

УДК 681.586.36

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380415201679499>

**К. Л. Шевченко**<sup>1</sup>, доцент, д.т.н., **О. П. Яненко**<sup>2</sup>, професор, д.т.н.,  
**М. П. Василенко**<sup>3</sup>, доцент, к.т.н., **Ю.М. Овдієнко**<sup>4</sup>, магістр

## **ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВИХ ШУМІВ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ОБ'ЄКТІВ**

**En**

A noise method of temperature measurement is widely used in engineering and science. The disadvantage of noise methods is the measurement results dependence on the object resistance.

Thermal noise is always present in conducting object. It is caused by the velocity fluctuations of electric charge carriers. The paper shows the possibility of electrically conductive object temperature measurement by assessing their own thermal noise. The structure of the temperature noise meter and the algorithm of its operation are presented in the article. The scheme includes the following elements:

---

<sup>1</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра автоматизації експериментальних досліджень

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра автоматизації експериментальних досліджень

<sup>3</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра автоматизації експериментальних досліджень

<sup>4</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", факультет авіаційних і космічних систем

lead object, separate capacitors, transformer, broadband amplifiers, multiplier, low-pass filter and voltmeter. RMS noise voltage is determined by the Nyquist formula. The algorithm of the measuring system eliminates the impact of the object resistance on the measuring result. Limiting thermal noise band occurs in the resonant circuit. This eliminates the noise correlation of own band amplifiers. The scheme allows the measurement of low temperatures in the low-thermal noise.

The independence of the temperature measurement results from the resistance of the thermal noise source allows refusing sensors. Temperature meter, considered in the article, is comfortable in difficult placing sensors at the site.

**Ru**

В работе показана возможность измерения температуры электропроводных объектов путем оценки их собственных тепловых шумов. Предложены структура построения шумового измерителя температуры и алгоритм ее работы. Показано, что использование предложенной схемы обеспечивает независимость результата измерений от физико-механических параметров объекта. Рассмотренный измеритель температуры удобен в тех случаях, когда представляет сложность размещение датчиков на объекте.

## Вступ

Шумові методи вимірювання температури знаходять широке застосування в медицині, техніці і науці, оскільки не потребують спеціальних датчиків, що перетворюють температуру у електричний сигнал [1] – [3]. Використання, наприклад, термометрів опору обумовлює наявність складових похибки від технологічного розкиду опорів та температурних коефіцієнтів, впливу термоелектричного ефекту при підключенні платинових або нікелевих датчиків, теплових та фліккер-шумів, саморозігріву датчика тощо [4]. Так, термоелектричні, терморезистивні та інші типи датчиків, що контактують з об'єктом, вносять суттєву похибку внаслідок відводу тепла від місця установки або спотворюють температурне поле своїми захисними чохлами. В діапазоні температур (30 ... 500 °C) загальна похибка при використанні термометрів опору може сягати 1,5 ... 2 %, а в разі нестаціонарних теплових процесів - 3% [5]. При використанні шумового методу вимірюють середньоквадратичне значення напруги теплового шуму, яке пропорційне термодинамічній температурі провідного об'єкта. Недоліком шумових методів є залежність результатів вимірювання від опорів об'єкта. Це викликає складнощі при вимірюванні температури об'єктів різної форми і з різними розмірами. Для виключення впливу опорів об'єкта на результат вимірювання його температури вводять додаткові операції, які дозволяють зменшити вплив опорів на рівень вимірюваного теплового шуму [6] – [9].

## Постановка задачі

Існуючі на даний момент шумові методи вимірювання температури мають ряд недоліків, які негативно позначаються на точності результату вимірювання.

Відомий шумовий метод вимірювання температури [5], в якому використовують додаткову операцію ділення напруги, пропорційної температурі і опору об'єкта на напругу, яка пропорційна тільки опору додаткового резистора, який вибирають ідентичним за опором і термодинамічним станом до об'єкта. Однак, через неконтрольовані зміни опору самого об'єкта неможливо повністю компенсувати похибку від його опору в процесі експлуатації.

В іншому шумовому методі вимірювання температури [8] виділяють з теплових шумів провідного об'єкта в заданій смузі частот шумову напругу, розділяють її на дві шумові напруги, які підсилюють і перемножують, отриману напругу усереднюють фільтром в постійну напругу та визначають вимірювану температуру провідного об'єкта.

Однак, в процесі перемноження шумових напруг, отриманих з шумового струму резистивного елемента, перемножуються і власні шуми підсилювачів. При використанні смугових підсилювачів через вузьку смугу пропускання власні шуми підсилювачів стають у значній мірі корельованими. Внаслідок цього при перемноженні і наступному усередненні з корельованих шумів утворюється додаткова складова постійної напруги, яка спотворює результат вимірювання температури за тепловими шумами об'єкта. Крім того, неминуча неідентичність характеристик двох перетворювачів струму в напругу, за допомогою яких реалізується операція перетворення шумового струму на дві шумових напруги, обумовлює додаткову похибку у вимірюванні температури.

Тому доцільним є створення шумового вимірювача температури, в якому введенням нових операцій з шумовими сигналами забезпечилося б підвищення точності вимірювання температури провідних об'єктів довільної форми з різними розмірами.

### **Основна частина**

Авторами запропоновано шумовий вимірювач температури, який дозволяє усунути перераховані вище недоліки [10]. Електрична структурна схема вимірювача температури наведена на рис. 1.

Наведена на рис. 1 схема складається з провідного об'єкта довільної форми і розмірів, умовно показаного позицією 1, роздільних конденсаторів 2 і 3, конденсатора 4, трансформатора 5, широкосмугових підсилювачів 6 і 7, загальної заземленої шини 8, перемножувача 9, фільтра 10 нижніх частот, підсилювача 11 постійної напруги, операційного підсилювача 12, постійного резистора 13 і вольтметра 14.

В провідному об'єкті 1, який нагрітий до вимірюваної температури  $T_x$ , завжди присутній тепловий шум, викликаний флуктуаціями швидкостей елементарних носіїв електричного заряду (електронів, іонів, дірок) всередині об'єкта. Спектр теплового шуму досить широкий: від низьких до

## Розділ 1. Інформаційні системи

високих частот. Однак, напруга на резонансному контурі з конденсатора 4 і індуктивності обмотки трансформатора 5 визначається тільки тими коливаннями, які потрапляють в смугу пропускання цього контуру.

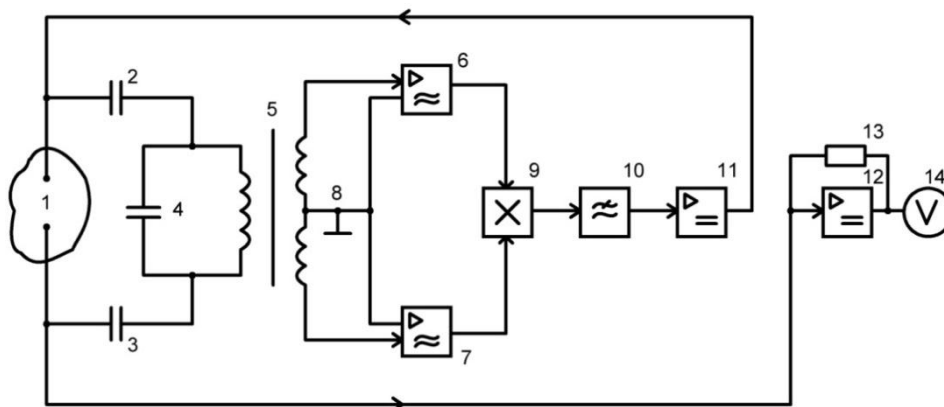


Рис 1. Електрична структурна схема шумового вимірювача температури

Резонансну частоту паралельного коливального контуру обирають в діапазоні частот 100 – 300 кГц, в якому відсутні низькочастотні шуми типу флікер-шум, а високочастотні електромагнітні наводки ще невеликі.

При високій добротності обмоток трансформатора (втрати в контурі малі) опір коливального контуру набагато більший за опір провідного об'єкта 1. Тому середньоквадратичне значення шумової напруги визначається формулою Найквіста для ненавантаженого резистивного об'єкта:

$$\bar{U}_1 = \sqrt{4kT_x \Delta f R_0}, \quad (1)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;

$\Delta f$  – смуга частот спектру теплових шумів, що виділяються коливальним контуром;

$R_0$  – опір провідного об'єкта.

Шумова напруга (1) трансформується у вторинну обмотку трансформатора 5 і далі підсилюється двома широкосмуговими підсилювачами 6 і 7. Підсилені середньоквадратичні напруги з врахуванням власних шумів підсилювачів приймають вигляд:

$$\bar{U}_2 = \sqrt{K_1^2 K_2^2 \bar{U}_1^2 + \bar{U}_{ш2}^2}, \quad (2)$$

$$\bar{U}_3 = \sqrt{K_1^2 K_3^2 \bar{U}_1^2 + \bar{U}_{ш3}^2}, \quad (3)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт трансформації трансформатора 5;

$K_2, K_3$  – коефіцієнти підсилення широкосмугових підсилювачів 6, 7;

$\bar{U}_{ш2}, \bar{U}_{ш3}$  – середньоквадратичні напруги власних шумів на виходах широкосмугових підсилювачів 6 і 7.

## Інформаційні системи, механіка та керування

При перемноженні напруг (2) і (3) в перемножувачі 9 слід врахувати, що власні шуми ( $\bar{U}_{u2}$  та  $\bar{U}_{u3}$ ) підсилювачів 6 і 7, які мають широку смугу пропускання, між собою некорельовані. Тому їх усереднений добуток дорівнює нулю. В той же час шумові напруги від об'єкта 1 ( $\bar{U}_1$ ), отримані розщепленням обмотками трансформатора 5, залишаються корельованими. В результаті цього середній квадрат шумової напруги на виході перемножувача 9 визначається тільки тепловими шумами провідного об'єкта 1:

$$\bar{U}_4^2 = K_1^2 K_2 K_3 S \bar{U}_1^2, \quad (4)$$

де  $S$  – крутизна перетворення перемножувача 9.

Напругу (4) усереднюють фільтром 10 нижніх частот, а виділену ним постійну складову напруги підсилюють підсилювачем 11 постійної напруги.

Підсилена напругу через провідний об'єкт подають на операційний підсилювач 12, охоплений від'ємним зворотним зв'язком через постійний резистор 13. При послідовному включенні операційного підсилювача 12 з провідним об'єктом 1 його коефіцієнт підсилення  $K_6$  визначається виразом:

$$K_6 = \frac{R}{R_0}, \quad (5)$$

де  $R$  – опір резистора 13 в ланцюгу від'ємного зворотного зв'язку.

Напруга (4), яка підсилюється операційним підсилювачем 12 з коефіцієнтом підсилення (5), приводиться до вигляду

$$U_6 = 4kK_1^2 K_2 K_3 K_4 K_5 S \Delta f R T_x. \quad (6)$$

Як видно з отриманого виразу (6) в результаті вказаного підсилення в функції перетворення відбулося заміщення опору об'єкта  $R_0$  опором постійного резистора  $R$  ланцюга зворотного зв'язку операційного підсилювача 12. В результаті цього автоматично виключився вплив опору  $R_0$  провідного об'єкта 1 на результат перетворення температури  $T_x$  на постійну напругу  $U_6$ , яка вимірюється вольтметром 14.

Результат перетворення (6) можна представити як

$$U_6 = S_p T_x, \quad (7)$$

де  $S_p = 4kK_1^2 K_2 K_3 K_4 K_5 S \Delta f R$  – результуюча крутизна перетворення температури в напругу.

Оскільки функція перетворення (6) лінійна відносно вимірюваної температури  $T_x$ , то результуючу крутизну перетворення (7) можна визначити за значенням однієї калібрувальної температури  $T_K$ :

$$S_p = \frac{U_k}{T_k}, \quad (8)$$

де  $U_k$  – покази вольтметра 14 при відомій (калібрувальній) температурі провідного об'єкта 1.

Далі за показами вольтметра 14, з врахуванням значення результуючої крутизни перетворення (8), можна визначати поточні значення температури провідного об'єкта. Завдяки використанню підсилювачів 6 і 7 з широкою смугою пропускання усереднений фільтром 10 нижніх частот добуток власних шумів цих підсилювачів обнуляється, що дозволяє здійснювати вимірювання низьких температур при низькоінтенсивному тепловому шумі провідного об'єкта. Необхідне обмеження смуги частот теплового шуму, що виділяється, здійснюється не смуговими підсилювачами, а резонансним контуром з конденсатора 4 і обмотки трансформатора 5, що виключає кореляцію власних шумів підсилюючих елементів. При цьому зникає необхідність у парних елементах з ідентичними параметрами, що характерно для відомих вимірювачів температури.

### **Висновки**

Незалежність результатів вимірювання температур в розглянутій схемі від опору джерела теплового шуму дозволяє відмовитись у ряді випадків від термодатчиків, як первинних вимірювальних перетворювачів. В запропонованому вимірювачі в якості датчика температури можна використовувати сам провідний об'єкт або його частину, наприклад, деталь металевої конструкції. Джерелом теплових шумів можуть бути розплави різних матеріалів (скла, полімерів тощо), шкіряний покрив людини, розчини рідин.

Подібний вимірювач температури зручний у тих випадках, коли розміщення датчиків на об'єкті ускладнене. Він може бути ефективний при контролі температур у вибухонебезпечних та пожежонебезпечних приміщеннях, а також в екстремальних умовах експлуатації (збільшені температури та тиски), коли неминучий швидкий знос термодатчика від зовнішнього середовища.

Підвищення точності вимірювання температури на 20 – 30 % запропонованою схемою обумовлене, з одного боку, виключенням термодатчика з вимірювального процесу, з іншого боку, придушенням впливу шумів і завад на вимірювальні перетворення. Останнє розширює діапазон вимірювання в області низьких температур до 20 ... 30°C.

## Список використаної літератури

1. *Луцик Я. Т.* Енциклопедія термометрії / Я. Т. Луцик, Л. К. Буняк, Ю. К. Рудавський, Б. І. Стадник - Львів: вид-во «Львівська політехніка», 2003. – 428 с.
2. E. Isosaari, T. Holmquist, M. Meschke, M. Heinonen, J. P. Pekola: Thermometry by micro and nanodevices/ Eur.Phys.J.Special Topics, Vol. 172, 2009: 323-332.
3. *Саватеев А. В.* Шумовая термометрия / А. В. Саватеев - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 132 с.
4. D. R. White, R. Galleano, A. Actis, H. Brixy, M. De Groot, J. Dubbeldam, A. L. Reesink, F. Edler, H. Sakurai, R. L. Shepard and J. C. Gallop: The status of Johnson noise thermometry/ Metrologia, Vol.33, 1996: 325–335.
5. Вимірювання температури: теорія і практика / Навч. посіб. Луцик Я. Т., Гук О. П., Лах О. І., Стадник Б. І. - Львів, Бескид Біт, 2006. - 560 с.
6. *Скрипник Ю. О.* Радіотепловий контроль матеріалів та виробів/ Ю. О. Скрипник, К. Л. Шевченко - Вісник КНУТД, № 5(25), 2005, т. 2. С. 33–34.
7. *Скрипник Ю. О.* Перспективні напрямки використання радіометрів надвисокочастотного діапазону для вимірювання температури / Ю. О. Скрипник, К. Л. Шевченко, В. П. Куценко // Сборник статей 7 международной конференции по квантовой медицине «Теоретические и клинические аспекты квантовой медицины» - Донецк, 2003. С. 55 - 60.
8. *Головко Д. Б.* Корреляционный измеритель интенсивности электромагнитного излучения / Д. Б. Головко, Ю. А. Скрипник, К. Л. Шевченко // 12-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 9 – 13 сентября, Севастополь, 2002. С. 517 – 521.
9. Патент України на корисну модель № 70940, МПК G01K7/30. Шумовий спосіб вимірювання температури / Скрипник Ю. О., Лісовський О. А., Василенко М. П.; Опубл. 26.06.12; Бюл. № 12.
10. *Яненко О. П.* Шумовий метод вимірювання температури/ О. П. Яненко, М. П. Василенко, К. Л. Шевченко // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи», Київ, 14-20 березня 2016 р.: матеріали конференції – Київ, 2016. - С.115-117.