

## ШУМОВІ МОДЕЛІ ВХІДНОГО КОЛА ШУМОВОГО ТЕРМОМЕТРА НА ОСНОВІ ОДНОКАНАЛЬНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Ї Микитин І.П., Серкіз А.В., 2008

Синтезовано математичні вирази, які описують залежність вихідної напруги одноканального підсилювача від шумових параметрів чутливого елемента первинного перетворювача, лінії зв'язку, операційного підсилювача та резисторів зворотного зв'язку першого каскаду підсилювача, а також отримано математичні вирази еквівалентної сумарної шумової напруги, приведені до входу шумового термометра.

**Mathematical expressions, which describe dependence of initial tension one channel strengthener from the noise parameters of pickoff of primary transformer, flow, operating strengthener and resistors of feed-back of the first cascade of strengthener line, are synthesized, and also mathematical expressions of equivalent total noise tension, resulted to the entrance of noise thermometer are got.**

**Постановка задачі.** Вимірюваним сигналом у шумовій термометрії є випадкові флуктуації напруги на затискачах первинного перетворювача (ПП), теоретично описані Найквістом [1], значення середнього квадрата якої пропорційне до термодинамічної температури чутливого елемента ПП. Оскільки потрібно вимірювати інтегральний параметр (середній квадрат) шумової напруги (випадкового процесу), то істинне значення температури можна отримати лише за безмежного часу усереднення. Реальні вимірювання температури шумовими методами звичайно обмежені у часі і за рахунок цього виникає методична похибка. Дослідження, виконані в [2], [3] показали, що методична похибка залежить не лише від часу усереднення та робочої частотної смуги, але й від зведених до входу шумових параметрів вимірювальних ланок шумового термометра (ШТ). У вхідному колі ШТ за рахунок взаємодії об'єкта вимірювання (первинного перетворювача) та засобу вимірювання (вимірювальної частини ШТ) виникає вхідний сигнал, який являє собою композицію вимірюваного шумового сигналу та шумової завади. Обидві складові мають однакову природу, є випадковими процесами, проте виникають у різних ланках ШТ. Вимірюваний шумовий сигнал є електрорушійною силою, що виникає у чутливому елементі ПП. Шумова завада створюється за рахунок шумових параметрів лінії зв'язку, операційного підсилювача та резисторів зворотного зв'язку.

Основний внесок у значення методичної похибки роблять шумові параметри елементів вхідного кола ШТ та першого каскаду підсилювача. Якщо відношення спектральної густини вимірюваного шумового сигналу до спектральної густини шумової завади більше за 10 [4], то впливом шумових параметрів наступних каскадів підсилення можна знехтувати. Це відношення потрібно забезпечувати, правильно вибравши параметри вхідного каскаду підсилювача. Оскільки вимірюваний шумовий сигнал підсилюється першим каскадом у десятки разів, то відношення сигнал-завада для наступних каскадів підсилення, шумові сигнали яких не підсилюються першим каскадом, буде відповідно набагато більшим за значення 10. Тому, розглядаючи методичні похибки, можемо обмежитися лише шумовими сигналами, які виникають у вхідному колі ШТ та у першому каскаді підсилення. Для якомога повнішого аналізу методичних похибок ШТ на основі одноканального підсилювача розглянемо можливі варіанти побудови вхідного кола з урахуванням шумових параметрів:

- чутливого елемента первинного перетворювача;

- операційного підсилювача першого каскаду підсилювача;
- резисторів зворотного зв'язку першого каскаду підсилювача;
- лінії зв'язку.

**Шумові моделі вхідного кола шумового термометра.** Чутливий елемент первинного перетворювача шумового термометра необхідно виготовляти з електропровідного матеріалу, що має низький температурний коефіцієнт опору. Такий ПП перетворює теплову енергію на електричну, яка може проявлятися у вигляді електрорушійної сили на затискачах ПП, струму, який протікає через навантаження, або переданої у навантаження потужності. Надалі під шумовою напругою будемо розуміти напругу на затискачах ПП у режимі неробочого ходу, яка практично дорівнює електрорушійній силі шумового термоперетворювача.

Вхідний каскад підсилювача ШТ можна синтезувати, використовуючи дискретні елементи (біполярні та польові транзистори) або інтегральні операційні підсилювачі (ОП). Враховуючи переваги останніх – низький рівень власного шумового струму та напруги, практично на рівні дискретних елементів, великий коефіцієнт підсилення, високий вхідний опір – доцільніше вхідне коло ШТ та й підсилювач загалом проектувати з використанням ОП, що приводить до спрощення схемної реалізації підсилювача.

За структурою вхідне коло ШТ можна синтезувати як одноканальний або двоканальний (кореляційний) підсилювач. У статті розглянуто можливі варіанти вхідного кола ШТ з використанням одноканального підсилювача (рис.1).

Для одноканального ШТ усі складові шумової завади  $e_{NI}(t)$  подаються на вхід підсилювача, додаються до вимірюваного шумового сигналу  $e_{RX}(t)$  та їхній вплив на методичну похибку вимірювання термодинамічної температури не зменшується із збільшенням часу усереднення та робочої частотної смуги ШТ [5]. Тому важливого значення набуває синтез шумової моделі вхідного кола ШТ, на підставі якої можна поставити вимоги до шумових параметрів елементів вхідного кола, а також використати отримані моделі для математичного аналізу залежності методичної похибки ШТ від шумових параметрів вхідного кола.

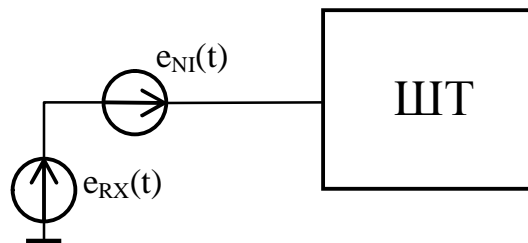


Рис. 1. Вхідне коло ШТ з одноканальним підсилювачем

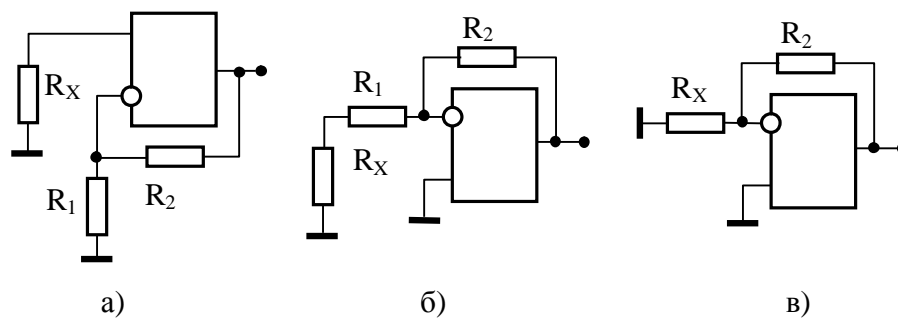


Рис. 2. Структурні схеми вхідного кола ШТ з одноканальним підсилювачем: а) неінвертуючий підсилювач; б) інвертуючий підсилювач; в) інвертуючий підсилювач з первинним перетворювачем у колі зворотного зв'язку

Вимірюваним сигналом ШТ на основі одноканального підсилювача може бути шумова напруга або шумовий струм. Можливі варіанти вхідного кола шумового термометра подано на рис 2.

Первинний перетворювач (резистор  $R_X$ ) до вхідного кола шумового термометра можна під'єднати за двопровідною, трипровідною та чотирипровідною схемою з'єднання. Використання додаткових дротів у трипровідній та чотирипровідній схемі приводить лише до паралельного з'єднання ліній зв'язку ( $R_{L1}$ ,  $R_{L3}$ ,  $R_{L2}$ ,  $R_{L4}$  на рис.4). Відповідно зменшується активний опір ЛЗ, проте з'являються додаткові складові шумової завади:  $e_{L3}(t)$  для трипровідної схеми з'єднання або  $e_{L3}(t)$  та  $e_{L4}(t)$  для чотирипровідної схеми з'єднання. Зменшення опорів ліній можна забезпечити і для двопровідної схеми, вибравши дріт з меншим опором, одночасно позбувшись додаткових складових шумової завади. Тому для ШТ на основі одноканальних підсилювачів оптимально використовувати двопровідну схему з'єднання (рис. 3).

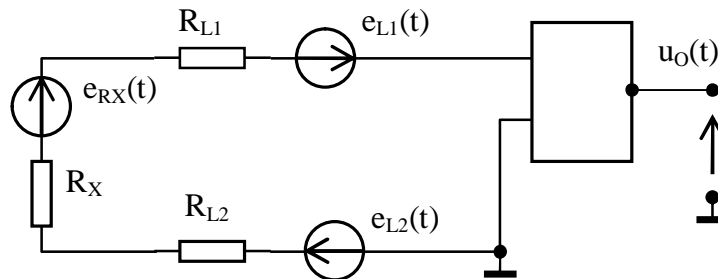


Рис. 3. Шумова модель двопровідної схеми під'єднання ПП до входу одноканального підсилювача

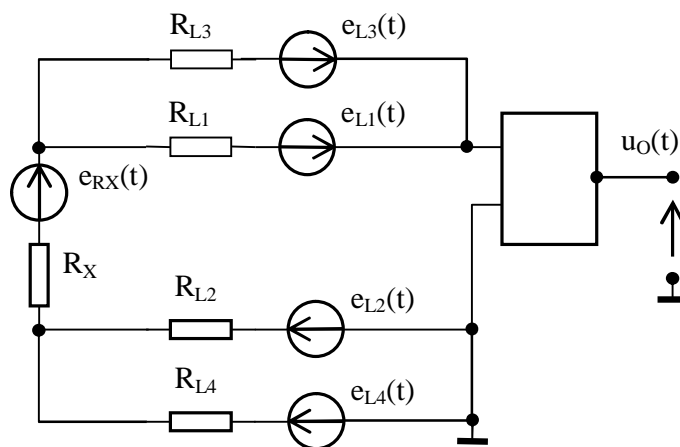


Рис. 4. Шумова модель чотирипровідної схеми під'єднання ПП до входу одноканального підсилювача

У разі використання двопровідної схеми з'єднання шумові напруги ліній зв'язку  $e_{L1}(t)$  та  $e_{L2}(t)$  додаються до вимірюваного сигналу  $e_{RX}(t)$  та їхній вплив на результат вимірювання температури не зменшується із збільшенням часу усереднення. Тому потрібно використовувати з'єднувальні дроти з певним активним опором, вплив шумової напруги яких був би нехтовно малий на сумарну похибку вимірювання ШТ.

Виробники операційних підсилювачів у каталогах наводять числові характеристики зведених до входу шумової напруги ОП у вигляді генератора шумової напруги  $e_N(t)$ , увімкненого послідовно з одним із входів ОП (інвертуючим чи неінвертуючим) та шумового струму ОП у вигляді двох однакових незалежних генераторів шумового струму  $i_{N+}(t), i_{N-}(t)$  (рис. 5).

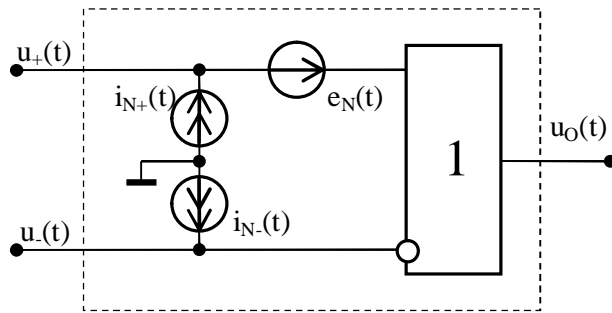


Рис. 5. Шумова модель операційного підсилювача:  
1 – ідеальний (безшумовий) ОП

Переважає більшість сучасних ОП мають внутрішню компенсацію входних струмів. Тому для інвертуючих підсилювачів рис. 2, б, в резистор у колі неінвертуючого входу  $u_+(t)$  можна не використовувати, що дає змогу зменшити кількість складових шумової завади.

Шумова модель входного кола ШТ за схемою неінвертуючого підсилювача (рис. 2, а), з урахуванням шумової моделі ОП, шумових параметрів ПП, лінії зв'язку та резисторів зворотного зв'язку, подана на рис. 6, де  $R_X$  – опір первинного перетворювача,  $R_1, R_2$  – резистори зворотного зв'язку ОП,  $e_{RX}(t)$  – шумова напруга первинного перетворювача,  $e_{R1}(t), e_{R2}(t)$  – шумова напруга резисторів зворотного зв'язку  $R_1, R_2$  відповідно,  $e_N(t)$  – шумова напруга ОП,  $i_{N+}(t), i_{N-}(t)$  – входні шумові струми прямого та інверсного входу ОП відповідно,  $R_{L1}, R_{L2}$  – резистивний опір дротів лінії зв'язку;  $e_{L1}(t), e_{L2}(t)$  – шумова напруга дротів лінії зв'язку  $R_{L1}, R_{L2}$  відповідно,  $u_O(t)$  – вихідна напруга неінвертуючого підсилювача.

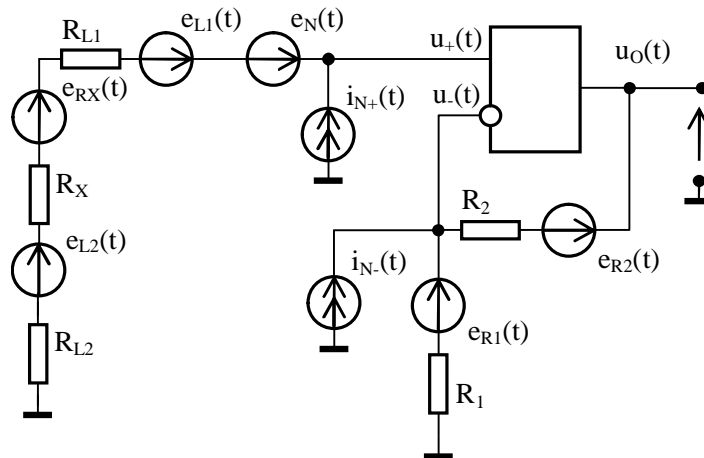


Рис. 6. Шумова модель входного кола ШТ  
за схемою неінвертуючого підсилювача

Використавши метод суперпозиції та властивості ідеального ОП

$$\begin{aligned} u_+(t) &= u_-(t), \\ i_+(t) &= i_-(t) = 0, \\ K &= \infty, \end{aligned} \tag{1}$$

де  $i_+(t), i_-(t)$  – входні струми прямого та інвертуючого входу ОП відповідно,  $K$  – коефіцієнт підсилення ОП без зворотного зв'язку, визначимо вихідну напругу ОП залежно від кожної шумової напруги

$$\begin{aligned}
u_{O1}(t) &= e_{RX}(t) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \\
u_{O2}(t) &= e_N(t) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \\
u_{O3}(t) &= i_{N+}(t)(R_X + R_{L1} + R_{L2}) \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \\
u_{O4}(t) &= -i_{N-}(t)R_2, \\
u_{O5}(t) &= -\frac{e_{R1}(t)}{R_1} \cdot (R_X + R_{L1} + R_{L2}), \\
u_{O6}(t) &= e_{R2}(t), \\
u_{O7}(t) &= e_{L1}(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \\
u_{O8}(t) &= e_{L2}(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Напруга на виході неінвертуючого підсилювача за одночасної дії усіх шумових напруг дорівнює

$$\begin{aligned}
u_O(t) &= \sum_{k=1}^8 u_{Ok}(t) = e_{RX}(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1} + e_N(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1} + \\
&+ i_{N+}(t) \cdot (R_X + R_{L1} + R_{L2}) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} - i_{N-}(t) \cdot R_2 - \\
&- e_{R1}(t) \cdot \frac{R_2}{R_1} + e_{R2}(t) + e_{L1}(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1} + e_{L2}(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Поділивши вираз (3) на коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача для вимірюваного шумового сигналу  $e_{RX}(t)$ , приведемо усі шумові напруги до входу підсилювального каскаду, отримавши еквівалентну вхідну шумову напругу  $u_I(t)$

$$\begin{aligned}
u_I(t) &= e_{RX}(t) + e_N(t) + i_{N+}(t) \cdot (R_X + R_{L1} + R_{L2}) - i_{N-}(t) \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \\
&- e_{R1}(t) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + e_{R2}(t) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} + e_{L1}(t) + e_{L2}(t).
\end{aligned} \tag{4}$$

Для спрощення та кращого сприйняття виразу (4) введемо позначення коефіцієнтів біля шумових напруг та струмів

$$a_1 = R_X + R_{L1} + R_{L2}, a_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, a_3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, a_4 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{5}$$

Підставивши (5) в (4), отримуємо

$$\begin{aligned}
u_I(t) &= e_{RX}(t) + e_N(t) + a_1 \cdot i_{N+}(t) - a_2 \cdot i_{N-}(t) - \\
&- a_3 \cdot e_{R1}(t) + a_4 \cdot e_{R2}(t) + e_{L1}(t) + e_{L2}(t).
\end{aligned} \tag{6}$$

Отже, вираз (6) дає змогу розрахувати вхідний шумовий сигнал неінвертуючого підсилювача, який складається з вимірюваного сигналу  $e_{RX}(t)$  та шумової завади, зумовленої впливом шумової напруги ОП, вхідних шумових струмів ОП та шумами резисторів зворотного зв'язку і лінії зв'язку.

Шумова модель вхідного кола ШТ за схемою інвертуючого підсилювача (рис. 2, б) подана на рис. 7.

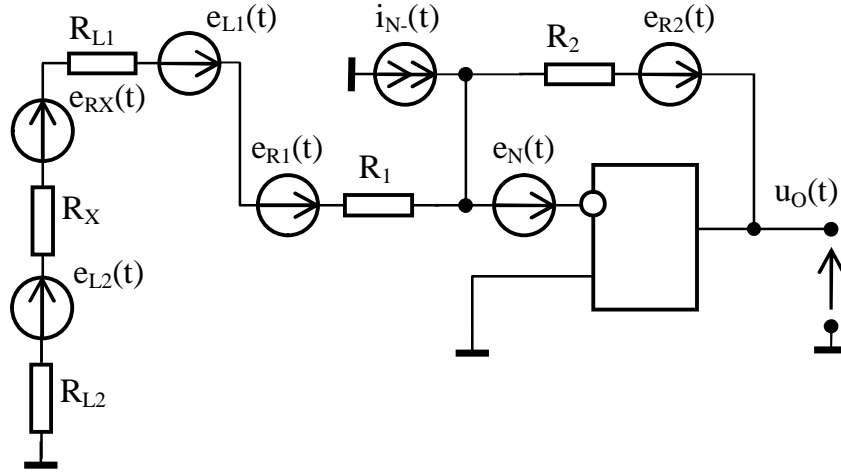


Рис. 7. Шумова модель вхідного кола ШТ за схемою інвертуючого підсилювача

Використавши попередню методику розрахунку, отримаємо вираз для вихідної напруги інвертуючого підсилювача  $u_O(t)$  за одночасної дії усіх шумових напруг у вхідному колі ШТ

$$\begin{aligned}
 u_O(t) = & -e_{RX}(t) \cdot \frac{R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_1} - e_N(t) \cdot \frac{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_2 + R_1}{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_1} - \\
 & -i_{N-}(t) \cdot R_2 + e_{R2}(t) - e_{R1}(t) \cdot \frac{R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_1} - \\
 & -e_{L1}(t) \cdot \frac{R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_1} - e_{L2}(t) \cdot \frac{R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_1}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Поділивши (7) на коефіцієнт підсилення для вимірюваного шумового сигналу  $e_{RX}(t)$  та ввівши позначення

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_2 + R_1}{R_2}, \\
 b_2 &= (R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_1), \\
 b_3 &= \frac{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_1}{R_2}
 \end{aligned} \quad (8)$$

дістанемо зведену до входу шумову напругу підсилювального каскаду

$$\begin{aligned}
 u_1(t) = & -e_{RX}(t) - b_1 \cdot e_N(t) - b_2 \cdot i_{N-}(t) + \\
 & + b_3 \cdot e_{R2}(t) - e_{R1}(t) - e_{L1}(t) - e_{L2}(t).
 \end{aligned} \quad (9)$$

Шумова модель вхідного кола ШТ за схемою інвертуючого підсилювача з ПП у колі зворотного зв'язку (рис. 2, в) подана на рис. 8.

Шумова напруга  $u_O(t)$  на виході каскаду підсилення дорівнюватиме:

$$\begin{aligned}
 u_O(t) = & -e_{RX}(t) \frac{R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2}} - e_N(t) \frac{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2}} - i_{N-}(t) \cdot R_2 + \\
 & + e_{R2}(t) - e_{L1}(t) \frac{R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2}} - e_{L2}(t) \frac{R_2}{R_X + R_{L1} + R_{L2}}.
 \end{aligned} \quad (10)$$

Ввівши позначення

$$c_1 = \frac{R_X + R_{L1} + R_{L2} + R_2}{R_2}, c_2 = R_X + R_{L1} + R_{L2}, c_3 = \frac{R_X + R_{L1} + R_{L2}}{R_2} \quad (11)$$

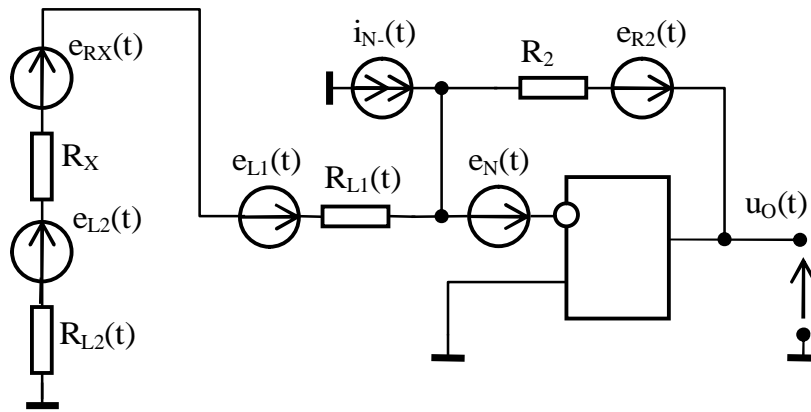


Рис. 8. Шумова модель інвертуючого підсилювача з ПП у колі зворотного зв'язку

та поділивши вираз (10) на коефіцієнт підсилення для вимірюваного шумового сигналу  $e_{RX}(t)$  зведемо усі шумові напруги до входу підсилювального каскаду

$$u_1(t) = -e_{RX}(t) - c_1 \cdot e_N(t) - c_2 \cdot i_{N-}(t) + c_3 \cdot e_{R2}(t) - e_{L1}(t) - e_{L2}(t). \quad (12)$$

**Висновок.** Розглянуто та синтезовано основні можливі варіанти схеми вхідного кола шумового термометра на основі одноканального підсилювача. Отримано шумові моделі, які описують залежність вихідної напруги першого каскаду підсилювача від корисного шумового сигналу та шумової завади, зумовленої впливом власних шумових напруг та струмів операційного підсилювача, шумами резисторів зворотного зв'язку та лінії зв'язку, а також приведені до входу сумарний шумовий сигнал для запропонованих схем вхідного кола шумового термометра. Шумові моделі можуть використовуватися для аналізу та розрахунку методичних похибок вимірювання термодинамічної температури шумовими методами для визначення найоптимальніших параметрів вхідного кола шумового термометра.

Надалі планується синтез шумових моделей вхідного кола шумових термометрів на основі двоканального (кореляційного) підсилювача.

1. Nyquist H. Thermal agitation of electric charge in conductors. // *Phys. Rev.*, 32. – 1928. – P.110–113. 2. Микитин І. П. Термошумовий термометр: Дис. канд. техн. наук: 05.11.04. – Львів, 2000. – 131 с. 3. Микитин І.П., Стадник Б.І. Методична похибка вимірювання шумовим термометром // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Автоматика, вимірювання та керування.* – 2001. – № 420. – С.102–104. 4. Микитин І.П., Стадник Б.І. Проблеми створення вторинної апаратури у шумовій термометрії // *Вимірювальна техніка та метрологія – За матеріалами 8-ї Міжнародної конференції “Температура – 2003”, 2003.* – № 64. С.99–105. 5. Микитин І.П., Стадник Б.І. Застосування одноканального та кореляційного підсилювачів для шумового термометра // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Автоматика, вимірювання та керування.* – 2002. – № 445. – С.51–54.