

- Actuators for Microrobots Designed to Operate in the Vascular Network / Tabatabaei, Seyed Nasr, Lapointe, Jacinthe ma Martel, Sylvain – 2009.*
7. *Rosensweig Heating magnetic fluid with alternating magnetic field / Rosensweig – 2002. (Journal of Magnetism and Magnetic Materials).*
8. *Roizin-Towle The response of human and rodent cells to hyperthermia / Roizin-Towle and Pirro – New York : 1992 (Center for Radiological Research, College of Physicians and Surgeons of Columbia University).*
9. *Maenosono Theoretical Assesment of FePt Nanoparticles as Heating Elements for Magnetic Hyperthermia / Maenosono, Shinya u Saita, Soichir – 2006 p., (IEEE Transactions Magnetics).*
10. *Atkinson W. J. Usable Frequencies in Hyperthermia with Thermal Seeds / Atkinson W. J., Brezovich I. A., and Chakraborty D. P. – 1984. – С. 70–75. – (IEEE Trans. Biomed. Eng., T. Vol. B.ME 31.)*
11. *Harmon Cell death induced in a murine mastocytoma by 42-47 degrees C heating in vitro: evidence that the form of death changes from apoptosis to necrosis above a critical heat load. / Harmon, Herston : 1990.*
12. *Nadelcu Gigel Magnetic Nanoparticles Impact on Tumoral Cells in the Treatment by Magnetic Fluid Hyperthermia./ Nadelcu Gigel – 2008. (Journal of Nanomaterials and Biostructures).*
13. *Weisser Matthias Entwicklung und klinischer Einsatz eines HF-Mehrgeneratoren Überwärmungssysteme./ Weisser, Matthias TU München: 1989.*
14. *Morris The response of the rat tail to hyperthermia. Morris, Myers and Field. – 1977 p.*
15. *Никифоров В.Н. Магнитная индукционная гипертермия. / Никифоров В.Н. //– Изд. вузов. Физика, 2007. – С. 60–72.*

УДК 536.5

## ШУМОВА ТЕРМОМЕТРІЯ. АНАЛІЗ ПОХИБОК

Ї Павло Гамула, Ігор Микитин, 2011

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Проаналізовано похибки шумового методу вимірювання температури.*

*Проведен анализ погрешностей шумового метода измерения температуры.*

*The analysis of errors of the noise method of the measuring temperature is conducted.*

**Постановка проблеми.** Аналізуючи формулу Найквіста, яка є основою шумової термометрії, можна припустити, що визначення температури є справою легкою і технічно нескладною, оскільки потрібно мати значення декількох параметрів, визначення похибки кожного із яких є давно і досконало вивченим. Насправді ж це не так просто.

Якими складовими визначається похибка вимірювання температури шумовим методом? Зважаючи на формулу Найквіста [1], значення температури можна порохувати так:

$$T = \frac{\overline{e(t)^2}}{4k\Delta fR}, \quad (1)$$

попередньо вимірявши середнє значення квадрата шумової напруги (СЗКШН)  $\overline{e(t)^2}$ , де  $\Delta f$  – робоча частотна смуга;  $R$  – значення опору первинного перетворювача (ПП). Похибка вимірювання температури

залежатиме від похибки вимірювання СЗКШН  $d_e$ , похибки підтримання робочої частотної смуги шумового термометра (ШТ)  $d_{\Delta f}$  та похибки опору первинного перетворювача ШТ  $d_R$ :

$$dT = d_e - d_{\Delta f} - d_R. \quad (2)$$

Розглянемо граничне значення відносної похибки вимірювання температури

$$dT_{sp} = d_e + d_{\Delta f} + d_R. \quad (3)$$

Отже, є три складники, значення яких визначає загальну похибку. Чи вони є завжди незмінними і незалежними від різноманітних факторів? Кожен із цих складників має «історію походження» та «родовід».

**Основний матеріал.** Похибки складників, що входять в (3), можна подати так:

$$d_e = d_{em} + d_{enstr}, \quad (4)$$

де  $d_{em}$  – відносна методична похибка вимірювання СЗКШН, зумовлена обмеженим часом усереднення,  $d_{instr}$  – відносна інструментальна похибка вимірювання СЗКШН;

$$d_{\Delta f} = d_{\Delta f_{R_x}} + d_{\Delta f_{instr}}, \quad (5)$$

де  $d_{\Delta f_{R_x}}$  – відносна похибка АЧХ ШТ, зумовлена зміною опору ПП;  $d_{\Delta f_{instr}}$  – відносна інструментальна похибка робочої частотної смуги ШТ;

$$d_R = d_{R_m} + d_{R_{T}} + d_{R_{t}}, \quad (6)$$

де  $d_{R_m}$  – відносна похибка підлаштування номінального значення опору ПП ШТ;  $d_{R_{T}}$  – відносна температурна похибка опору ПП ШТ;  $d_{R_{t}}$  – відносна часова похибка опору ПП ШТ.

Якщо в процесі виготовлення чутливого елемента (ЧЕ) ПП виконати технологічну операцію стабілізації стану матеріалу ЧЕ та встановити опір ЧЕ заданого значення, то складові  $d_{R_m}$  і  $d_{R_{t}}$  будуть зменшені і ними у певних випадках можна буде знехтувати. Тоді (6) набуде вигляду:

$$d_{R_x} = d_{R_{T}}. \quad (7)$$

Підсумовуючи сказане вище, отримуємо загальний вираз для відносної граничної похибки вимірювання температури:

$$dT_{ep} = d_{em} + d_{instr} + d_{\Delta f_{R_x}} + d_{\Delta f_{instr}} + d_{R_{T}}. \quad (8)$$

Залежно від методу вимірювання СЗКШН деякі з доданків можуть бути нехтовно малими. Крім того, деякі доданки можуть мати декілька складових, кількість та наявність яких залежить від методу вимірювання. Загальна картина генезису похибки вимірювання температури ускладнюється, оскільки кількість факторів, що впливають, є значною. Тому тільки ретельний і коректний аналіз джерел похибок можливих методів вимірювання СЗКШН може вказати, у якому температурному діапазоні які значення опору ПП будуть оптимальними за використання того чи іншого методу вимірювання СЗКШН, а відповідно і температури. Для цього розглянемо відомі різновиди методів вимірювання СЗКШН (рис. 1).

**Кореляційний метод** [2] використовується для мінімізації впливу власних шумових напруг підсилювальних елементів на результат вимірювання. Структурна схема ШТ на основі цього методу наведена на рис. 2. Його можна застосовувати як складову частину будь-якого з методів.



Рис. 1. Реалізації шумового методу вимірювання температури

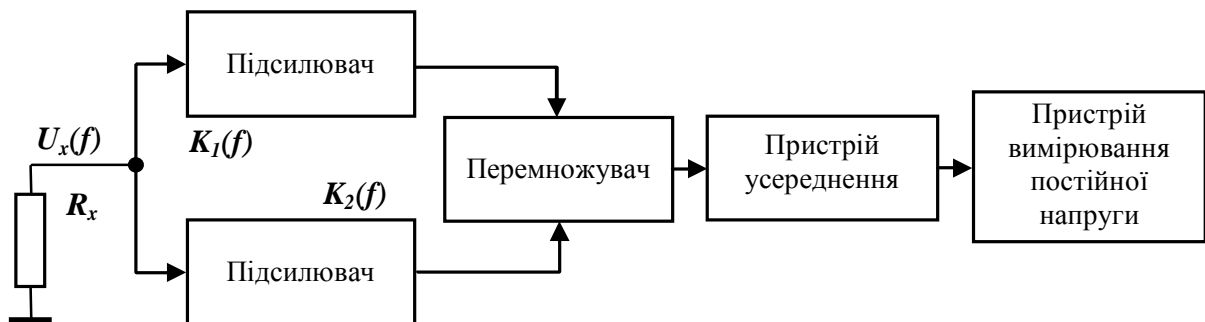


Рис. 2. Структурна схема ШТ на основі кореляційного методу

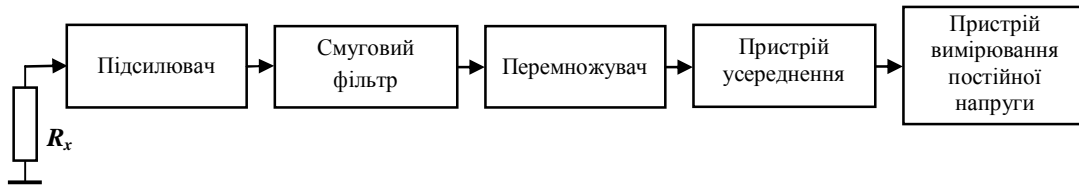


Рис. 3. Структурна схема ШТ на основі методу безпосередньої оцінки

Шумова напруга  $U_x(f)$  з первинного перетворювача  $R_x$  подається одночасно на входи підсилювачів з коефіцієнтами підсилення  $K_1(f)$  та  $K_2(f)$  і власними шумовими напругами  $U_{n1}(f)$  та  $U_{n2}(f)$ . Оскільки шумові напруги між собою статистично незалежні, то за достатньо тривалого часу усереднення добутки  $\overline{U_x(f)U_{n1}(f)} \approx \overline{U_x(f)U_{n2}(f)} \approx \overline{U_{n1}(f)U_{n2}(f)} \approx 0$  [3] і на виході пристрою усереднення матимемо напругу  $U_{pu}(f)$ , пропорційну до СЗКШН первинного перетворювача:

$$U_{pu}(f) \approx K_1(f)K_2(f)\overline{U_x^2(f)}. \quad (9)$$

*Переваги* – висока швидкодія перетворення; простота і компактність схемної реалізації; мінімізація впливу власних шумів підсилювача на результат вимірювання.

*Недоліки* – застосування двох, не завжди ідентичних, каналів підсилення вимірюваного сигналу; кожна ланка ШТ безпосередньо додає свій внесок в загальну похибку ШТ.

**Метод безпосередньої оцінки.** Структурна схема ШТ на основі методу безпосередньої оцінки [4] наведена на рис. 3. Основним недоліком такого ШТ є те, що похибки перетворення шумового сигналу кожною ланкою прямо входять у загальну похибку вимірювання.

Тому відносна гранична похибка вимірювання температури методом безпосередньої оцінки дорівнюватиме:

$$dT_{grMBO} = d_{em} + d_{pidsU} + d_{\Delta finstr} + d_{perem} + d_{pu} + d_{pvpn} + d_{\Delta R_x} + d_{R_x T}, \quad (10)$$

де  $d_{pidsU}$  – відносна інструментальна похибка широкосмугового підсилювача змінної напруги;  $d_{perem}$  – відносна інструментальна похибка перемножувача;  $d_{pu}$  – відносна інструментальна похибка пристрою усереднення;  $d_{pvpn}$  – відносна інструментальна похибка пристрою вимірювання постійної напруги.

*Переваги* – висока швидкодія перетворення, простота та компактність схемної реалізації термометра.

*Недоліки* – похибки перетворення вимірюваного сигналу кожною ланкою прямо входять у загальну похибку вимірювання.

**Метод заміщення.** Структурна схема ШТ на основі методу заміщення [5] подана на рис. 4. Основною особливістю таких термометрів є порівняння шумового сигналу первинного перетворювача  $R_x$  температура якого  $T_x$ , з сигналом шумової регульованої зразкової напруги змінного резистора  $R_0$ , який перебуває при відомій температурі  $T_0$ . На вхід ШТ почергово подається або шумова напруга з резистора  $R_x$ , пропорційна до вимірюваної температури, або зразкова шумова напруга з резистора  $R_0$ .

У момент рівності двох СЗКШН (на  $R_x$  та  $R_0$ ) справедливою є залежність:

$$4kT_x \Delta f R_x = 4kT_0 \Delta f R_0, \quad (11)$$

на підставі якої можна отримати значення вимірюваної температури  $T_x$  за формулою:

$$T_x = \frac{R_0}{R_x} T_0. \quad (12)$$

Похибка вимірювання визначається насамперед похибкою зразкового резистора  $R_0$  та чутливістю нуль-індикатора. Останній фактор не є істотним, тому що, збільшуючи коефіцієнт підсилення, можна його до певної межі зменшувати.

Граничне значення відносної похибки вимірювання температури методом заміщення можна подати такою залежністю:

$$dT_{grMZ} = d_{em} + d_{R_x T} + d_{R_0} + d_{R_0 T} + d_{\Delta R_0 R_x} + d_{0ind} + d_{R_{kzank}} + d_{R_{kroz}} + d_{T_0}, \quad (13)$$

де  $d_{R_0}$  – відносна інструментальна похибка зразкового опору  $R_0$ ;  $d_{R_0 T}$  – відносна температурна похибка зразкового опору  $R_0$ ;  $d_{\Delta R_0 R_x}$  – відносна похибка АЧХ ШТ, зумовлена зміною значення опору резисторів  $R_0$ ,  $R_x$ , які почергово під'єднуються до входу вимірювальної частини ШТ;  $d_{0ind}$  – відносна інструментальна похибка нуль-індикатора;  $d_{R_{kzank}}$  – відносна похибка

замкнутого ключа, зумовлена додаванням до резисторів  $R_0$ ,  $R_x$  опору  $R_{klz}$  замкнутого ключа;  $d_{R_{klz}}$  – відносна похибка розімкнутого ключа, зумовлена шунтуванням резисторів  $R_0$ ,  $R_x$  опором  $R_{klr}$  розімкнутого ключа;  $d_{T_0}$  – відносна похибка джерела зразкової температури (реперної точки).

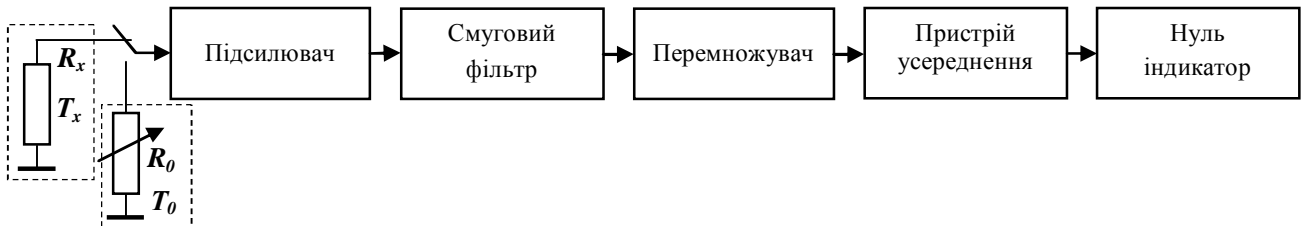


Рис. 4. Шумовий термометр на основі методу заміщення

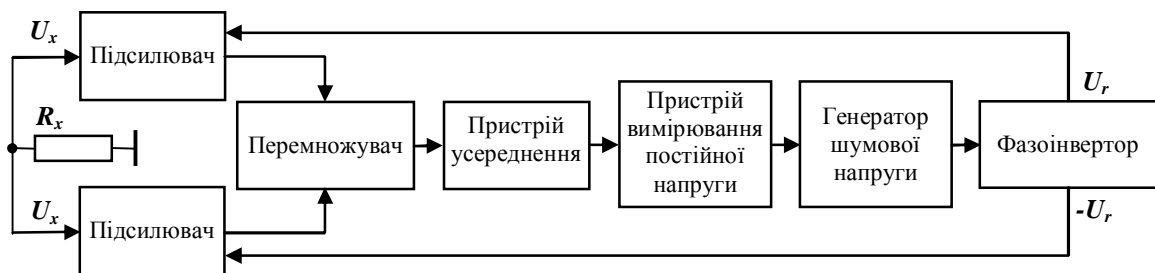


Рис. 5. Структурна схема ШТ на основі методу порівняння з мірою

**Недоліки** – необхідність використання високо-точної багатозначної міри електричного опору  $R_0$  та системи (чи оператора), функцією якої була б зміна значення зразкового опору  $R_0$  та реєстрування моменту рівності двох шумових напруг (на зразковому та вимірюваному опорях); переважно ШТ на основі методу заміщення є складною вимірювальною устаткою; істотно зростає час вимірювання за рахунок необхідної кількості ітерацій під час зрівноваження вимірюваної та зразкової шумових напруг; необхідні комутувальні ключі з малим та незмінним в часі від комутації до комутації залишковим опором у замкнутому стані та малими його змінами в часі від комутації до комутації; відмінність значень опору резисторів  $R_0$  і  $R_x$  в момент зрівноваження призводить до збільшення похибки, зумовленої зміною АЧХ ШТ від значення опору резистора, під'єданого до входу вимірювальної частини.

**Метод порівняння.** На рис. 5 наведено схему ШТ побудованого на основі методу порівняння з мірою [6].

**Переваги** – за умови стабільності функції перетворення ШТ за час двох почергових вимірювань на результат вимірювання не впливають похибки підсилювача, перемножувача, пристрою усереднення та нуля-індикатора; перехід від вимірювання СЗКШН до точнішого вимірювання опору.

На виході пристрою усереднення є сигнал

$$U_x \approx K_1 K_2 (U_x^2 - U_r^2), \quad (14)$$

де  $K_1, K_2$  – коефіцієнти підсилення двох каналів підсилювача;  $U_r(t)$  – зразковий шумовий сигнал генератора шуму.

Регулюючи значення  $U_r(t)$ , можна добитись виконання умови:

$$\overline{U_x^2} = \overline{U_r^2}. \quad (15)$$

Адекватною мірою СЗКШН  $\overline{U_x^2}$  виступає середнє значення квадрата зразкової шумової напруга  $\overline{U_r^2}$ . За умови (17) на результат вимірювання не впливають зміни коефіцієнтів підсилення  $K_1, K_2$ , оскільки і шумова вимірювана напруга  $U_x(t)$ , і зразкова шумова напруга  $U_r(t)$  підсилюються одночасно кожним каналом кореляційного підсилювача.

Відповідно відносна гранична похибка вимірювання температури методом порівняння дорівнює:

$$dT_{grMP} = d_{em} + d_{R_x T} + d_{U_o} + d_{\Delta R_x} + d_{0ind} + d_{U_o T_o}, \quad (16)$$

де  $d_{U_o}$  – відносна інструментальна похибка джерела регульованої зразкової шумової напруги;  $d_{U_o T_o}$  – відносна похибка калібрування шумової зразкової напруги в одиницях температури.

*Переваги* – у момент зрівноваження вимірюваної та зразкової шумових напруг на результат вимірювання не впливають зміни коефіцієнтів передачі підсилювачів.

*Недоліки* – необхідність застосування високочастотного джерела регульованої шумової напруги та системи, яка б забезпечувала зміну регульованої напруги; тривалий час вимірювання за рахунок необхідної кількості ітерацій під час зрівноваження вимірюваної та зразкової шумових напруг.

**Метод вимірювання потужності шуму.** Вимірюваною величиною цього методу є потужність  $W$  теплового шуму

$$W = 4kT\Delta f. \quad (17)$$

Відповідно до (17) за використання методу вимірювання потужності шумового сигналу не потрібно знати значення опору первинного перетворювача [7]. Крім того, температурні зміни опору не впливають на результат вимірювання. Структурна схема такого ШТ наведена на рис. 6.

Первинний перетворювач  $R_x$ , який перебуває за температури  $T_x$ , почергово під'єднується до підсилювача напруги та підсилювача струму. Вихідні сигнали обох підсилювачів напруги почергово перемножуються та усереднюються. Середнє значення квадрата шумової напруги та струму запам'ятовують пристрої запам'ятовування. Середньоквадратичні значення, які були збережені та пропорційні до  $\overline{e_{rx}^2}$  і  $\overline{i_{rx}^2}$ ,

перемножуються. Оскільки вимірювання струму та напруги відбувається почергово, а не одночасно, то кожне окреме вимірювання напруги та струму можна вважати отриманим методом безпосередньої оцінки: спочатку середньоквадратичного значення напруги, а потім середньоквадратичного значення струму.

Похибка вимірювання температури цим методом дорівнюватиме:

$$dT_{grMVP} = d_{em} + d_{pidsU} + d_{\Delta R_U} + d_{im} + d_{pidsI} + d_{\Delta R_I} + d_{\Delta instr} + d_{perem} + d_{pu} + d_{pvm}, \quad (18)$$

де  $d_{\Delta R_U}$  – відносна похибка АЧХ підсилювача напруги, зумовлена зміною опору ПП;  $d_{im}$  – відносна методична похибка вимірювання середнього значення квадрата шумового струму, зумовлена обмеженням часом усереднення;  $d_{pidsI}$  – відносна інструментальна похибка широкосмугового підсилювача змінного струму;  $d_{\Delta R_I}$  – відносна похибка АЧХ підсилювача струму, зумовлена зміною опору ПП.

*Перевага* – результат вимірювання температури не залежить від значення опору чутливого елемента ПП.

*Недоліки* – зміна опору ПП від температури приводить до зміни АЧХ підсилювачів струму та напруги; похибки перетворення вимірювального сигналу кожною ланкою ШТ безпосередньо впливають на похибку вимірювання температури.

**SQUID метод.** Застосування SQUID перетворювачів [8] для вимірювання теплового шуму привело до створення нового типу термометрів, які принципово відрізняються від розглянутих вище. Такі ШТ можна використовувати лише для вимірювання низьких температур, де проявляється ефект надпровідності. Це зумовлено тим, що ПП повинен з'єднуватись з SQUID-м надпровідними дротами.

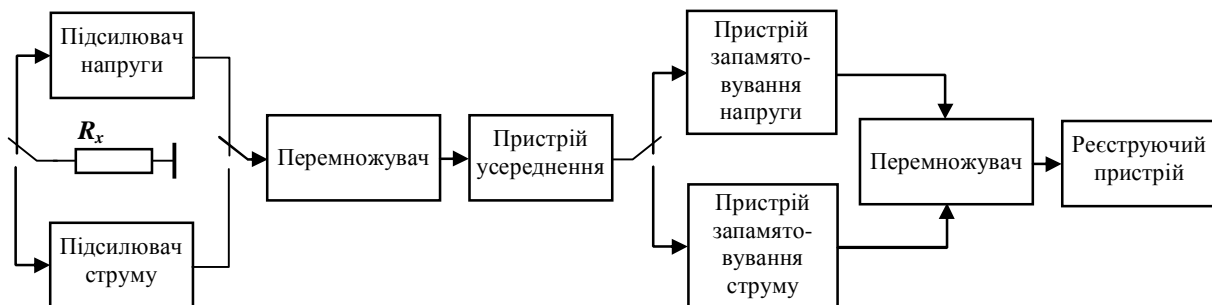


Рис. 6. Структурна схема шумового термометра на основі методу вимірювання потужності шуму

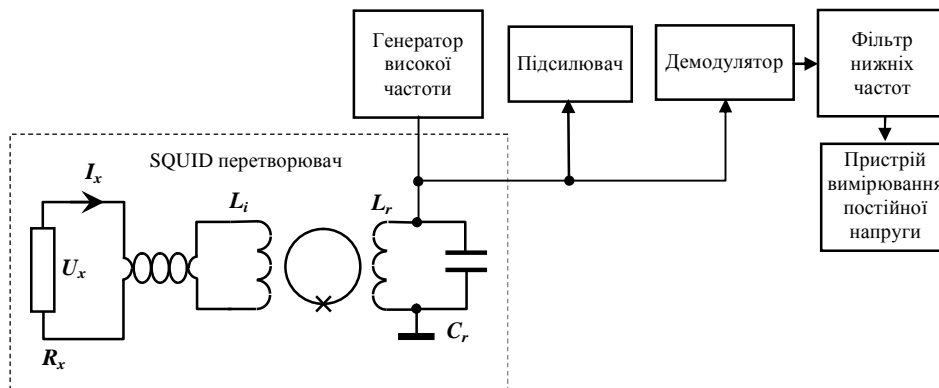


Рис. 7. Структурна схема ШТ на основі SQUID перетворювача

Структурна схема ШТ на основі rf-SQUID перетворювача показана на рис. 7.

Вхідне коло та первинний перетворювач  $R_x$  створюють фільтр, нижня гранична частота якого має значення одиниці – десятки Гц. Тому потрібно особливу увагу приділяти зменшенню впливу флікер-шуму на результат вимірювання.

Гранична похибка вимірювання температури SQUID методом дорівнюватиме:

$$dT_{grSQUID} = d_{em} + d_{R_x T} + d_{gf} + d_{pidsU} + d_{\Delta R_x} + d_{dm} + d_{filtr} + d_{ppm} + d_{L_i} + d_{L_r} + d_{C_r}, \quad (19)$$

де  $d_{gf}$  – відносна інструментальна похибка генератора високої частоти;  $d_{dm}$  – відносна похибка демодулятора;  $d_{filtr}$  – відносна похибка фільтра низьких частот;  $d_{L_i}$  – відносна похибка індуктивності вхідної котушки;  $d_{L_r}$  – відносна похибка індуктивності резонансного контуру;  $d_{C_r}$  – відносна похибка ємності резонансного контуру.

*Переваги* – висока енергетична роздільна здатність SQUID перетворювачів ( $7 \cdot 10^{-32} - 3 \cdot 10^{-33}$  Дж/Гц); дискретний характер вихідного сигналу.

*Недоліки* – вузький діапазон вимірювання температури; необхідність підтримувати температуру рідкого гелію для нормальної роботи SQUID перетворювачів; вплив на результат вимірювання флікер-шуму; необхідність застосування індуктивного sprzęження ПП з SQUID перетворювачем для вимірювання температури понад 7 К, що ускладнює конструкцію ШТ.

**Висновок.** Аналіз можливих джерел похибок, що притаманні реалізаціям шумових термометрів за розглянутими методами, показав, що є складові похибки, наявні у всіх або багатьох розглянутих методах, та індивідуальні складові, які характерні лише для конкретного методу.

Отримані вирази граничної відносної похибки вимірювання температури шумовим методом уможливають дослідження складових похибок, дають змогу виділити найбільш значущі з них та запропонувати способи мінімізації їх значення. Ретельний аналіз складових похибок розглянутих методів дасть можливість визначити оптимальні температурні межі їх застосування, оцінити мінімально можливу похибку шумового термометра і, отже, встановити доцільність створення еталона термодинамічної температури на його основі.

1. Nyquist H. Thermal agitation of electric charge in conductors // *Phys. Rev.*, 32. – 1928. – P.110–113. 2. Шор Ф. Дж. Удобный термометр для низких температур, основанный на использовании теплового шума и усилителя коррелятора / Ф. Дж. Шор, Р. С. Уильямсон // *Приборы для научных исследований*. – 1966. – Т.37. – № 6. – С. 101-107. 3. Саватеев А.В. Шумовая термометрия / А.В. Саватеев – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд. – 1987. – 132 с. 4. М. Дорожжовець. Основи метрології та вимірювальної техніки / М. Дорожжовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. та ін. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2005. – Том. 1. – 532 с. 5. Pickup C. P. A High-Resolution Noise Thermometer for the Temperature Range 90–100 K / C. P. Pickup // *Metrologia*– 1975. – № 11. – P. 151–159. 6. Крафтмахер Я. А. Корреляционный усилитель для изучения флуктуационных явлений / Я. А. Крафтмахер, А. Г. Черевко // ПТЭ. – 1972. – № 4. – С.23–28. 7. Борковский К. И. Новый метод шумовой термометрии / К. И. Борковский, Т. В. Блейлок // *Приборы для научных исследований*. – 1974. – Т.45. – № 5. – С. 65–69. 8. Soulen Jr. R. J. A decade of absolute noise thermometry at NIST using a resistive SQUID / Jr. R. J. Soulen, W. E. Fogle, J. H. Colwell // *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, 1992. – Vol.6. – Part 2 – P. 983–988.