



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 46490

(13) A

(51) 6 G01K15/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД  
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ  
ВЛАСНИКА  
ПАТЕНТУ

## (54) СПОСІБ САМОПЕРЕВІРКИ ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

1

2

(21) 2001075335

(22) 25 07 2001

(24) 15 05 2002

(46) 15 05 2002, Бюл. № 5, 2002 р

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Курко Владимир Романович, Лісовський Олександр Анатолійович, Фрідберг Еммануїл Ізраїлевич

(73) КИЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ДИЗАЙНУ

(57) 1 Спосіб самоперевірки датчиків температури, який полягає в тому, що з чутливого елемента датчика, який знаходиться на об'єкті, виділяють шумову напругу в смузі частот теплових флуктуацій, вимірюють середній квадрат шумової напруги, визначають дійсну температуру чутливого елемента датчика по формулі, порівнюють її з показаннями вторинного приладу та визначають похибку датчика, який відрізняється тим, що шумову напругу датчика розщеплюють на дві протифазні напруги, з яких одну додатково розщеплюють на дві протифазні напруги, які по чергові складають з другою, не розщепленою напругою, одержані сумарні напруги підсилюють і зводять у квадрат, усереднюють одержані результати, формують із усереднених напруг різницеву напругу, яку подають на чутливий елемент датчика і підсилюють в кількості разів зворотно пропорційно опорі чутливого елемента, вимірюють підсилену напругу, а дійсну температуру  $T_x$  чутливого елемента датчика визначають по формулі

$$T_x = \frac{U_{10}}{U_0} T_0,$$

де  $T_0$  - температура калібровки датчика на об'єкті,  
 $U_{10}$  - шумова напруга, виміряна в процесі самоперевірки,

$U_0$  - шумова напруга, виміряна в процесі калібровки при температурі  $T_0$

2 Пристрій для самоперевірки датчиків температури, до складу якого входять вхідні клеми, до яких

через фільтр верхніх частот підключено симетричні входи диференційного підсилювача, до складу якого входять два операційні підсилювачі, послідовно з'єднані підсилювач високої частоти, амплітудний детектор і фільтр нижніх частот, а також вихідний вольтметр, який відрізняється тим, що в нього введені генератор низької частоти, автоматичний комутатор, синхронний детектор, підсилювач низької частоти, додатковий операційний підсилювач з резистором, що включений в ланцюг від'ємного зворотного зв'язку, розділові конденсатори і другий фільтр нижніх частот, а також суматор, фазоінверсний каскад і повторювач напруги, при цьому входи фазоінверсного каскаду і повторювача напруги з'єднані з протифазними виходами диференційного підсилювача, вихід повторювача напруги з'єднано з одним входом суматора, прямий та інверсний виходи фазоінверсного каскаду з'єднані з входами автоматичного комутатора, вихід якого з'єднаний з другим входом суматора, причому вихід суматора з'єднаний з входом височастотного підсилювача, вихід фільтра нижніх частот з'єднано через розділові конденсатори і вхідні клеми з входом додаткового операційного підсилювача, вихід якого через послідовно з'єднані підсилювач низької частоти, синхронний детектор і додатковий фільтр нижніх частот з'єднано з вихідним вольтметром, а керуючі входи синхронного детектора і автоматичного комутатора підключені до виходу генератора низької частоти

3 Пристрій за п. 2, який відрізняється тим, що в нього введено ключ, конденсатор великої ємності, двопозиційний перемикач і потенціометр, підключений до виходу повторювача напруги, рухомий контакт потенціометра з'єднано з входом двопозиційного перемикача, виходи якого з'єднані з входами автоматичного комутатора, а конденсатор великої ємності через ключ включено між вхідними клемми пристрою

Винахід відноситься до галузі повірки засобів температурних вимірювань та може бути використаний для самоповірки датчиків температури (тер-

мoeлектричних, терморезистивних, термодіодних і т. ін.) по рівню генерованого теплового шуму без застосування зразкових засобів вимірювання

(13) A  
(11) 46490  
(19) UA

Самоперевірка дає можливість виявити похибки термоелектричних або терморезистивних датчиків, які розташовані у важкодоступних місцях або в агресивних середовищах, не використовуючи зразкові засоби вимірювання температури та прецизійні термостати. Необхідність в повірки виникає тому, що в процесі експлуатації термоелектричних датчиків на високотемпературному об'єкті в його робочому спаї відбуваються незворотні фізико-хімічні зміни, які деформують його номінальну статичну характеристику (НСХ). Ці зміни призводять до паралельного зміщення НСХ поблизу робочої точки та зміни її кута нахилу. Аналогічні зміни з НСХ відбуваються і з терморезистивними датчиками, в яких змінюється температурний коефіцієнт опору та його початкові опори при 0°C.

Паралельне зміщення НСХ викликає появу адитивної складової похибки (похибка "нуля"), а зміна кута нахилу обумовлює появу мультиплікативної складової похибки (похибка "чутливості"). Звичайно, ці похибки виявляються в процесі повірки, яка проводиться після демонтажу датчика з об'єкту в лабораторних умовах. Проте часто демонтаж не тільки неможливий, але ж і не бажаний через істотні відзнаки умов теплообміну датчика, який повіряється, та зразкового датчика. Це особливо виявляється у тих випадках, коли датчик має тепловий контакт з конструктивними елементами об'єкту та контрольовані зміни теплофізичних умов його експлуатації важкі. Якщо демонтаж датчиків неможливий або недоцільний, тоді їх похибки оцінюють за допомогою спеціальних способів та повірочних схем.

Відомий спосіб самоперевірки датчиків температури по А.С. СРСР № 1362964, МПК G01 K 15/00, 1987, згідно з яким через додатковий нагрівач, який міститься в зоні чутливого елемента датчика (робочого спаю термопари), пропускають електричний струм та встановлюють потрібну температуру чутливого елемента  $T_1$ , після чого охолоджують чутливий елемент датчика, пропускаючи через робочий спай сталий струм, і фіксують знижену температуру  $T_2$ , збільшують струм через додатковий нагрівач та фіксують температуру  $T_3$ , яка зросла, після чого переставляють пропускати сталий струм через робочий спай та фіксують стапу температуру  $T_4$ , а похибку датчика  $\Delta T$  визначають по формулі

$$\Delta T = T_1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_3) - (T_1 - T_2)} \cdot \frac{PKI}{2\lambda},$$

де  $P$  - коефіцієнт Пельтьє для матеріалів термоелектродів, які утворюють робочий спай,

$I$  - початковий струм через додатковий нагрівач,

$K$  - коефіцієнт пропорційності між струмом нагрівача та струмом охолодження робочого спаю,

$\lambda$  - еквівалентна теплопровідність робочого спаю датчика.

Цей спосіб не потребує додаткових зразкових засобів. Але його використання не завжди можливе, тому що потрібен буде додатковий нагрівач в зоні чутливого елемента, якого в стандартних датчиках нема. Крім того, коефіцієнт Пельтьє, який входить в розрахункову формулу, несталий через фізико-хімічні зміни в зоні робочого спаю.

Відомий спосіб самоперевірки датчиків темпе-

ратури по А.С. СРСР № 1150497, МПК G01 K 15/00, 1985, згідно з яким через чутливий елемент терморезистивного датчика пропускають прямокутний імпульс струму, перетворюють падіння напруги в код та порівнюють його з результатами, які були отримані при його пусконаладжувальних випробуваннях, та визначають по різниці кодів похибку датчика, при цьому тривалість і імпульсу вибирають із співвідношення

$$\tau = Cm \frac{R_t}{S} \cdot \frac{\delta}{1-\delta},$$

а амплітуду і імпульсу струму

$$I = 10 \sqrt{\frac{S}{R_t R_0 (1+100A)}} \cdot \frac{1-\delta}{\delta},$$

де  $C$  та  $m$  - середня питома теплоємність і маса чутливого елемента,

$R_t$  та  $R_0$  - тепловий та електричний опір чутливого елемента,

$S$  - площа поверхні теплового контакту,

$A$  - коефіцієнт, який характеризує чутливість датчика,

$\delta$  - коефіцієнт, який визначає ступінь відмінності процесу нагрівання чутливого елемента від адіабатичного.

Параметри імпульсного току повинні забезпечити нагрівання датчика від 0°C до 100°C в момент закінчення тестового імпульсу. Але через різницю в коефіцієнті  $\delta$  для об'єктів з різними теплофізичними властивостями, несталисть  $R_t$  та  $S$  в процесі тривалої роботи датчика, зміна маси  $m$  в часі та інше постають великі похибки в оцінці метрологічних характеристик датчиків.

Відомий також спосіб самоперевірки датчиків температури по А.С. СРСР № 195161, МПК G 01 K 15/00, 1967, який полягає в тому, що з чутливого елемента датчика, який знаходиться на об'єкті, виділяють шумову напругу в смузі частот теплових флуктуацій, вимірюють середній квадрат шумової напруги, визначають дійсну температуру чутливого елемента датчика по формулі, порівнюють її з показаннями вторинного приладу та визначають похибку датчика.

Крім того, відомий спосіб включає операцію вимірювання його омичного опору і визначення температури чутливого елемента датчика по формулі

$$T_x = \frac{U_{шх}^2}{Sk\Delta f R_x},$$

де  $T_x$  - температура по термодинамічній шкалі в К,

$U_{шх}^2$  - середній квадрат напруги теплових шумів,

$S$  - крутизна перетворення теплових шумів у вихідну напругу,

$k$  - стала Больцмана,

$\Delta f$  - смуга частот, в якій відбувається підсилення шумової напруги,

$R_x$  - опір чутливого елемента датчика.

Похибку датчика визначають порівнянням температури, яка вимірюється, вторинним приладом електричного термометра з дійсною температурою, яка обчислюється по значенню напруги теплових шумів з урахуванням опору чутливого еле-

менту  $R_x$  при температурі  $T_x$ . Але необхідність вимірювання опору  $R_x$  чутливого елементу датчика безпосередньо на об'єкті утруднює самоперевірку, тому що потребує зразкових засобів для визначення опору при різних температурах на об'єктах в умовах дії промислових перешкод. Крім того, точність вимірювання температури по шумовій напрузі низька, так як її важко виділити та поміряти на фоні завод та власних шумів повітряної апаратури.

Відомий пристрій для самоперевірки датчиків температури по А.С. СРСР № 661962, МПК G 01 K 15/00, 1961, який включає комутатор, аналого-цифровий перетворювач, обчислювальний блок, блок пам'яті та блок управління, а також блок формування дозованих імпульсів та блок вторинних перетворювачів, які включені між комутатором та аналого-цифровим перетворювачем, вхід якого з'єднується з першим входом обчислювального блоку, а вихід з'єднується з індикатором і блоком формування дозованих імпульсів.

Нагрівання робочого спаю термоелектричного датчика, який повіряється, дозованими імпульсами дозволяє проводити перевірку тільки "холодного" датчика, тобто на неробочому об'єкті. Якщо чутливий елемент датчика повіряється на діючому об'єкті, то на тепловий потік, який іде від об'єкту, накладається тепло від дозованих імпульсів. Це не дозволяє безпосередньо порівнювати результати випробувань, одержаних при повірці датчика на працюючому об'єкті, з результатами, які були зафіксовані раніше на цьому датчику при пусконаладжувальних роботах, особливо виконаних на холодному об'єкті.

Відомий пристрій для самоперевірки датчиків температури по А.С. СРСР № 684341, МПК G 01 K 15/00, 1979, який містить в собі генератор імпульсів зразкової амплітуди, з'єднаний з входом вимірювальної схеми, генератор імпульсів зразкової частоти та перемикач, який підключено входами до виходу генератора імпульсів зразкової амплітуди та виходу генератора імпульсів зразкової частоти, виходом з'єднаний з входом лічильника імпульсів, аналого-цифровий перетворювач, підключений до виходу вимірювальної схеми, а вхід якого, що управляє, підключено до виходів різних тригерів лічильника імпульсів.

Інтенсивність підігріву чутливого елементу терморезистивного датчика залежить від умов його теплообміну. Тому кількість тепла, яке віддає датчик у навколишнє середовище під час дії імпульсу струму, точно не може бути визначеним. Це призводить до появи додаткових похибок в залежності від теплового стану об'єкту, на якому міститься датчик.

Відомий також пристрій для самоперевірки датчиків температури (див. Саватеев А. В. Шумовая термометрия. Л. Энергоатомиздат Ленинградское отделение, 1967, С. 120 - 122), до складу якого входять вхідні клеми, до яких через фільтр верхніх частот підключено симетричні входи диференційного підсилювача, до складу якого входять два операційних підсилювача, послідовно з'єднані підсилювач високої частоти, амплітудний детектор та фільтр нижніх частот, а також вихідний вольтметр.

Крім того, пристрій включає амплітудний дискримінатор, електронний частотомір, осцилограф та цифро-печатний пристрій, при цьому електронний частотомір підключено до виходу амплітудного дискримінатора.

Про дійсну температуру чутливого елементу датчика судять по його тепловому шуму. При цьому в якості джерела опорного шумового сигналу використовують власний шум підсилювача, коли чутливий елемент датчика (резистор) шунтується конденсатором великої ємності. Перевищення сумарного шумового сигналу датчика і підсилювача над шумами підсилювача фіксується частотоміром (після амплітудного дискримінатора) по кількості шумових імпульсів, які пройшли. Відсутність підсилення по різницевому сигналу (по різниці імпульсів) не дозволяє отримати високу чутливість до температури датчика, який повіряється. Крім того, вплив опору датчика на рівень теплових шумів не дозволяє по вимірюваному перевищенню шумового сигналу однозначно судити про температуру чутливого елементу датчика.

В основу винаходу покладено задачу створити такий спосіб та пристрій для самоперевірки датчиків температури, в яких шляхом ведення нових операцій, елементів та зв'язків між ними забезпечилось би підвищення точності визначення похибок датчиків.

Поставлена задача вирішується тим, що в спосіб самоперевірки датчиків температури, який полягає в тому, що з чутливого елементу датчика, який міститься на об'єкті, виділяють шумову напругу в смузі частот теплових флуктуацій, вимірюють середній квадрат шумової напруги, визначають дійсну температуру чутливого елементу датчика по формулі, порівнюють її з показанням вторинного приладу і визначають похибку датчика, згідно з винаходом, шумову напругу датчика розщеплюють на дві протифазні напруги, з яких одну додатково розщеплюють на дві протифазні напруги, які по чергово складають з другою нерозщепленою напругою, одержані сумарні напруги підсилюють і зводять у квадрат, усереднюють одержані результати, формують із усереднених напруг різницеву напругу, яку подають на чутливий елемент датчика та підсилюють в кількість разів, зворотно пропорційну опору чутливого елементу, вимірюють підсилену напругу, а дійсну температуру  $T_x$  чутливого елементу датчика визначають по формулі

$$T_x = \frac{U_{10}}{U_0} T_0,$$

де  $T_0$  - температура калібровки датчика на об'єкті.

$U_{10}$  - шумова напруга, виміряна в процесі самоперевірки,

$U_0$  - шумова напруга, виміряна в процесі калібровки при температурі  $T_0$ .

Поставлена задача вирішується також тим, що в пристрій для самоперевірки датчиків температури, до складу якого входять вхідні клеми, до яких через фільтр верхніх частот підключені симетричні входи диференційного підсилювача, до складу якого входять два операційних підсилювача, послідовно з'єднані підсилювач високої частоти, амплітудний детектор та фільтр нижніх частот, а та-

кож вихідний вольтметр, згідно з винаходом, до нього введені генератор низької частоти, автоматичний комутатор, синхронний детектор, підсилювач низької частоти, додатковий операційний підсилювач з резистором, що включений в ланцюг від'ємного зворотного зв'язку, розділові конденсатори і другий фільтр нижніх частот, а також суматор, фазоінверсний каскад та повторювач напруги, при цьому входи фазоінверсного каскаду і повторювача напруги з'єднані з протифазними виходами диференційного підсилювача, вихід повторювача напруги з'єднаний з одним із входів суматора, прямий та інверсний виходи фазоінверсного каскаду з'єднані з входами автоматичного комутатора, вихід якого з'єднаний з другим входом суматора, при цьому вихід суматора з'єднаний з входом підсилювача високої частоти, вихід фільтра нижніх частот з'єднано через розділові конденсатори і вхідні клеми з входом додаткового операційного підсилювача, вихід якого через послідовно з'єднані підсилювач низької частоти, синхронний детектор і додатковий фільтр нижніх частот з'єднаний з вихідним вольтметром, а керуючі входи синхронного детектора і автоматичного комутатора підключені до виходу генератора низької частоти

Доцільно також в нього додатково ввести ключ, конденсатор великої ємності, двухпозиційний перемикач та потенціометр, підключений до виходу повторювача напруги, рухомий контакт движка потенціометра з'єднаний з входом двухпозиційного перемикача, виходи якого з'єднані з входами автоматичного комутатора, а конденсатор через ключ включено між вхідними клемми пристрою

Розщеплення шумового сигналу, прийнятого від датчика, на два протифазних, по чергові підсумовування протифазних сигналів, одержаних від одного сигналу, з другим сигналом, квадратичне перетворення сумарних сигналів, виділення із усереднених сигналів різницевої напруги, яку підсилюють в кількість разів, зворотно пропорційну опорі чутливого елементу датчика, введення в схему генератора низької частоти, автоматичного комутатора, синхронного детектора, фазоінверсного каскаду, додаткового операційного підсилювача та інших елементів, включених вказаним чином, дозволяє позбутися впливу власних некорельованих та корельованих шумів на значення теплового шуму, який поступає з датчика, а також виключити вплив несталості опорі чутливого елементу датчика на значення шумової напруги датчика, що підвищує точність визначення дійсної температури датчика, який розташований на об'єкті, а тому і точність визначення його похибки, не застосовуючи демонтаж датчика і не використовуючи зразкові засоби вимірювання температури та опорі

На кресленні подана функціональна схема пристрою для самоперевірки датчиків температури

На кресленні позицією 1 позначено чутливий елемент датчика на прикладі термоелектричного датчика (термопари), який розташований на об'єкті і знаходиться з ним в тепловому контакті

Пристрій має вхідні клеми 2 і 3 для підключення до датчика 1, фільтр 4 верхніх частот, дифере-

нційний підсилювач 5, до складу якого входять операційні підсилювачі 6 і 7, фазоінверсний каскад 8, повторювач напруги 9, автоматичний комутатор 10, генератор 11 низької частоти, суматор 12, підсилювач високої частоти 13, амплітудний детектор 14 з квадратичною характеристикою, фільтр 15 нижніх частот, розділові конденсатори 16 і 17, додатковий операційний підсилювач 18 з резистором 19, що включений в ланцюг від'ємного зворотного зв'язку, підсилювач 20 низької частоти, синхронний детектор 21, додатковий фільтр 22 нижніх частот, вольтметр 23, ключ 24, конденсатор 25 великої ємності, потенціометр 26 та двухпозиційний перемикач 27

Чутливий елемент 1 повітряного датчика підключають до вхідних клем 2 і 3 пристрою самоперевірки. Клеми через фільтр 4 верхніх частот з'єднані з симетричними входами диференційного підсилювача 5, виконаного на диференційних підсилювачах 6 і 7 з від'ємними зворотними зв'язками. До протифазних виходів диференційного підсилювача підключені фазоінверсний каскад 8 і повторювач напруги 9. Виходи фазоінверсного каскаду з'єднані з входами автоматичного комутатора 10, керуючий вхід якого підключено до виходу генератора 11 низької частоти, вихід автоматичного комутатора з'єднано з одним із входів суматора 12, другий вхід якого з'єднаний з виходом повторювача напруги 9. До виходу суматора підключені послідовно з'єднані підсилювач 13 високої частоти, амплітудний детектор 14 і фільтр 15 нижніх частот. Вихід фільтра нижніх частот через розділовальний конденсатор 16, чутливий елемент датчика 1 і розділовальний конденсатор 17 з'єднано із входом додаткового операційного підсилювача 18 з резистором 19 в колі від'ємного зворотного зв'язку. Вихід додаткового операційного підсилювача через синхронний детектор 21, який керується від генератора низької частоти, і додатковий фільтр 22 нижніх частот, з'єднаний з цифровим вольтметром 23. Ключ 24 з'єднує конденсатор 25 з видимими клемми пристрою. Потенціометр 26 підключено до виходу повторювача напруги 9, його рухомий контакт з'єднаний з входом двухпозиційного перемикача 27, виходи якого з'єднані з входом автоматичного комутатора 10.

Спосіб самоперевірки здійснюється так

На чутливому елементі датчика, який знаходиться на об'єкті при температурі  $T_x$ , виникає напруга теплових шумів  $U_{шх}(t)$  пропорційна температурі. Середній квадрат шумової напруги (дисперсія) згідно рівнянню Найквіста має вигляд

$$\overline{U_{шх}^2} = 4k\Delta f R_x T_x, \quad (1)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - стала Больцмана,

$\Delta f$  - смуга частот, в якій здійснюється вимірювання шумового сигналу,

$R_x$  - опір чутливого елементу датчика,

$T_x$  - температура по термодинамічній шкалі, К

По своєму рівню шумова напруга  $U_{шх}(t)$  одного порядку, а при вимірюванні низьких температур навіть менша за рівень власних шумів вимірювальної схеми

Для виділення інформаційного шумового сигналу від датчика 1 з дисперсією  $\overline{U_{шх}^2}$  із власних

шумів апаратури його розщеплюють диференціальним підсилювачем 5 на дві протифазні напруги, які подають на вхід вимірювальної схеми. Якщо вихідну шумову напругу датчика подати у комплекс-

ному вигляді  $U_{\text{шх}}$ , то протифазні напруги з урахування власних шумів вимірювальної схеми, приведених до її входів, подамо як

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{\text{шх}} + \dot{U}_{\text{ш1}}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{U}_{\text{шх}} + \dot{U}_{\text{ш2}}; \quad (3)$$

де  $U_{\text{ш1}}$  і  $U_{\text{ш2}}$  - власні шуми на входах вимірювальної схеми

Одна з вхідних напруг (3), також розщеплюється фазоінверсний каскадом 8 на дві протифазні напруги

$$\dot{U}_3 = -\dot{U}_{\text{шх}} + \dot{U}_{\text{ш2}}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_4 = \dot{U}_{\text{шх}} - \dot{U}_{\text{ш2}}; \quad (5)$$

Протифазні напруги (4) і (5) по чергово складаються з другою вхідною напругою (2) за допомогою суматора 12. В результаті підсумовування напруг (2) і (4) виникає комплексний сигнал

$$\dot{U}_5 = K_1(2\dot{U}_{\text{шх}} + \dot{U}_{\text{ш1}} - \dot{U}_{\text{ш2}}); \quad (6)$$

а при підсумовуванні напруг (2) і (5) виникає комплексний сигнал

$$\dot{U}_6 = K_1(\dot{U}_{\text{ш1}} + \dot{U}_{\text{ш2}}); \quad (7)$$

де  $K_1$  - коефіцієнт передачі суматора 12

Сумарні напруги (6) і (7) по чергово підсилюють в смузі теплових шумів і зводять в квадрат

$$\dot{U}_7 = S[K_1 K_2(2\dot{U}_{\text{шх}} + \dot{U}_{\text{ш1}} - \dot{U}_{\text{ш2}})]^2; \quad (8)$$

$$\dot{U}_8 = S[K_1 K_2(\dot{U}_{\text{ш1}} + \dot{U}_{\text{ш2}})]^2; \quad (9)$$

де  $K_2$  - коефіцієнт підсилення підсилювача 13,

$S$  - крутизна квадратичного перетворення амплітудного детектора 14

Результати квадратичного перетворення усереднюють в часі. При оцінці усереднених значень напруг (8) і (9) слід взяти до уваги, що власні шуми вимірювальної схеми між собою не корельовані ( $\overline{U_{\text{ш1}} U_{\text{ш2}}} = 0$ ). Аналогічно і шум чутливого елемента датчика не корельовані з шумами вимірювальної схеми ( $\overline{U_{\text{шх}} U_{\text{ш1}}} = 0$ ), ( $\overline{U_{\text{шх}} U_{\text{ш2}}} = 0$ ). Тому усереднені напруги (8) і (9) будуть мати вигляд

$$\overline{U}_7 = SK_1^2 K_2^2 (4\overline{U_{\text{шх}}^2} + \overline{U_{\text{ш1}}^2} + \overline{U_{\text{ш2}}^2}); \quad (10) \quad (11)$$

$$\overline{U}_8 = SK_1^2 K_2^2 (\overline{U_{\text{ш1}}^2} + \overline{U_{\text{ш2}}^2})$$

Із по чергової послідовності усереднених сигналів (10) і (11) виділяють різницеву напругу у вигляді попуризації напруг (10) і (11)

$$\overline{U}_9 = \frac{\overline{U}_7 - \overline{U}_8}{2} = 2SK_1^2 K_2^2 \overline{U_{\text{шх}}^2}; \quad (12)$$

Різницеву напругу (12) підсилюють в кількості разів, зворотно пропорційну опорі чутливого елемента датчика. Завдяки такому підсиленню одержують напругу

$$U_{10} = \frac{C_{10}}{R_x} \overline{U}_9 = \frac{2C_{10}SK_1^2 K_2^2 \overline{U_{\text{шх}}^2}}{R_x}; \quad (13)$$

де  $C_{10}$  - стала в значенні коефіцієнту підсилення

Підставляючи значення  $\overline{U_{\text{шх}}^2}$  виразу (1) в (13), одержуємо значення підсиленої напруги

$$U_{10} = 8CSK_1^2 K_2^2 k\Delta T_x; \quad (14)$$

Вимірюють одержану напругу  $U_{10}$ . Для однозначного визначення температури  $T_x$  датчик калібрують після встановлення його на об'єкті в реальних теплофізичних умовах. Калібровка полягає у вимірюванні вихідної напруги вимірювальної схеми при відомій температурі калібровки  $T_0$ .

Вимірювання виконуються після монтажу датчика на об'єкті, тому розподілена ємність чутливого елемента і вхідна ємність вимірювальної схеми однакові при калібровці і вимірюванні ( $\Delta t = \text{const}$ ). Тому вихідна напруга вимірювальної схеми при калібровці аналогічна виразу (14)

$$U_0 = 8CSK_1^2 K_2^2 k\Delta T_0; \quad (15)$$

Якщо визначити відношення значень напруг (14) і (15), то одержимо

$$\frac{U_{10}}{U_0} = \frac{T_x}{T_0}; \quad (16)$$

Із рівняння (16) визначимо дійсну температуру датчика при самоперевірці

$$T_x = \frac{U_{10}}{U_0} T_0; \quad (17)$$

У вираз (17) не входять власні шуми вимірювальної схеми ( $U_{\text{ш1}}$  і  $U_{\text{ш2}}$ ), а також опір чутливого елемента ( $R_x$ ). Опір  $R_x$  є функцією температури  $R_x(T_x)$ , тому його вилучення із розрахункової формули дозволяє проводити калібровку при будь-якій температурі  $T_0$ , придатної в процесі пусконаладжувальних робіт на об'єкті або при його ремонті.

Таким чином, розглянутий спосіб самоперевірки датчиків температури дозволяє визначити дійсну температуру його чутливого елемента по значенню теплового шуму незалежно від рівня власних шумів вимірювальної схеми і поточного значення опоры датчика.

Порівнюючи значення температури по вторинному приладу, підключеному до датчика, з його дійсною температурою, визначають похибку датчика  $\Delta T$

$$\Delta T = \tilde{T} - T_x; \quad (18)$$

де  $\Delta T$  - похибка датчика,

$\tilde{T}$  - показання електричного термометра по вторинному приладу, підключеному до датчика,

$T_x$  - дійсне значення температури, обчислене по теплому шуму. Пристрій для самоперевірки діє таким чином

Вихідна напруга чутливого елемента датчика 1 через вхідні клеми 2 і 3 надходить через фільтр 4 верхніх частот на симетричні входи малошумливого диференційного підсилювача 5. Частота зрізу фільтру 4 обирається такою, щоб через фільтр проходили високочастотні шуми, починаючи з 10 кГц і вище. Це забезпечує виключення впливу низькочастотних шумів із загального спектра шумів, які не викликаються тепловими флуктуаціями. Операційні підсилювачі 6 і 7, які входять до складу диференційного підсилювача 5, підсилюють високочастотну шумову напругу датчика та розщеплюють його на дві протифазні напруги. Одна з вихід-

них напруг диференційного підсилювача, в свою чергу, розщеплюється на дві протифазні напруги фазоінверсним каскадом 8, а друга вихідна напруга диференційного підсилювача надходить на повторювач напруги 9. Парафазні напруги з виходу каскаду 8 через автоматичний комутатор 10 по чергово впливають на один вхід суматора 12. Частота перемикачів задається генератором 11 низької частоти. На другий вхід суматора 12 неперервно впливає напруга з виходу повторювача 9. В результаті періодичного перемикачів протифазних напруг на одному з входів суматора 12 на його виході формуються пакети шумових напруг, пропорційних сумі та різниці вихідних напруг диференційного підсилювача 5. Пакети напруг з виходу суматора 12 надходять на підсилювач високої частоти 13, де підсилюються високочастотні складові теплового шуму. Пакети підсилених напруг впливають на амплітудний детектор 14 з квадратичною характеристикою, внаслідок детектування та усереднення в фільтрі 15 нижніх частот виділяється низькочастотна огибаюча пакетної напруги, частота якої відповідає частоті генератора 11.

Напруга огибаючої, яка пропорційна полурізниці амплітуд сумарної та різницевої напруги, і являє собою змінну напругу частоти генератора 11. Змінна напруга через розділові конденсатори 16 і 17 та чутливий елемент датчика 1 впливає на вхід операційного підсилювача 18, охопленого колом від'ємного зворотного зв'язку через резистор 19. Коефіцієнт підсилення операційного підсилювача 18 пропорційний опорі резистора 19 і зворотно пропорційний опорі чутливого елемента датчика 1. Внаслідок функціонального підсилення по низькій частоті виводиться вплив опорі датчика на амплітуду змінної напруги, яка пропорційна середньому квадрату шумової напруги датчика.

Низькочастотна напруга додатково підсилюється підсилювачем 20 низької частоти і випрямляється синхронним детектором 21, який керується низькочастотною напругою безпосередньо від генератора 11. Випрямлена напруга згладжується фільтром 22 нижніх частот і вимірюється цифровим вольтметром 23.

Таким чином, по показанню вольтметра 23 визначається рівень теплових шумів датчика в режимі самоперевірки і калібрування при відомій температурі об'єкту. Через чутливий елемент термоелектричного датчика (термопару) протікає змінний струм, тому в робочому спаді датчика не виникає додаткове виділення або поглинання тепла через ефект Пельтьє. Внаслідок цього не виникають викривлення во вторинному приладі (на рисунку не показано) і не змінюється температура робочого спаю датчика, термоЕРС якого вимірюється вольтметром 23.

Зондування чутливого елемента датчика змінним струмом дозволяє використовувати розглянутий пристрій для самоперевірки як термоелектричних, так і терморезистивних датчиків. Змінний струм не викликає також поляризації чутливого елемента датчика, що дозволяє використовувати пристрій і для самоперевірки електролітичних та інших датчиків температури з неоднорідними чутливими елементами. Незалежність результату від опорі чутливого елемента дозволяє виконувати

перевірку низькоомних, високоомних датчиків, а також датчиків з нестабільним опором, наприклад, напівпровідникових.

Джерелом похибки розглянутого пристрою може бути невеликий власний корельований шум диференційного підсилювача, який викликає зміщення нуля при  $\overline{U_{\text{шх}}} = 0$ . Для усунення цієї похибки пристрій має додатково ключ 24, конденсатор 25 великої ємності, а також потенціометр 26 з перемикачем 27.

При замиканні ключа 24 чутливий елемент з опором  $R_x$  шунтується конденсатором 25 великої ємності. В цьому випадку конденсатором повністю подавляється тепловий шум датчика і вхідні шуми диференційного підсилювача 5. Але корельовані вихідні шуми диференційного підсилювача 5 надходять на обидва входи суматора 12. При цьому одна із шумових корельованих напруг періодично інвертується автоматичним комутатором 10. На відміну від некорельованих шумів періодичне інвертування однієї з корельованих складових викликає синхронну зміну амплітуди шумової напруги на виході суматора 12. Внаслідок цього з'являється змінна складова частоти комутації на виході детектора 14, яка після підсилення та випрямлення в синхронному детекторі 21 викликає зміщення нуля вольтметра 23, тобто виникає адитивна похибка.

Для компенсації впливу власних корельованих шумів вихід повторювача напруги 9 через потенціометр 26 та перемикач 27 з'єднують з одним із входів автоматичного комутатора 10. Внаслідок цього власна шумова напруга одного з каналів диференційного підсилювача 5 надходить на обидва входи суматора 12 і проявляється, як додатковий корельований шум. Але вплив цього шуму проявляється тільки при одному положенні автоматичного комутатора 10. Цей вплив озивається у появі додаткової змінної складової на виході квадратичного детектора 14, яка після підсилення підсилювачем 20 та випрямлення синхронним детектором 21 дає на виході фільтра 22 також стапу напругу. При зміні положення перемикача 27 на протилежне додаткова корельована складова шуму попадає на другий вхід автоматичного комутатора 10. Фаза змінної складової на виході квадратичного детектора 14 при цьому змінюється на  $180^\circ$ , що призводить до зміни полярності випрямленої напруги на виході синхронного детектора 21.

Таким чином, установкою перемикача 27 в одне з його положень можемо добитися компенсації зміщення нуля від корельованих шумів вимірюваної схеми. Регулюючи потенціометром 26 рівень додаткового корельованого шуму, можемо в повній мірі ліквідувати зміщення нуля вольтметра при закороченому вході пристрою від власних корельованих шумів.

Установку нуля вихідного вольтметра проводять як при калібруванні датчика, так і при його самоперевірці. При вимірюванні шумів датчика ключ 24 розмикають і перемикач 27 залишається в положенні, при якому було скомпенсоване початкове зміщення нуля вольтметра 23.

Розроблено пристрій для самоперевірки термоелектричних датчиків температури. В якості датчика використовувалась напівпровідни-

кова термопара стержневого типу з термоелементами із сплавів  $\text{SbZn}$  і  $\text{SbCd}$ , які мають внутрішній опір 300 - 400 Ом і забезпечують чутливість до 600 мкВ/град. Спектральна густина теплових шумів при 30°C складала  $10^{-7}$  В/Гц, яка лінійно зростає з ростом температури до 800 К. Вхідний диференціальний підсилювач складається з двох малошумливих операційних підсилювачів типу TLC 2262A (Texas Instrument). Фазоінверсний каскад з прямим та інверсним виходами виконано за мікросхемою АД8131 з коефіцієнтом підсилення  $2 \pm 0,03$ . Автоматичний комутатор побудовано на базі мікросхеми K561КТ3, який керується знакоперемінною напругою від симетричного мультівібратора низької частоти (75 Гц) комутації. Фільтр верхніх частот суміщується з вхідним колом диференційного підсилювача і стримує напругу

частоти комутації 75 Гц не менше, ніж на 40 дБ, а шумову напругу від датчика пропускають з 10 кГц і вище з послабленням не більш, як на 3 - 5 дБ.

Високочастотний передпідсилювач амплітудного детектора виконано на мікросхемі K157УД2А. В якості детектора з квадратичною характеристикою використане діодне коло з додатковим зміщенням від подільника сталої напруги на резисторах, що забезпечує параболічну вольт-амперну характеристику детектора з відхиленням не більш  $\pm 3\%$ . Сталу часу фільтра синхронного детектора вибрано порядку 3 с, що забезпечує поріг чутливості поворотного пристрою до температури  $\pm 0,01$  К. Похибка визначення температури чутливого елемента датчика по тепловим шумам не перевищує  $\pm 0,05 - 0,1$  К при вимірюванні температури в діапазоні 290 - 600 К.

