6;

\overline{U}_{41}^2 - дисперсія власних шумів диференціального підсилювача 8.

Підсиленна напруга U_3 фільтрується в смузі частот Δf смуговим фільтром 9 і перетворюється в квадратичному перетворювачі 10. В результаті квадратичного перетворення шумової напруги, яка має знакозмінний характер, виникає постійна складова напруги:

$$U_4 = k_2^2 k_1^2 S \sqrt{\overline{U}_2^2 + \overline{U}_{31}^2 + \overline{U}_{41}^2}, \quad (6)$$

де k_2 - коефіцієнт передачі смугового фільтра 9;

S - крутизна перетворення квадратичного перетворювача 10.

Виокремлення постійної напруги із шумів здійснюється накопичувальним конденсатором 14, підключеним автоматичним перемикачем 12 через усереднюючий резистор 11. В результаті усереднення, яке створюється інтегруючим ланцюгом із резистора 11 і конденсатора 14, на конденсаторі 14 формується постійна напруга:

$$U_5 = k_1^2 k_2^2 S m \left(\overline{U}_2^2 + \overline{U}_{31}^2 + \overline{U}_{41}^2 \right), \quad (7)$$

де m - масштабний коефіцієнт інтегруючого ланцюга.

При перемиканні автоматичних перемикачів 7 і 12 в протилежне положення діагональ мостової схеми 3 закорочується, а усереднюючий резистор 11 перемикається на конденсатор 15. В результаті замикання вимірювальної діагоналі мостової схеми через резистори 4 та 5 перестає протікати шумовий струм, який генерується в резистивному елементі 1. Струм через магазин опорів 6 зростає до значення:

$$i_2 = \sqrt{U_1^2} / (ReZ + r_4), \quad (8)$$

На входи диференціального підсилювача 8 починає діяти падіння напруги від шумового струму i_2 на магазині опорів 6:

$$U_6 = \frac{r_4}{ReZ + r_4} \sqrt{U_1^2}, \quad (9)$$

Через зміну конфігурації вхідного ланцюга диференціального підсилювача 8 дещо змінюється рівень теплових шумів, що вносяться резисторами 4 і 5. Дійсно, паралельно резистору 5 виявляється включений резистор 4. Хоча вони і знеструмлені, але їх власні теплові шуми діють на диференціальний підсилювач 8.

Через зміну еквівалентного опору вхідного ланцюга диференціального підсилювача 8 також дещо змінюється і рівень власних шумів цього підсилювача. Тому напругу на виході диференціального підсилювача 8 по аналогії з виразом (5) можливо представити в вигляді:

$$U_7 = k_1 \sqrt{U_6^2 + U_{32}^2 + U_{42}^2}, \quad (10)$$

де U_{32}^2 - дисперсія шумової напруги від теплових шумів резисторів 4, 5 і магазину опорів 6;

U_{42}^2 - дисперсія власних шумів диференціального підсилювача 8 при паралельному підключенні резистора 4 резистору 5.

Після фільтрації шумової напруги (10) і його квадратування на накопичувальному конденсаторі 15 формується постійна напруга:

$$U_8 = k_1^2 k_2^2 S_m (\overline{U_6^2} + \overline{U_{32}^2} + \overline{U_{42}^2}). \quad (11)$$

Накопичені конденсаторами 14 і 15 напруги зрівнюються за допомогою нуль-індикатора 16, який включений між цими конденсаторами. При безперервній роботі автоматичних перемикачів 7 і 12 через нуль-індикатор 16 буде протікати зрівнювальний струм, пропорційний напругам, що порівнюються:

$$i_3 = S_2 (U_5 - U_8), \quad (12)$$

де S_2 - крутизна перетворення різницевої напруги в струм, яка залежить від частоти перемикачів накопичувальних конденсаторів і параметрів ланцюга ділення.

Різницю порівнюємих напруг зводять до нуля зміною опору магазину опорів 6 при заданому співвідношенні опорів плечей відношення, що містять резистори 4 і 5 мостової схеми. При досягненні нуля $U_5 = U_8$, що означає:

$$\overline{U_2^2} + \overline{U_{31}^2} + \overline{U_{41}^2} = \overline{U_6^2} + \overline{U_{32}^2} + \overline{U_{42}^2}, \quad (13)$$

При оцінці рівності (13) варто врахувати, що при закорочуванні діагоналі мостової схеми 3 високоомний резистор 4 виявляється включеним паралельно низькоомному резистору 5. При цьому еквівалентний опір плеча диференціального підсилювача 8 із паралельно включених резисторів 4 і 5 змінюється несуттєво. Тому можна вважати, що

$$\overline{U_{31}^2} \approx \overline{U_{32}^2}, \quad (14)$$

Із цих міркувань можливо вважати, що і рівень власних шумів диференціального підсилювача 8 зміниться незначно, а значить:

$$\overline{U_{41}^2} \approx \overline{U_{42}^2}, \quad (15)$$

Із урахуванням (14) і (15) рівняння (13) спрощується:

$$\overline{U_2^2} \approx \overline{U_6^2}. \quad (16)$$

Підставляючи в вираз (16) значення $\overline{U_2^2}$ із виразу (4) і значення $\overline{U_6^2}$ із виразу (9), отримуємо

$$\frac{r_3 + r_4}{ReZ + r_2 + r_3 + r_4} = \frac{r_4}{ReZ + r_4}. \quad (17)$$

Вирішивши рівняння (17) відносно активної складової опору резистивного елемента 1, який шунтований ємністю 2, нарешті отримаємо:

$$ReZ = r_4 \frac{r_2}{r_3}. \quad (18)$$

Із співвідношення (18) витікає, що активну складову опору резистивного елемента 1 можливо визначити за опором r_4 магазину опорів 6 і

відношенню опорів $\frac{r_2}{r_3}$ плечей відношення, що

містять резистори 4 і 5 мостової схеми незалежно від рівня власних шумів вимірювальної схеми і нестабільності параметрів перетворювальних елементів.

Температуру резистивного елемента 1 оцінюють по показанню вольтметра 17, яким вимірюється напруга на накопичувальному конденсаторі 15. Згідно виразу (11), якщо знехтувати власними шумами елементів вимірювальної схеми, які мають значно меншу температуру (температуру навколишнього середовища), ніж резистивний елемент 1 на об'єкті, виміряна постійна напруга:

$$U_0 = k_1^2 k_2^2 S_m (\overline{U_6^2} + \overline{U_{32}^2} + \overline{U_{42}^2}) \approx k_1^2 k_2^2 S_m \overline{U_6^2}. \quad (19)$$

Підставивши в вираз (19) значення дисперсії шумової напруги $\overline{U_6^2}$ із виразу (9) і враховуючи співвідношення (18), отримуємо:

$$U_0 = k_1^2 k_2^2 S_m \left(\frac{r_3}{r_2 + r_3} \right)^2 \overline{U_1^2}. \quad (20)$$

Підставивши в вираз (20) значення дисперсії шумової напруги резистивного елемента 1 із виразу (1), отримаємо:

$$U_0 = S_H \left(\frac{r_3}{r_2 + r_3} \right)^2 ReZ T_X, \quad (21)$$

де $S_H = 4 k_1^2 k_2^2 S_m \Delta f$ - нормована крутизна перетворення дисперсії шумової напруги в постійну напругу [В/К·Ом].

Вирішивши рівняння (21) відносно вимірюємої температури T_X з урахуванням співвідношення (18), отримаємо розрахункову формулу:

$$T_X = \frac{(r_2 + r_3)^2}{r_2 r_3 r_4} \frac{U_0}{S_H}, \quad (22)$$

в яку не входить опір r_1 резистивного елемента 1 і ємності C з'єднувальної лінії. Подальше підвищення точності вимірювання температури досягається виключенням впливу власних шумів вимірювальної схеми. Вважаємо, що початкова виміряна напруга U'_0 . Для виключення впливу власних шумів вимірювальної схеми закорочують вимірювальне плече мостової схеми 3 ключем 18. При цьому рівновага мостової схеми 3 по показанням нуль-індикатора 16 не порушується. Але показання вольтметра 17 зменшається до значення:

$$U''_0 = k^2 k^2 S_m \left(U_{32}^2 + U_{42}^2 \right), \quad (23)$$

яке визначається тільки дією власних шумів резисторів 4 і 5, магазину резисторів 6 і диференціального підсилювача 8.

З урахуванням виміряної напруги (23) вводять поправку в постійну напругу за розрахунковою формулою (22). Для цього із напруги U'_0 віднімають додатково виміряну напругу U''_0 . Уточнена розрахункова формула приймає вигляд:

$$T_X = \frac{(r_2 + r_3)^2}{r_2 r_3 r_4} \cdot \frac{U'_0 - U''_0}{S_H}, \quad (24)$$

де нормована крутизна S_H має, як відзначалось вище, розмірність [В/К·Ом] і визначається в процесі калібрування.

Із отриманого виразу видно, що результат вимірювання, обчислений за формулою (24), не залежить ні від опору резистивного елемента 1, ні від ємності 2 з'єднувальної лінії, ні від рівня власних шумів вимірювальної схеми, що і забезпечує високу точність дистанційного вимірювання температури.

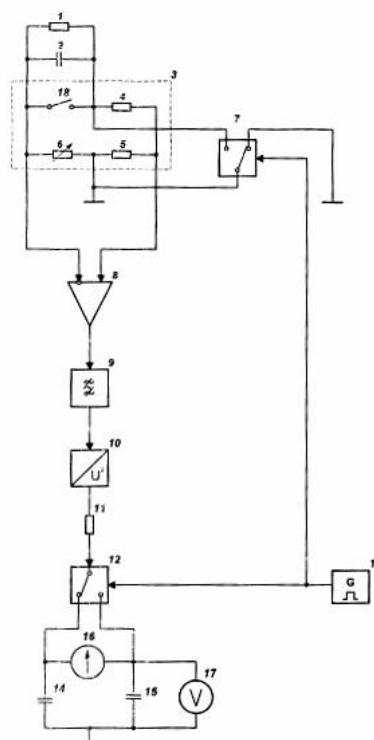
Таким чином, використання запропонованого способу вимірювання температури дозволяє:

- здійснювати незалежне вимірювання активної складової опору резистивного елемента, шунтованого ємністю з'єднувальної лінії, без використання додаткового джерела напруги;

- окремо і незалежно від опору резистивного елемента вимірювати дисперсію ослабленої з'єднувальною лінією шумової напруги;

- підстановкою в запропоновану формулу значень опорів плечей мостової схеми, які відповідають її нульовому балансу, і виміряної постійної напруги на накопичувальному конденсаторі, визначати дійсну температуру віддаленого резистивного елемента;

- на результат вимірювання температури не впливає нестабільність опору резистивного елемента і непостійність ємності з'єднувальної лінії, що дозволяє використовувати високоомні резистивні елементи і довгі з'єднувальні лінії.



Фиг.