

УДК 621.317

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОБОТИ ШУМОВОГО ТЕРМОМЕТРУ

В.Ю. Санніков, Ю.О. Скрипник

Київський національний університет технологій та дизайну

*Розглянуто спосіб вдосконалення роботи шумових термометрів за рахунок повного виключення впливу власних шумів підсилювачів та інших елементів вимірювальної схеми на вихідну постійну напругу, що дозволяє підвищити точність виміру температури і розширити межі її виміру.*

**Ключові слова:** шумовий термометр, шумовий сигнал, дисперсія, температура, підсилювач, перемножувач, інтегратор.

В даний час тепловий шум розглядається не лише як неминуча перешкода при вимірі різних фізичних величин, але і як джерело вимірювальної інформації про одну з найважливіших фізичних величин – температуру. В основі шумової термометрії [1] лежить рівняння Найквіста, яке пов'язує середній квадрат шумової напруги (дисперсії) з температурою:

$$\overline{U_n^2} = 4k\Delta fRT \quad (1)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;  $\Delta f$  – смуга частот, в якій відбувається виділення теплових шумів;  $R$  – опір первинного резистивного перетворювача;  $T$  – термодинамічна температура первинного перетворювача.

Перевагою шумових термометрів є незалежність їх показань від матеріалу первинного перетворювача, що дозволяє використовувати як термочутливий елемент будь-яку провідну деталь технологічного устаткування в зоні контрольованої температури.

Одним з основних недоліків існуючих шумових термометрів є вплив непостійності опору первинного перетворювача, який може виключатися логометричною схемою [1], при якій у вимірювальний тракт додатково включений операційний підсилювач з резистором в ланцюзі зворотного зв'язку, рівним опору термочутливого елемента, і що знаходиться з ним в термодинамічній рівновазі. Проте, забезпечити термодинамічну рівновагу на протязі експлуатації термометра достатньо складно, а в разі порушення рівноваги забезпечення повної компенсації похибки від нестабільності опору первинного резистивного перетворювача неможливо. Крім того при вимірі низьких і середніх температур велика похибка виникає і від впливу власних шумів підсилювального каналу і квадратичного детектора.

В шумовому підсилювачі [2] для компенсації похибок введені два диференціальних підсилювача, на входи яких подається шумова напруга від одного резистивного перетворювача, з наступним перемноженням їх вихідних напруг та усередненням отриманого сигналу. В цьому випадку власні шуми двох незалежних підсилювачів, які теоретично некорельовані між собою, не впливають на вихідну постійну напругу помножувача і тим самим не спотворюють результат виміру температури. Проте, температурна і часова нестабільність опору первинного перетворювача і дрейф нуля самого помножувача є джерелом великих похибок виміру температури.

Даний недолік шумового термометра може бути виключений за рахунок введення двох розділяючих конденсаторів, двох диференціальних підсилювачів, автоматичного перемикача, перемножувача напруг диференціальних підсилювачів, фільтра нижніх частот та синхронного детектора [3]. Крім того, шумовий термометр включає джерело постійної напруги, потенціометр з рухливим контактом і комутатор. Але крім виключення впливу дрейфу нуля перемножувача напруги і непостійності опору первинного перетворювача на результат виміру температури йому властиві і недоліки. Так, вплив власних шумів вхідного диференціального підсилювача і двох смугових підсилювачів не усувається, так як періодична зміна полярності однієї з шумових напруг здійснюється на вході перемножувача, тобто після вказаних підсилювачів. Пропускання постійного струму через первинний резистивний перетворювач генерує в ньому дробовий шум, який не несе інформацію про його температуру. Накладення сигналу від корельованих шумів підсилювачів на вихідну напругу перемножувача спотворює дію зворотного зв'язку через первинний резистивний елемент, що знижує точність виміру температури.

### ***Постановка завдання***

Основною задачею дослідження є підвищення точності виміру температури за рахунок виключення власних корельованих шумів вимірювальних елементів шумового термометру. Вирішення поставленої задачі підвищення точності вимірів температури за дисперсією шумових сигналів дозволить створити теоретичний апарат реалізації шумових вимірювачів температури, як електропровідних так і діелектричних матеріалів.

### ***Об'єкти та методи дослідження***

Об'єктом дослідження є процес вимірювання температури за власним шумовим сигналом об'єкту, що досліджується.

Основним методом дослідження є теорія виміру шумів, аналіз та синтез електронних схем.

### ***Результати та їх обговорення***

В роботах [4, 5] запропоновано теоретичний підхід до вирішення задачі виміру дисперсії шумового сигналу з виключенням впливу власних шумів вимірювальної схеми. Враховуючі ці підходи для вирішення задачі виміру температури у відому схему додатково введено зв'язок вибіркового підсилювача з введеним операційним підсилювачем через резистивний перетворювач в ланцюг зворотного зв'язку якого включений постійний резистор, вихід операційного підсилювача з'єднаний через синхронний детектор з цифровим вольтметром, а керуючий вхід другого автоматичного перемикача підключений до виходу комутаційного генератора (рис.).

Саме введення в схему шумового термометра додаткового автоматичного перемикача, додаткового диференціального підсилювача і двох вхідних клем, з'єднаних вказаним чином з раніше використовуваними елементами схеми, дозволяє при комутації вхідної напруги отримати квадрати миттєвих значень шумової напруги первинного перетворювача різних знаків на виході перемножувача на фоні постійної напруги зсуву нуля і постійної складової напруги від перемножування корельованих шумів двох диференціальних підсилювачів [6]. Завдяки періодичній зміні полярності інформативного приросту вихідної напруги перемножувача за рахунок зміни полярності однієї з перемножуваних шумових напруг за допомогою автоматичних перемикачів здійснюється виділення вибіркового підсилювачем знакозмінного приросту напруги перемножувача, яка пропорційна вимірюваній температурі. Проходження струму від цієї напруги через первинний резистивний перетворювач і подальше його посилення операційним підсилювачем, в ланцюг зворотного зв'язку якого включений резистор з опором рівним опору первинного перетворювача, виключає вплив непостійності опору первинного резистивного перетворювача на результат виміру температури.

Оскільки періодичні зміни полярності однієї з перемножуваних напруг здійснюються на вході диференціальних підсилювачів, то й вплив власних шумів підсилювачів повністю виключається. Усунення впливу власних шумів підсилювачів і непостійність опору первинного перетворювача на вихідну постійну напругу значно підвищує точність виміру температури і розширює межі її виміру.

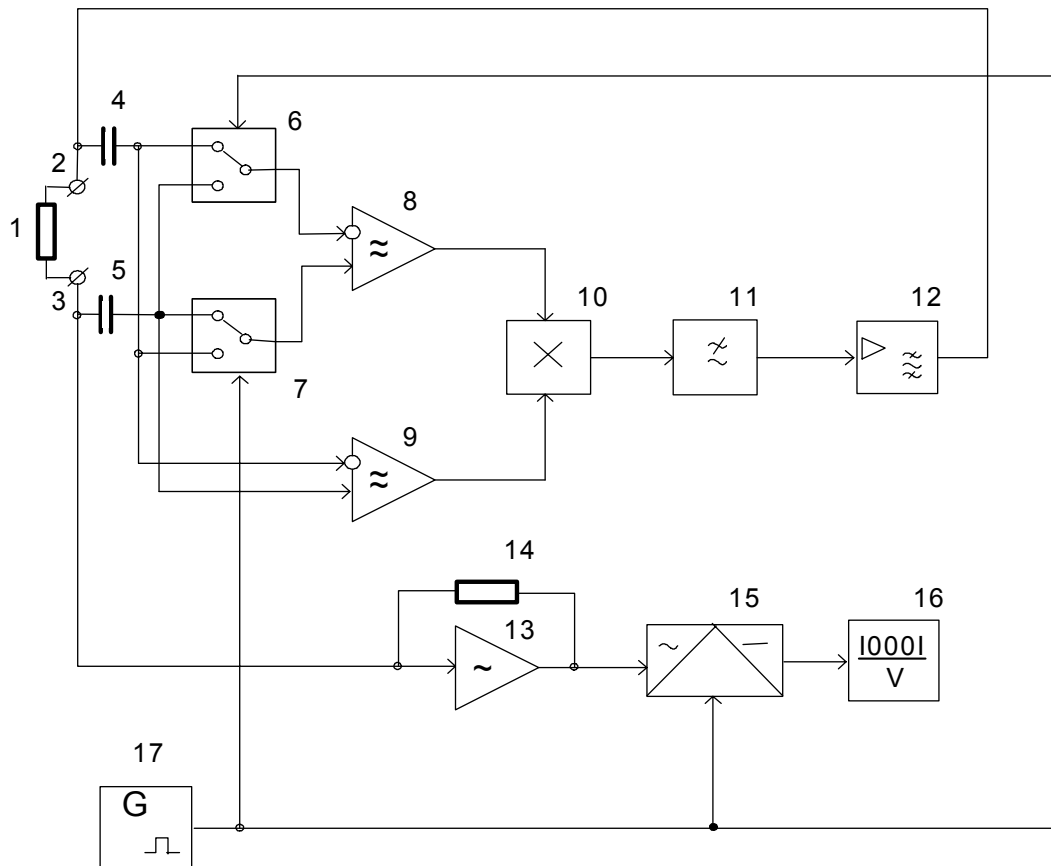


Рис. Шумовий термометр

1 – резистивний перетворювач; 2, 3 – вхідні клеми; 4, 5 – розділяючі конденсатори; 6, 7 – автоматичні перемикачі; 8, 9 – диференціальні підсилювачі; 10 – перемножувач; 11 – фільтр нижніх частот; 12 – вибіркового підсилювач; 13 – операційний підсилювач; 14 – постійний резистор; 15 – синхронний детектор; 16 – цифровий вольтметр; 17 – комутаційний генератор.

Під дією вимірюваної температури в первинному резистивному перетворювачі 1 виникає тепловий шум. Шумова напруга (1) через розділяючі конденсатори 4 і 5 поступає через автоматичні перемикачі 6 і 7 на входи диференціального підсилювача 8. Одночасно шумова напруга (1) безпосередньо впливає на входи диференціального підсилювача 9. Ємність розділяючих конденсаторів 4 і 5 вибирають з умови придушення низькочастотного шуму первинного резистивного перетворювача 1 (флікер-шуму), який не несе інформації про температуру резистивного перетворювача. Частоту зріза шумової напруги обирають рівною 10-20 кГц.

При вказаному положенні автоматичних перемикачів 6 і 7 на входи диференціальних підсилювачів 8 і 9 впливає по суті одна і та ж шумова напруга  $U_x(t)$ .

У іншому положенні автоматичних перемикачів 6 і 7 полярність миттєвих значень шумової напруги змінюється на протилежну –  $U_x(t)$ . Якщо вихідну шумову напругу представити в комплексному вигляді, то по черзі підсилювана шумова напруга буде різнополярною ( $U_x(t)$  і  $-U_x(t)$ ). Відповідно до цього шумові напруги на виході диференціального підсилювача 8 з врахуванням його власних шумів набуватимуть значень:

$$\dot{U}_1 = \dot{K}_1(\omega)\dot{U}_x + \dot{U}_{n1}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{K}_1(\omega)\dot{U}_x + \dot{U}_{n1}, \quad (3)$$

де  $\dot{K}_1(\omega)$  – комплексний коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача 8;  $\dot{U}_{n1}$  – комплексна напруга його власних шумів.

Шумова напруга на виході диференціального підсилювача 9 буде з постійною полярністю

$$\dot{U}_3 = \dot{K}_2(\omega)\dot{U}_x + \dot{U}_{n2}, \quad (4)$$

де  $\dot{K}_2(\omega)$  – комплексний коефіцієнт посилення диференціального підсилювача 9;  $\dot{U}_{n2}$  – комплексна напруга його власних шумів.

При безперервній роботі автоматичних перемикачів 6 і 7, які управляються комутаційним генератором 17, періодично шумова напруга (4) перемножується з шумовою напругою (2) і (3) в перемножувачі 10. В один такт комутації вихідна напруга перемножувача 10

$$\dot{U}_4 = S\dot{U}_3\dot{U}_1, \quad (5)$$

в наступний такт комутації

$$\dot{U}_5 = S\dot{U}_3\dot{U}_2, \quad (6)$$

де  $S$  – крутизна множувального перетворення.

Вихідна напруга перемножувача 10 усереднюється фільтром нижніх частот 11. З врахуванням усереднювання маємо послідовність імпульсів з амплітудами:

$$U_6 = K_3 S \{ [\dot{K}_2(\omega)\dot{U}_x + \dot{U}'_{n2} + \dot{U}''_{n2}] \times [\dot{K}_1(\omega)\dot{U}_x + \dot{U}'_{n1} + \dot{U}''_{n1}] \} + \overline{\Delta U}, \quad (7)$$

$$U_7 = K_3 S \{ [\dot{K}_2(\omega)\dot{U}_x + \dot{U}'_{n2} + \dot{U}''_{n2}] \times [-\dot{K}_1(\omega)\dot{U}_x + \dot{U}'_{n1} + \dot{U}''_{n1}] \} + \overline{\Delta U}, \quad (8)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт передачі фільтру нижніх частот 11; один штрих означає корельованість частини власних шумів диференціальних підсилювачів 8 і 9; два штрихи – некорельованість частини власних шумів; риска зверху відображає процес часового усереднювання добутків шумової напруги;  $\overline{\Delta U}$  – напруга зсуву (дрейфу нуля) перемножувача 10.

Хоча в схемі використовуються два незалежні диференціальні підсилювачі, однак внаслідок паразитних зв'язків, нерівності коефіцієнтів підсилення, неідентичності частотних характеристик підсилювачів виникає корельована складова в двох шумових процесах, що і враховується у виразах (7) і (8).

При оцінці виразів (7) і (8) слід врахувати, що усереднені добутки двох некорельованих сигналів дорівнюють нулю. Тому

$$\overline{\dot{U}_{n1} \dot{U}_{n2}} = K_1 \overline{\dot{U}_1 \dot{U}_{n2}} + K_2 \overline{\dot{U}_2 \dot{U}_{n1}} = 0, \quad (9)$$

Тоді вирази (7) та (8) приймають вигляд:

$$\overline{U_8} = K_3 S [K_1 K_2 \overline{U_x^2} + \overline{U_{n1} U_{n2}}] + \overline{\Delta U}, \quad (10)$$

$$\overline{U_9} = K_3 S [-K_1 K_2 \overline{U_x^2} + \overline{U_{n1} U_{n2}}] + \overline{\Delta U}. \quad (11)$$

Вихідну напругу перемножувача 10 у вигляді послідовності імпульсів (10) і (11) можна представити у вигляді суми постійної напруги

$$U_{10} = \frac{\overline{U_8} + \overline{U_9}}{2} = K_3 S \overline{U_{n1} U_{n2}} + \overline{\Delta U}, \quad (12)$$

та змінної напруги

$$U_{11} = \frac{\overline{U_8} - \overline{U_9}}{2} = K_3 S K_1 K_2 \overline{U_x^2} \text{sign} \sin(2\pi Ft), \quad (13)$$

де  $\text{sign} \sin(2\pi Ft)$  – прямокутна огинаюча послідовності імпульсів на виході перемножувача 10;  $F$  – частота комутаційного генератора 17.

Змінна складова напруги (13) посилюється вибіркоким підсилювачем 12, налаштованим на частоту комутації  $F$ , і поступає через первинний резистивний перетворювач 1 на операційний підсилювач 13, в ланцюг від'ємного зворотного зв'язку якого включений постійний резистор 14. Опір  $R_0$  постійного резистора 14 вибирають рівним початковому опору первинного перетворювача  $R_x$  ( $R_0 = R_x$ ). Коефіцієнт підсилення  $K_y$  операційного підсилювача, як відомо, визначається відношенням опорів

$R_0$  і  $R_x$  ( $K_y = R_0/R_x$ ). Оскільки опір  $R_x$  первинного перетворювача 1 в процесі експлуатації шумового термометра неконтрольовано змінюється ( $R_x = R_0 + \Delta R$ ), то амплітуда змінної напруги (13) з врахуванням співвідношення (1) матиме вигляд:

$$U_{12} = K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{S U_x^2} = 4k K_1 K_2 K_3 K_4 S \Delta f (R_0 + \Delta R) T_x, \quad (14)$$

де  $K_4$  – коефіцієнт посилення вибіркового підсилювача 12.

Підсилена операційним підсилювачем 13 напруга

$$U_{13} = \frac{R_0}{R_0 + \Delta R} U_{12} = 4k K_1 K_2 K_3 K_4 S \Delta f R_0 T_x. \quad (15)$$

Напруга (15), що пропорційна вимірюваній температурі  $T_x$ , випрямляється синхронним детектором 15, який управляється комутаційним генератором 17, і вимірюється цифровим вольтметром 16. Результат виміру можна представити так:

$$U_{14} = S_0 T_x, \quad (16)$$

де  $S_0 = 4k K_1 K_2 K_3 K_4 S \Delta f R_0$  – результуюча крутість перетворення температури в напругу [В/К].

З отриманого виразу (16) виходить, що результат виміру температури  $T_x$  не залежить від власних шумів диференціальних підсилювачів 8 і 9 як некорельованих між собою, так і корельованих. Також виключається вплив зсуву нульового рівня (дрейфу нуля)  $\overline{\Delta U}$  перемножувача 10. Завдяки зворотному зв'язку через первинний перетворювач 1 по змінній напрузі частоти комутації виключений вплив від генерації дробового шуму в самому первинному резистивному перетворювачі. Робота операційного підсилювача 13 на змінному струмі і подальше синхронне детектування змінної напруги усуває вплив дрейфу нуля операційного підсилювача на результат виміру температури  $T_x$ . У рівняння перетворення (15) входить опір  $R_0$  постійного резистора 14, а не нестабільний опір  $R_x$  первинного резистивного перетворювача 1, що дозволяє використовувати як термочутливий елемент шумового термометра будь-який провідний об'єкт в зоні контролю, по початковому опору якого вибирається опір  $R_0$  резистора 14 і здійснюється градування шумового термометра.

Результуюча крутість перетворення  $S_0$  термометра здійснюється відповідно до виразу (16) при відомій калібрувальній температурі  $T_k$  первинного резистивного перетворювача 1:

$$S_0 = \frac{U_k}{T_k}, \quad (17)$$

де  $U_k$  – напруга цифрового вольтметра 16, отримана при калібруванні шумового термометра.

### **Висновки**

Використання запропонованої схеми в шумовій термометрії дозволить:

- підвищити в 5-10 разів точність виміру низьких і середніх температур, при яких рівні теплових шумів первинного резистивного перетворювача і власних шумів підсилювачів сорозмірні;
- працювати в агресивних середовищах, в яких первинний резистивний перетворювач швидко окислюється і міняє свій електричний опір, або використовувати резистивний елемент з великим температурним коефіцієнтом опору (мідні або алюмінієві деталі технологічної апаратури);
- збільшувати роздільну здатність шумових термометрів завдяки вибіркового підсилювачу низькочастотного сигналу частоти комутації і подальшого синхронного детектування без генерації паразитних шумів в первинному резистивному перетворювачі;
- застосовувати типові інтегральні диференціальні підсилювачі і інтегральні перемножувачі з наявними шумами і зсувом нуля, що зменшить вартість виготовлення шумових термометрів для широкого діапазону температур.

### ЛІТЕРАТУРА.

1. Саватеев А.В. Шумовая термометрия [Текст] / А.В. Саватеев. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 132 с.: илл.; ББК 31.32
2. Куини Терри. Температура / Терри Куини; пер. с англ. – Д.И. Астров, Л.И. Самойлова; [наук. ред. В.И. Самсонова]. – М.: Мир, 1985. – 448с., илл. – ББК 22.317.
3. Декларацийний патент на винахід 40881А, Україна, МПК<sup>8</sup> G01K 7/30, Шумовий термометр / Скрипник Ю.О., Лісовський О.А.; власник Київський державний університет технологій та дизайну – №2000095522; заявл. 26.09.2000; опуб. 15.08.2001, Бюл.пром.влас., – №7, 2001р.
4. Патент на корисну модель 58536 Україна, МПК<sup>8</sup> G01R 19/02, G01R 29/26., Пристрій для вимірювання дисперсії шумових сигналів / Скрипник Ю.О., Санніков В.Ю., Агафонов А.В.; власник Київський національний університет технологій та дизайну. – № u201014912; заяв. 13.12.2011; опуб. 11.04.2011 Бюл. пром. влас., – №7, 2011р.



5. Санніков В.Ю. Підвищення точності вимірювання дисперсії шумових сигналів [Електронний ресурс] / В.Ю. Санніков, Ю.О. Скрипник // Технології та дизайн. – 2011. – №1. – Режим доступу до журн.: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/td/2011\\_1/2011-1.html](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/td/2011_1/2011-1.html)
6. Патент на корисну модель 62713 Україна, МПК<sup>8</sup> G01K 7/30. Шумовий термометр / Скрипник Ю.О., Санніков В.Ю., Агафонов А.В.; власник Київський національний університет технологій та дизайну. – № u201101861; заяв. 17.02.2011; опуб. 12.09.2011 Бюл. пром. влас., – №17, 2011р.

***В.Ю. Санніков, Ю.А. Скрипник***

***Повышение точности работы шумового термометра.***

*Рассмотрен способ совершенствования работы шумовых термометров за счет полного исключения влияния собственных шумов усилителей и других элементов измерительной схемы на входной шумовой сигнал, что позволяет повысить точность измерения температуры и расширить пределы ее измерения.*

***Ключевые слова:*** шумовой термометр, шумовой сигнал, дисперсия, температура, усилитель, перемножитель, интегратор.

***V.Yu. Sannikov, Yu.A. Skripnik***

***Increase of exactness of work of noise thermometer.***

*The method of perfection of work of noise thermometers is considered due to the complete exception of influence of own noises of strengtheners and other elements of measuring chart on initial permanent tension, that allows to promote exactness of measuring of temperature and extend the limits of its measuring.*

***Keywords:*** noise thermometer, noise signal, dispersion, temperature, strengthener, multiplier, integrator.