

якому лежить вимірне значення, з тією лише різницею, що імовірність і відповідно ступінь довіри задають залежно від завдань вимірювань.

Для завдань оцінювання ЯРП вірогідність оцінки залежить від багатьох факторів [5] і, відповідно, є визначуваною, а не заданою характеристикою, для якої теж необхідно встановлювати гранично допустиме значення. Причому не менш важливою, ніж сама КО. Можна припустити, що найкращий спосіб порівняти якість виробів – це знайти ймовірність, з якою кожний з них належить до певного умовного ЯР. В імовірнісні характеристики можна закласти і близькість до номінального значення, і ступінь розкиду випадкових відхилень ПЯ (групова та міжгрупова дисперсії), і врахування кваліметричних ризиків (ризик оцінювача та ризик виробника), і відтворюваність результатів оцінки [5, 8].

Важливими показниками, що характеризують якість КО, також є складові точності, з якою отримані результати вимірювання значень ПЯ, а саме правильність і відтворюваність результатів визначення ЯРП за окремим ПЯ. Низька відтворюваність або великий розкид значень ПЯ досліджуваних зразків можуть опосередковано самі свідчити про невисоку якість досліджуваного об'єкта.

1. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення. 2. Артемьев Б.Г. Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб. – М: Изд. стандартов, 1990. 3. ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-1:2005 Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення. 4. Бойко Т.Г., Бубела Т.З., Походило Є.В. Оцінювання вірогідності визначення показників якості продукції // Матеріали XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2006) м. Вінниця, 25–28 вересня 2006. – УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2007. – С. 158–161. 5. Бойко Т.Г., Бубела Т.З. Аналіз складових вірогідності результатів оцінювання якісного рівня продукції // Наукові праці (том 1) V Міжн. науково-технічної конференції Метрологія–2006. Харків 10–12 жовтня 2006. – С. 55–57. 6. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. – К: Техніка, 1981. 7. ДСТУ ISO/TR 8550:2004 Статистичний контроль. Настанови щодо вибору системи, схеми або плану вибіркового приймального контролю для окремих виробів у партіях (ISO/TR 8550:1994, IDT). 8. Бойко Т.Г., Бубела Т.З. Столярчук П.Г. Оцінювання якісного рівня як імовірнісна задача // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – № 16. – С. 73–76.

УДК 536.5

І.П. Микитин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

МЕТОДИЧНІ ПОХИБКИ ШУМОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ З РІЗНИМИ СТРУКТУРАМИ ВХІДНОГО КОЛА

© Микитин І.П., 2009

Проаналізовано моделі методичної похибки шумових термометрів за використання у вхідному колі одноканальних та двоканальних підсилювачів.

It was analyzed models of methodical error of noise thermometer at the use one - and two-channel strengtheners in the input circle.

Постановка проблеми. У шумовій термометрії вимірюваним сигналом є середнє значення

квадрата шумової напруги (випадкового процесу) [1], пропорційне до термодинамічної температури первинного перетворювача (ПП). Тому істинне значення температури можна отримати лише за нескінченного часу усереднення. Реально вимірювання обмежене у часі, внаслідок чого виникає методична похибка. Дослідження, виконані в [2], показали, що при аналізі методичних похибок можна обмежитися лише шумовими сигналами, які виникають у вхідному колі шумового термометра (ШТ) та у першому каскаді підсилення.

У статті розглянуто математичні моделі методичної похибки ШТ для можливих варіантів вхідного кола ШТ на основі одноканального та двоканального підсилювачів з урахуванням шумових параметрів чутливого елемента ПП, операційного підсилювача, резисторів зворотного зв'язку першого каскаду підсилювача, лінії зв'язку.

Математичні моделі методичної похибки шумових термометрів. Розглянувши можливі варіанти побудови вхідного кола ШТ на основі одноканального та двоканального підсилювачів, синтезовано структурні схеми (рис. 1), які можуть використовуватися для проектування ШТ.

Використавши методику розрахунку кореляційної функції на виході вимірювального кола [3], отримано вирази математичного сподівання та дисперсії залежно від спектральних густин шумових сигналів у вхідному колі ШТ, які можна записати у вигляді математичного сподівання квадрата вимірюваного сигналу $M(e_{RX}^2)$ та декількох сум математичних сподівань та дисперсій складових шумової завади

$$M(e_{RX}^2) = S_{RX} \Delta f \quad M_S = \sum_{i=1}^7 a_i^4 S_i^2 \Delta f^2$$

$$D_{S1} = 2 \sum_{i=0}^7 a_i^4 S_i^2 \Delta f / \Theta \quad D_{S2} = \sum_{i=0}^7 \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^7 a_i^2 S_i a_j^2 S_j \Delta f / \Theta$$
(1)

де M_S – сума квадратів математичних сподівань складових шумової завади; D_{S1} – сума дисперсій складових вхідного сигналу, які множаться самі на себе; D_{S2} – сума дисперсій складових вхідного сигналу, для яких індекси $i \neq j$, S_i, S_j – i - та або j - та спектральна густина складових вхідного сигналу; a_i, a_j – коефіцієнти пропорційності; Δf – робоча частотна смуга; Θ – час усереднення.

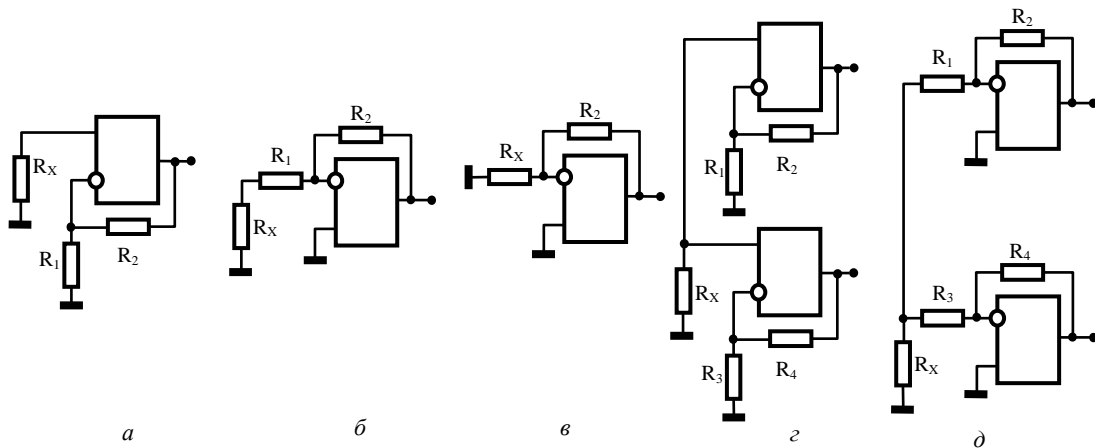


Рис. 1. Структурні схеми вхідного кола ШТ: а – неінвертуючий підсилювач; б – інвертуючий підсилювач; в – інвертуючий підсилювач з первинним перетворювачем у колі зворотного зв'язку; з – неінвертуючий кореляційний підсилювач; д – інвертуючий кореляційний підсилювач

Відносне стандартне відхилення методичної похибки σ запишеться як

$$\sigma = \frac{\sqrt{D_{S1} + D_{S2}}}{M(e_{RX}^2)},$$
(2)

а відносний середній квадрат методичної похибки ε дорівнює

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{M_s + D_{S1} + D_{S2}}}{M(e_{RX}^2)} \quad (3)$$

Аналіз методичних похибок виконано з використанням у вхідному колі операційних підсилювачів (ОП), найкращих за значенням шумового струму (MAX4475 фірми Maxim Dallas) та напруги (LT1028 фірми Linear Technology). На рис.2 подано результати розрахунку відносного середнього квадрата методичної похибки ШТ ε_{NIP} неінвертуючого підсилювача, ε_{IP} інвертуючого підсилювача, ε_{IPR_x} інвертуючого підсилювача з ПП у колі зворотного зв'язку, ε_{IKP} інвертуючого кореляційного підсилювача та ε_{NIKP} неінвертуючого кореляційного підсилювача залежно від часу усереднення та значення опору ПП для ОП MAX4475, а на рис.3 – для ОП LT1028.

Для неінвертуючого, інвертуючого та інвертуючого підсилювача з ПП у колі зворотного зв'язку методична похибка має однакову функціональну залежність та приблизно однакові значення. Це зумовлено передовсім тим, що вплив на результат вимірювання усіх складових повного шумового сигналу, приведеного до входу, не зменшується ні зі збільшенням часу усереднення, ні зі збільшенням робочої частотної смуги ШТ. Для цих підсилювачів зменшення опору ПП призводить до збільшення методичної похибки.

Крім того, потрібно зазначити, що оскільки значення опору ПП входить до коефіцієнта підсилення інвертуючого та інвертуючого підсилювача з ПП у колі зворотного зв'язку, то не вдається зменшувати значення опору резисторів зворотного зв'язку (резистор R_2 на рис.1, б, в). Збільшення опору ПП приводить до збільшення опору R_2 для забезпечення однакового коефіцієнта підсилення.

Навпаки, для неінвертуючого підсилювача опір ПП не впливає на коефіцієнт підсилення. Тому до певної межі можна зменшувати значення резисторів R_1, R_2 (рис. 1, а) і тим самим зменшувати вплив на результат вимірювання шумових напруг резисторів зворотного зв'язку підсилювача. Границя зменшення опорів обмежується максимальним вихідним струмом ОП.

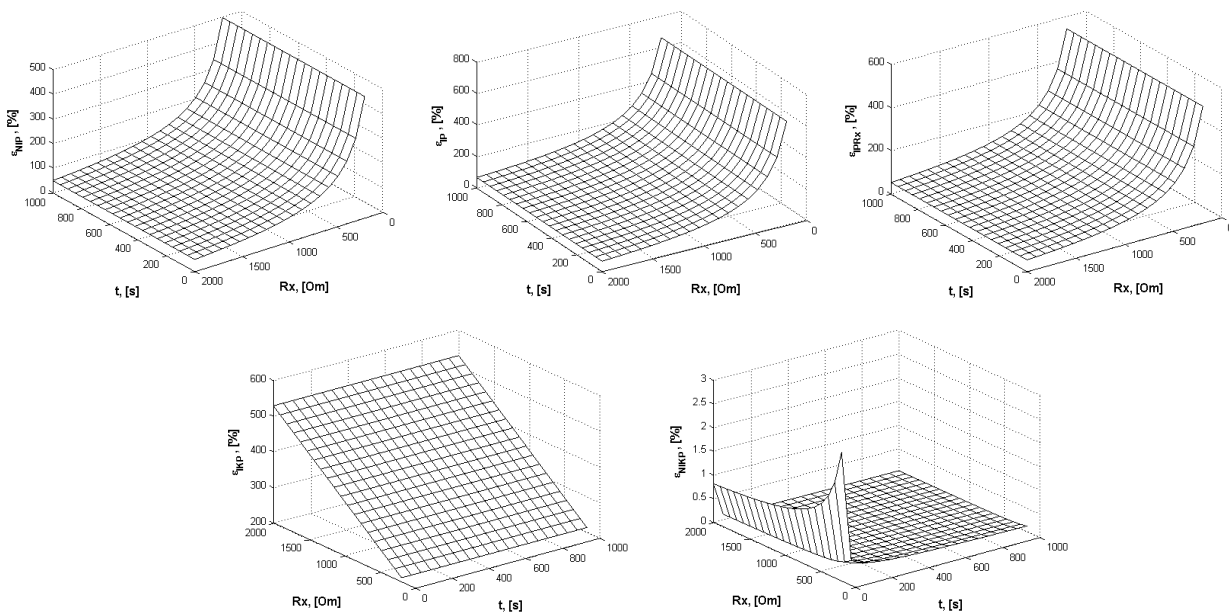


Рис. 2. Залежність відносного середнього квадрата методичної похибки від часу усереднення та опору ПП для ОП MAX4475

Найкращі результати отримано для неінвертуючого кореляційного підсилювача. Відносно решти досліджуваних схем вхідного кола методична похибка за використання неінвертуючого кореляційного підсилювача в сотні разів менша (рис. 2). Для діапазону досліджуваних значень опору первинного перетворювача середній квадрат методичної похибки неінвертуючого

кореляційного підсилювача не перевищує 0.13 %, тоді як для решти схем практично не стає меншим за 50 %. Отже, при використанні операційних підсилювачів типу MAX4475 з малим значенням шумового струму оптимальним варіантом вхідного кола ШТ є неінвертуючий кореляційний підсилювач.

Для операційного підсилювача LT1028 методична похибка для неінвертуючого (рис. 3) та інвертуючого підсилювача з ПП у колі зворотного зв'язку має чітко виражений мінімум за певного значення опору ПП. Наявність мінімуму зумовлена впливом, з одного боку, шумових напруг у вхідному колі ШТ, а з іншого боку – проходженням через ПП вхідних шумових струмів ОП. Вплив цих двох складових по-різному проявляється при збільшенні опору чутливого елемента ПП. Для збільшення відношення «шумовий сигнал – шумова завада» потрібно збільшувати значення опору ПП. Причому чим більше значення корисного сигналу (а воно однозначно визначається опором ПП), тим більше відношення «шумовий сигнал – шумова завада». Проте, з іншого боку, збільшення опору ПП призводить до збільшення шумових складових, які зумовлені проходженням шумового струму ОП через ПП. Тому існує певне значення опору ПП, для якого маємо оптимально мінімізований вплив одночасної дії шумових напруг та шумових струмів вхідного кола ШТ.

Потрібно зазначити, що оптимальне значення опору ПП є для кожної схеми розглянутих вхідних кіл ШТ. Залежно від параметрів та типу вхідного кола оптимум може міститися у області низьких чи високих значень опору ПП. Переважає дія типу використовуваних ОП у вхідному підсилювальному каскаді. Використання ОП з низькими значеннями вхідного шумового струму та порівняно великими значеннями шумової напруги (типу MAX4475) зсуває оптимум в область високих значень опору (десятки – сотні кілоом). Застосування ж ОП з порівняно високими значеннями вхідного шумового струму та порівняно низькими значеннями шумової напруги (типу LT1028) зсуває оптимум у область малих значень опору (десятки ом – одиниці кілоом). Оптимальне значення опору ПП, звичайно ж, залежить і від шумових параметрів лінії зв'язку та резисторів зворотного зв'язку першого каскаду підсилення. Шумові напруги цих складових вхідного кола впливають на оптимальне значення опору ПП подібно до приведеної до входу шумової напруги ОП.

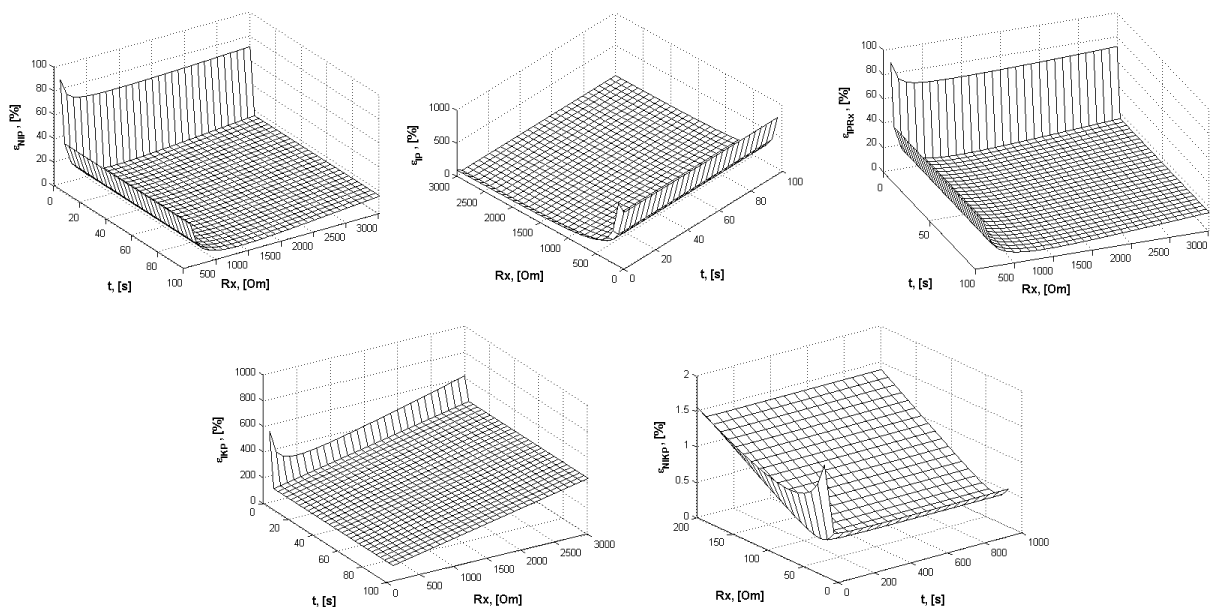


Рис. 3. Залежність відносного середнього квадрата методичної похибки від часу усереднення та опору ПП для ОП LT1028

Для інвертуючого кореляційного підсилювача методична похибка має практично лінійну залежність від опору ПП та зі зростанням опору ПП збільшується. Функціональна залежність практично не відрізняється від графіка, отриманого для ОП МАХ4475.

Для неінвертуючого кореляційного підсилювача істотно зростає методична похибка $\varepsilon_{НИКР}$, що пов'язано зі збільшенням значення шумового струму ОП LT1028 відносно ОП МАХ4475. У цьому випадку домінує вплив нешумових напруг елементів вхідного кола, а шумового струму ОП, який, проходячи через ПП, створює спад напруги, який переважає за рівнем решту складових повного шумового сигналу. Мінімум методичної похибки зміщується у область нижчих значень опору ПП.

Висновок. У статті розглянуто моделі методичної похибки шумового термометра за використання у вхідному колі одноканального та двоканального підсилювачів. Для кожної із досліджуваних схем спостерігається мінімум методичної похибки, зумовлений впливом, з одного боку, шумових напруг у вхідному колі ШТ, а з іншого боку – проходженням через ПП вхідних шумових струмів ОП. Вплив цих двох складових по-різному проявляється при зміні опору чутливого елемента ПП. Для збільшення відношення «шумовий сигнал – шумова завада» потрібно збільшувати значення опору ПП. Проте, з іншого боку, збільшення опору ПП приводить до зростання значення шумових складових, які зумовлені проходженням шумового струму ОП через ПП. Тому існує певне значення опору ПП, для якого маємо оптимально мінімізований вплив одночасної дії шумових напруг та шумових струмів вхідного кола ШТ. Залежно від параметрів та типу вхідного кола оптимум може міститися у області низьких чи високих значень опору ПП. Переважаючу дію має тип використовуваних ОП у вхідному підсилювальному каскаді. Використання ОП з низькими значеннями вхідного шумового струму та порівняно великими значеннями шумової напруги (типу МАХ4475) зсуває оптимум у область високих значень опору (десятки – сотні кілоом). Застосування ж ОП з порівняно високими значеннями вхідного шумового струму та порівняно низькими значеннями шумової напруги (типу LT1028) зсуває оптимум у область малих значень опору (десятки ом – одиниці кілоом).

Виконані дослідження показали, що для операційних підсилювачів типу МАХ4475 та LT1028 найменші методичні похибки отримано за використання неінвертуючого кореляційного підсилювача у вхідному колі шумового термометра.

1. Nyquist H. *Thermal agitation of electric charge in conductors* // *Phys. Rev.*, 32. – 1928. – P.110–113. 2. 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. 3. Микитин І.П., Стадник Б.І., Дорожовець М.М. *Математична модель шумового термометра на основі кореляційного підсилювача* // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2000. – № 57. – С.63–66.