



УКРАЇНА

(19) UA (11) 40881 (13) A

(51) 7 G01K7/30

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) ШУМОВИЙ ТЕРМОМЕТР

(21) 2000095522

(22) 26.09.2000

(24) 15.08.2001

(46) 15.08.2001, Бюл. № 7, 2001 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Лісовський Олександр Анатолійович

(73) КІЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) 1. Шумовий термометр, що містить первинний резистивний перетворювач, два смугових підсилювача змінної напруги, перемножувач, один з входів якого з'єднаний з виходом одного із смугових підсилювачів змінної напруги, смуговий фільтр, що з'єднаний з виходом перемножувача, і цифровий вольтметр, який **відрізняється** тим, що в нього введені два розподільчальних конденсатора, диференційний підсилювач, на базі двох операційних підсилювачів, автоматичний перемикач, генератор низької частоти, послідовно з'єднані підсилювач низької частоти, синхронний детектор, фільтр нижніх частот і третій операційний підсилювач з постійним резистором в колі зворотнього зв'язку, при цьому виходи первинного резистивного перетворювача через розподільчальні конденсатори з'єднані з симетричними входами диференційного підсилювача, вихо-

ди якого з'єднані з входами смугових підсилювачів змінної напруги, прямий та інверсний виходи другого з смугових підсилювачів з'єднані з входами автоматичного перемикача, вихід якого з'єднаний з другим входом перемножувача, вихід якого з'єднаний з входом смугового фільтра, до виходу якого підключений підсилювач низької частоти, вихід фільтра нижніх частот через первинний резистивний перетворювач з'єднаний з входом третього операційного підсилювача, до виходу якого підключений цифровий вольтметр, а керуючі входи автоматичного перемикача та синхронного детектора підключені до виходу генератора низької частоти.

2. Шумовий термометр за п.1, який **відрізняється** тим, що в нього додатково введені джерело постійної напруги, потенціометр з рухомих контактом і комутатор, вхід якого з'єднаний з потенційним виходом джерела постійної напруги, виходи комутатора з'єднані з входами автоматичного перемикача, потенціометр включений між потенційним та заземленим виходами джерела постійної напруги, а рухомий контакт потенціометра з'єднаний з іншим входом перемножувача.

Винахід відноситься до області термометрії і може бути застосований для вимірювання температури об'єктів в екстремальних умовах по значенню теплових шумів первинного резистивного перетворювача.

Відомо, що у будь-якому середовищі, що має активні електричні втрати, виникають теплові електричні флуктуації - тепловий шум. Середнє квадратичне значення шумової напруги, згідно рівняння Найквіста, пропорційно абсолютній температурі первинного перетворювача.

Трудність використання теплових шумів для вимірювання температури полягає у низькому рівні корисного шумового сигналу, який складає одиниці або десятки мікровольт. Проблемою є вимірювання малої шумової напруги, яка може бути співрозмірним власним шумам вимірюваної апаратури, а іноді вона менш потужна. Це рішення також уск-

ладнюється тим, що корисний сигнал - тепловий шум (несе інформацію про температуру об'єкта) так і перешкода - власний шум апаратури, є нерозрізнені по спектральному складу. Тому малоефективними виявляються відомі методи виділення та вимірювання слабких детермінованих сигналів на фоні шумів.

Відомий шумовий термометр (див. Fink H.I. A new absolute Noise Thermometer at Low Temperatures Canada. J. Phys. 1959 - vol. 37 № 12), який містить три резистора, що шунтовані конденсаторами, ідентичні підсилювачі, що утворюють П-образний ланцюг з резисторами, один з яких знаходиться при визначеній температурі, інші використовуються як первинні перетворювачі для зняття шумової напруги. А також до складу пристрою входять підсилювач, інтегратор та пристрій реєстрації.

Наявність в схемі двох опорів, які змінюються при експлуатації випадковим чином, зумовлює похибку від нерівності шумових сигналів, що проходять через підсилювачі. Використання додаткового відомого опору, вносить похибку, яка зумовлена його нестабільністю, і це призводить до зменшення точності вимірювання температури об'єкта.

Відомий шумовий термометр (див. Шумовой термометр для ядерних реакторів. – А.А. Борисов, В.И. Власов, И.В. Ковалёв и др. – "Измерительная техника" - 1982 № 5), який містить симетричний диференційний підсилювач, високочастотні та низькочастотні смугові фільтри, перемножувачі, інтегратори, пристрій віднімання, цифровий універсальний вимірювальний прилад.

Нерівність значень ефективної ширини смуги пропускання смугових фільтрів приводить до того, що доля власного шуму каналів в обох сигналах, що подаються на пристрій віднімання, буде різною. А також, термошумова напруга, що виділяється та підсилюється в вимірювальних каналах, буде пропорційна не лише зміні температури, а й значенню електричного опору первинного перетворювача, який може змінюватися з часом, і це призводить до зниження точності вимірювання температури об'єкта.

Відомий також шумовий термометр (див. Стадник Б.І., Микитин І.П. Термошумовий термометр. - Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування. – 1997. №314. – С. 85-89), що містить первинний резистивний перетворювач, два смугових підсилювача змінної напруги, перемножувач, один з входів якого з'єднаний з виходом одного із смугових підсилювачів змінної напруги, смуговий фільтр, що з'єднаний з виходом перемножувача і цифровий вольтметр.

Крім того відомий шумовий термометр містить два малошумних вхідних підсилювача, ще один смуговий фільтр, інтегруючий аналого-цифровий перетворювач і блок паралельного інтерфейсу. При цьому потенційний вихід первинного перетворювача, другий вихід якого заземлений, з'єднаний з входами малошумних підсилювачів, виходи яких через смугові фільтри та смугові підсилювачі змінної напруги з'єднані з входами перемножувача, а вихід перемножувача з'єднаний через аналого-цифровий перетворювач та блок інтерфейсу з входом комп'ютера, який використовується як цифровий вольтметр.

Відсутність електричної розв'язки на входах малошумних підсилювачів (вихід первинного резистивного перетворювача безпосередньо підключений до входів малошумних підсилювачів) призводить до проникнення шумів кожного з підсилювачів в суміжний вимірювальний канал, що призводить до їх кореляції та виникнення додаткової похибки, яку важко компенсувати, а це знижує точність вимірювання температури об'єкта. Нестабільність значення опору первинного перетворювача викликає додаткову похибку вимірювання температури. Непрямі виміри, що базуються на роздільному вимірюванні напруги теплових шумів та електричного опору, з відключенням первинного перетворювача, є малоефективними. Крім того, відомий термометр не забезпечує відлік значень температури за шкалою Цельсія для відліку темпе-

ратури, що необхідно при визначенні значень температури об'єктів.

Задачею винаходу є створення такого шумового термометра, у якому введення нових елементів та зв'язків забезпечило би підвищення точності та чутливості вимірювання температури.

Поставлена задача розв'язується тим, що в шумовий термометр, який містить первинний резистивний перетворювач, два смугових підсилювача змінної напруги, перемножувач, один з входів якого з'єднаний з виходом одного із смугових підсилювачів змінної напруги, смуговий фільтр, що з'єднаний з виходом перемножувача, і цифровий вольтметр, згідно з винаходом, введені два розподільвальних конденсатора, диференційний підсилювач, на базі двох операційних підсилювачів, автоматичний перемикач, генератор низької частоти, послідовно з'єднані підсилювач низької частоти, синхронний детектор, фільтр нижніх частот і третій операційний підсилювач з постійним резистором в колі зворотнього зв'язку, при цьому виходи первинного перетворювача через розподільвальні конденсатори з'єднані з симетричними входами диференційного підсилювача, виходи якого з'єднані з входами смугових підсилювачів змінної напруги, прямий та інверсний виходи другого з смугових підсилювачів з'єднані з входами автоматичного перемикача, вихід якого з'єднаний з другим входом смугового фільтра до виходу якого підключений підсилювач низької частоти, вихід фільтра нижніх частот через первинний перетворювач з'єднаний з входом третього операційного підсилювача, до виходу якого підключений цифровий вольтметр, а керуючі входи автоматичного перемикача та синхронного детектора підключені до виходу генератора низької частоти.

Крім того, для забезпечення використання шкали Цельсія для відліку температури, доцільно додатково ввести джерело постійної напруги, потенціометр з рухомих контактом і комутатор, вхід якого з'єднаний з потенційним виходом джерела постійної напруги, виходи комутатора з'єднані з входами автоматичного перемикача, потенціометр включений між потенційним та заземленим виходами джерела постійної напруги, а рухомий контакт потенціометра з'єднаний з іншим входом перемножувача.

Саме введення в схему шумового термометра двох розподільвальних конденсаторів, диференційного підсилювача, автоматичного перемикача, генератора низької частоти, послідовно з'єднаних підсилювача низької частоти, синхронного детектора, фільтра нижніх частот і третього операційного підсилювача, що включені зазначеним чином, дозволило виключити вплив значення опору первинного перетворювача на результат вимірювання шумової напруги без відключення первинного перетворювача від входу вимірювального тракту, що підвищує точність та чутливість вимірювання температури.

Додаткове введення в схему між автоматичним перемикачем та перемножувачем джерела постійної напруги, потенціометра з рухомих контактом та комутатора дозволяє використовувати шкалу Цельсія для відліку температури, що також

підвищує точність та чутливість вимірювання температури.

На рисунку наведена схема шумового термометра для вимірювання температури.

Шумовий термометр складається з первинного резистивного перетворювача 1, який через розподільувальні конденсатори 2 та 3, підключений до диференціального підсилювача 4 з симетричними входами, який включає вхідні резистори 5, 6 і 7, операційні підсилювачі 8 та 9 з резисторами зворотнього зв'язку 10 та 11. Виходи диференційного підсилювача з'єднані з смуговими підсилювачами змінної напруги 12 та 13. Прямий та інверсний виходи підсилювача 12 за допомогою автоматичного перемикача 14 підключаються до входу перемножувача 15, а до іншого входу перемножувача підключається підсилювач 13. До виходу перемножувача підключені послідовно з'єднані смуговий фільтр 16, підсилювач 17 низької частоти, синхронний детектор 18 і фільтр нижніх частот 19. Вихід фільтра 19 через первинний перетворювач 1 підключений до третього операційного підсилювача 20 з постійним резистором 21, який включений в ланцюг від'ємного зворотнього зв'язку. Вихід підсилювача 20 підключений до цифрового вольтметра 22. До керуючих входів перемикача 14 та синхронного детектора 18 підключений генератор 23 низької частоти. Джерело 24 постійної напруги через рухомий контакт потенціометра 25 підключається до першого входу перемножувача 15 та через комутатор 26 напряму з'єднується з входами автоматичного перемикача 14.

Пристрій працює наступним чином.

За допомогою первинного перетворювача 1, в якості якого використовується високоомний резистор, що працює в екстремальних умовах, що змінюють його опір внаслідок фізико-хімічних змін матеріалу, знімається термшумова напруга, квадрат якої згідно рівняння Найквіста має вигляд:

$$\bar{U}_x^2 = 4k\Delta f T_x R_x, \quad (1)$$

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

$R_x$  - значення опору первинного перетворювача, з якого знімають шумову напругу;

$\Delta f$  - смуга частот, в якій відбувається виділення шумового сигналу;

$T_x$  - абсолютна температура первинного перетворювача.

Ця напруга через конденсатори 2 та 3 поступає на симетричні входи диференційного підсилювача 4. Операційні підсилювачі 8 та 9, що входять до складу диференційного підсилювача, підсилюють шумову інформаційну напругу, яка розділюється на дві протифазні корельовані напруги. Якщо шумову напругу (1) представити в комплексному виді  $\dot{U}_x$ , то протифазні напруги на виходах диференційного підсилювача 4 приймуть вид:  $+K_4 \dot{U}_x$  та  $-K_4 \dot{U}_x$ , де  $K_4$  - коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача 4. Ці напруги поступають на входи смугових підсилювачів змінної напруги 12 та 13 з коефіцієнтами підсилення  $K_{12}$  та  $K_{13}$  із власними шумами  $\dot{U}_{ш12}$  і  $\dot{U}_{ш13}$ , які між собою не корельовані.

Завдяки тому, що шумовий сигнал первинного перетворювача 1 при температурі  $20^\circ\text{C}$  менший за власні шуми підсилювачів  $U_x(t) < U_{ш}(t)$ , на прямому та інверсному виходах смугового підсилювача 12 формуються комплексні сумарні напруги:

$$\dot{U}'_{12} = K_{12}(\dot{U}_{ш12} - K_4 \dot{U}_x), \quad (2)$$

$$\dot{U}''_{12} = K_{12}(\dot{U}_{ш12} + K_4 \dot{U}_x), \quad (3)$$

а на виході смугового підсилювача 13 напруга:

$$\dot{U}_{13} = K_{13}(\dot{U}_{ш13} - K_4 \dot{U}_x), \quad (4)$$

де  $K_{12}, K_{13}$  - коефіцієнти посилення смугових підсилювачів змінної напруги 12 та 13 відповідно.

На входи автоматичного перемикача 14 подаються пряма та інверсна напруги  $\dot{U}'_{12}$  та  $\dot{U}''_{12}$ , а також в залежності від положення комутатора 26 на один з входів перемикача 14 подається опорна напруга  $U_0$  від джерела 24.

За безперервної роботи автоматичного перемикача 14, який керується напругою низької частоти від генератора 23, на один вхід перемножувача 15 по чергово подаються напруги (2) та (3) з врахуванням  $U_0$ , що знімається з джерела постійної напруги 24. При положенні комутатора 26, як показано на рисунку, вихідні напруги перемикача 14:

$$\dot{U}'_{14} = K_{12}(\dot{U}_{ш12} + K_4 \dot{U}_x) + U_0, \quad (5)$$

$$\dot{U}'_{14} = K_{12}(\dot{U}_{ш12} - K_4 \dot{U}_x), \quad (6)$$

а на інший вхід перемножувача поступає напруга з підсилювача 13 разом з часткою опорної напруги  $U_0$  від джерела 24, що визначається параметром  $K_{25}$  - коефіцієнтом передачі потенціометра 25 відносно рухомого контакту:

$$\dot{U}_{13} = K_{13}(\dot{U}_{ш13} - K_4 \dot{U}_x) + K_{25}U_0. \quad (7)$$

Враховуючи, що шуми підсилювачів 4, 12 та 13 між собою не корельовані, а коефіцієнт кореляції між шумовими сигналами  $+K_4 \dot{U}_x$  та  $-K_4 \dot{U}_x$  наближується до одиниці, а також некорельованість шумів підсилювачів та інформаційного шуму первинного перетворювача, на виході перемножувача по чергово формуються напруги:

$$\dot{U}'_{15} = \dot{U}'_{14} \cdot \dot{U}_{13} = S_{15}[(K_{12}(\dot{U}_{ш12} + K_4 \dot{U}_x) + U_0) \times (K_{13}(\dot{U}_{ш13} - K_4 \dot{U}_x) + K_{25}U_0)], \quad (8)$$

$$\dot{U}''_{15} = \dot{U}''_{14} \cdot \dot{U}_{13} = S_{15}[(K_{12}(-\dot{U}_{ш12} - K_4 \dot{U}_x)) \times (K_{13}(\dot{U}_{ш13} - K_4 \dot{U}_x) + K_{25}U_0)], \quad (9)$$

де  $S_{15}$  - крутизна перетворення перемножувача 15.

Після математичних перетворень, та враховуючи, що підсилювачі 12 та 13 однотипні, тобто  $K_{12} \approx K_{13}$ , а також нехтуючи членами другого порядку малості, отримуємо:

$$\dot{U}'_{15} = S_{15}(-K_4^2 K_{12}^2 \dot{U}_x^2 + K_{25} U_0^2), \quad (10)$$

$$\dot{U}''_{15} = S_{15} K_4^2 K_{12}^2 \dot{U}_x^2. \quad (11)$$

Часову послідовність напруг  $\dot{U}'_{15}$  і  $\dot{U}''_{15}$  будемо розглядати як одне знакозмінне, що змінюється з частотою генератора 23 низької частоти. З цієї напруги смуговим фільтром 16 відокремлюється і підсилюється підсилювачем низької частоти 17 низькочастотна напруга:

$$U_{17}(\Omega) = K_{16} K_{17} \left( \frac{U''_{15} - U'_{15}}{2} \right) \text{sign} \sin \Omega t, \quad (12)$$

де  $K_{16}$ ,  $K_{17}$  - коефіцієнти передачі фільтра 16 та підсилювача 17 відповідно.

Ця напруга випрямляється синхронним детектором 18, який керується низькочастотною напругою від генератора 23, та згладжується фільтром нижніх частот 19:

$$U_{19} = \alpha \left( K_4^2 K_{12}^2 \bar{U}_x^2 - \frac{1}{2} K_{25} U_0^2 \right), \quad (13)$$

де  $\alpha = S_{15} K_{16} K_{17} S_{18} K_{19}$  - результуючий коефіцієнт перетворення одноканальної частини вимірювального тракту;

$S_{18}$  - крутизна перетворювання синхронного детектора 18,

$K_{19}$  - коефіцієнти передачі фільтра нижніх частот 19.

Стала напруга  $U_{19}$  проходить через первинний перетворювач 1 з опором  $R_x$  і діє на вхід операційного підсилювача 20, в ланцюг від'ємного зворотного зв'язку якого включений резистор 21. Вихідна напруга підсилювача 20, який має зворотній від'ємний зв'язок через резистор 21, має вигляд:

$$U_{20} = \frac{R_0}{R_x} U_{19} = \alpha \frac{R_0}{R_x} \left( K_4^2 K_{12}^2 \bar{U}_x^2 - \frac{1}{2} K_{25} U_0^2 \right). \quad (14)$$

де  $R_0$  - опір резистора зворотнього зв'язку.

Згідно залежності  $\bar{U}_x^2$ , що визначається формулою Найквіста (1) вираз (14) прийме вигляд:

$$U_{20} = \alpha \frac{R_0}{R_x} \left( 4 K_4^2 K_{12}^2 k \Delta f R_x T_x - \frac{1}{2} K_{25} U_{оп}^2 \right), \quad (15)$$

Коефіцієнт передачі  $K_{25}$  потенціометра 25 регулюється із умови отримання нульового значення напруги  $U_{20}$  при  $0^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 273\text{K}$ ). При  $U_{20} = 0$  маємо:

$$K_{25} = 8 K_4^2 K_{12}^2 \frac{k \Delta f T_0 R_x}{U_{оп}^2}. \quad (16)$$

Підставляючи значення  $K_{25}$  в вираз (16) отримуємо значення напруги, що подається на цифровий вольтметр 22:

$$U_{23} = 4 \alpha K_4^2 K_{12}^2 k \Delta f R_{21} (T_x - T_0) = S (T_x - T_0), \quad (17)$$

де  $S = 4 \alpha K_4^2 K_{12}^2 k \Delta f R_{21}$  - результуюча крутизна перетворення температури в електричну напругу  $[\text{В}/^\circ\text{C}]$ .

Використовуючи комутатор 26, змінюємо входи автоматичного перемикача 14, до яких підключається джерело постійної напруги, що дозволяє змінювати полярність компенсуючої напруги на виході перемножувача 15 при встановленні нуля градусів Цельсія.

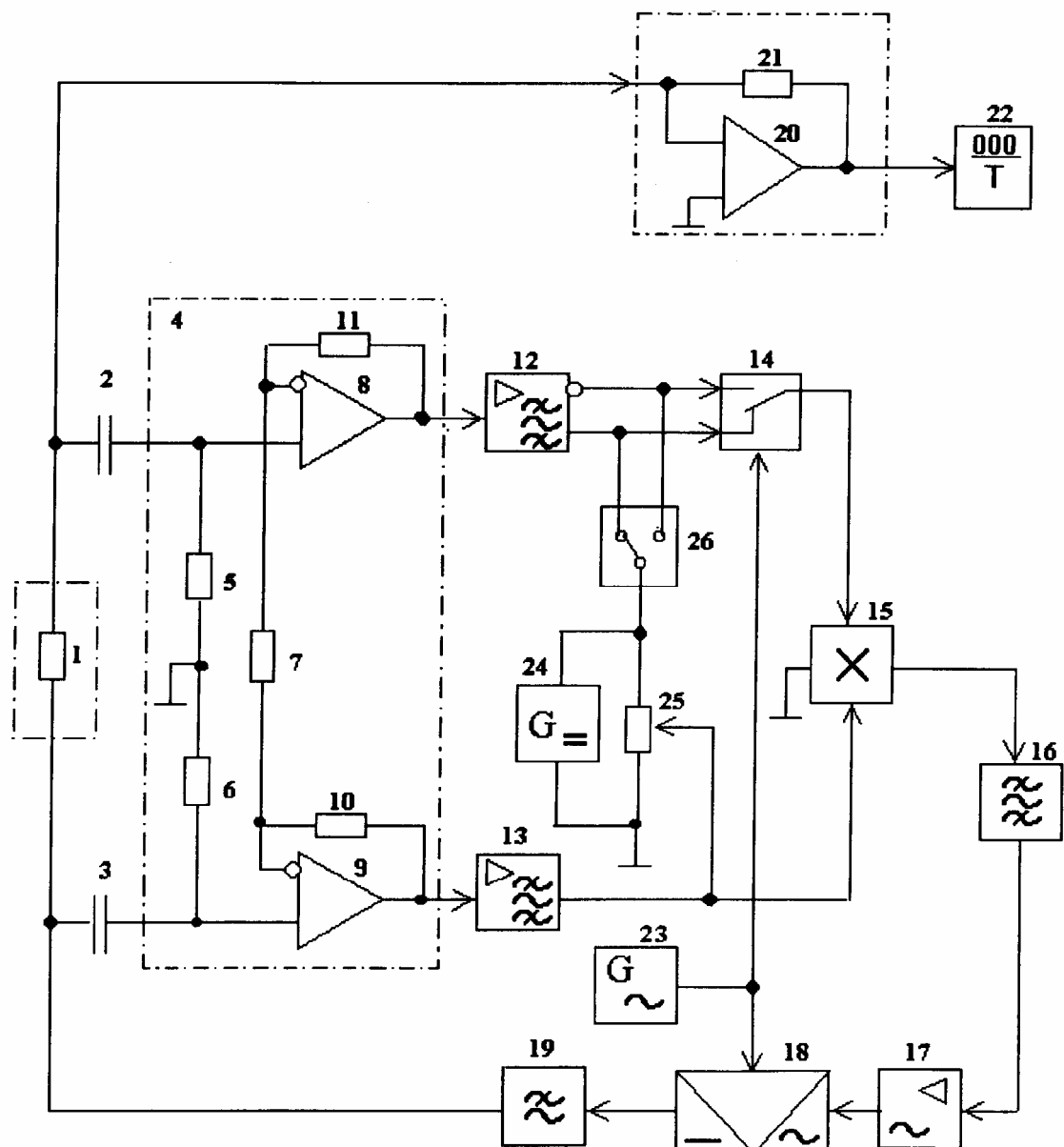
Таким чином, запропонований шумовий термометр забезпечує автоматичне виключення впливу дрейфу нуля перемножувача та значення опору первинного перетворювача на результат досліджень, що дозволяє проводити вимірювання температури з високою точністю при зміні в широкому діапазоні значень опору первинного перетворювача, який працює в екстремальних умовах.

Крім того, значення вимірюваної температури об'єкта відображається в градусах Цельсія, що дає змогу використовувати термометр в будь-якій галузі народного господарства.

#### Приклад.

Досліджувався шумовий термометр, який виконаний за запропонованою схемою в діапазоні температур  $20 \dots 250^\circ\text{C}$ . При цьому використовувалися первинний перетворювач - резистор СТ1-19 з номіналом  $100 \text{ кОм}$ , що забезпечив чутливість  $0,01^\circ\text{C}$ , який був розміщений в робочій зоні водневої печі для отжигу деталей, а також постійний резистор зворотнього зв'язку третього операційного підсилювача МЛТ-0,25 з номіналом  $200 \text{ кОм}$ , потенціометр - СПЗ-13А з номіналом  $1 \text{ кОм}$ . Вхідний диференційний підсилювач складався з двох малошумних операційних підсилювачів типу TLC2262A (Texas Instrument), а також смугові підсилювачі на діапазон частот  $50 \dots 100 \text{ кГц}$ . В якості перемножувача використана інтегральна мікросхема ПС501 з відкритими входами. Джерело постійної напруги - випрямляч напруги електромережі зі стабілізацією вихідної напруги на рівні  $5\text{В}$ . Автоматичний перемикач виконаний на польових транзисторах та керується генератором низької частоти ( $75\text{Гц}$ ) - симетричним мультивібратором.

Після експлуатації первинного перетворювача в агресивному середовищі (воднева суміш) опір резистора (первинного перетворювача) знизився на  $25\text{-}30\%$ , але це не вплинуло на результат вимірювання. Приведена похибка вимірювань шумового термометра не перевищила  $0,5\%$  в порівнянні з показами еталона (платинова термopара), що в п'ять раз менше похибки прототипу.



Тираж 50 экз.

Відкрите акціонерне товариство «Патент»  
 Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101  
 (03122) 3 – 72 – 89 (03122) 2 – 57 – 03

