

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ ВИСОКООМНИХ ОБ'ЄКТІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СТРУКТУРНО- НАДЛИШКОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ

М. А. Зенкін

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: nikolay_zenkin@ukr.net

О. В. Іванченко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: kmcc@knutd.com.ua

В. М. Карпенко*

E-mail: v.karpenko@meta.ua

*Кафедра мерології, стандартизації і сертифікації
Київський національний університет технологій та
дизайну

вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, Україна, 01011

У статті представлено пристрій для вимірювання опорів високоомних об'єктів, в якому шляхом введення нових елементів і зв'язків забезпечуються виключення впливу температури об'єкта, що досліджується, а також нестабільності характеристик елементів схеми на результат вимірювання. Це дає можливість підвищити точність вимірювання опорів високоомних об'єктів

Ключові слова: високоомний об'єкт, тепловий шум, дисперсія теплової напруги, структурно-надлишковий метод вимірювання, точність вимірювання

В статье представлено устройство для измерения сопротивлений высокоомных объектов, в котором путем введения новых элементов и связей обеспечиваются исключения влияния температуры исследуемого объекта, а также нестабильности характеристик элементов схемы на результат измерения. Это дает возможность повысить точность измерения сопротивлений высокоомных объектов

Ключевые слова: высокоомный объект, тепловой шум, дисперсия теплового напряжения, структурно-избыточный метод измерения, точность измерения

1. Вступ

Проблема підвищення точності вимірювання на сьогодні постає все гостріше. Значну долю сумарної похибки результатів вимірювання складає власна похибка засобів вимірювання, що застосовуються. Звідси випливає і актуальність розробки методів для підвищення точності, які пов'язані з розширенням області вимірювань, підвищення вимог до точності результатів вимірювання і умов експлуатації засобів вимірювання. Це стало поштовхом до розгортання численних досліджень і розробки нових принципів побудови вимірювальних систем і засобів підвищення їхньої точності.

Сформувався два самостійних напрямки досліджень, націлених на підвищення точності результатів вимірів при жорстких і змінюваних умовах експлуатації засобів вимірів [1]. Перший напрямок пов'язаний з вивченням і вдосконаленням методів вимірів з метою врахування і виключення можливих методичних похибок вимірів. Другий - з розробкою нових принципів побудови вимірювальних систем, адекватних відзначеним вище вимогам.

Для зниження рівня існуючих похибок засобів вимірів розроблені і широко застосовуються структурні або адаптивні методи [2]. Вони забезпечують високу точність засобів вимірів без застосування точних елементів і високоякісних матеріалів або, вірніше, при

мінімальному їхньому використанні. Суть структурних методів полягає в раціональній побудові структурних вимірювальної системи, що забезпечує зменшення впливу похибок окремих структурних ланок на вихідний сигнал; введенні корегуючих ланок, каналів обробки інформації і впливаючих величин; введенні мікропроцесорів для обробки сигналів і виключення похибок; примусовій зміні структури, параметрів і зв'язків та ін. [2].

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Було проведено аналіз існуючих пристроїв для вимірювання опорів високоомних об'єктів і встановлено ряд проблем, що впливають на точність вимірювання.

У вимірювачі опорів високоомних об'єктів [3] через накладення власних шумів підсилювача на теплові шуми об'єкта, що досліджується, неможливо досить точно виміряти опір. Операції вимірювача не дозволяють розділити шуми об'єкта і власні шуми підсилювача, а також усунути вплив останніх на результат вимірювання.

У термошумовому вимірювачі опорів високоомних об'єктів [4] усувається вплив власних шумів підсилювача на результат вимірювання теплових шумів об'єкта, що представлений у вигляді постійної напруги. Але значення цієї напруги визначає не лише рівень тепло-

вих шумів об'єкта, що досліджується, а також і значення температури, яка може змінюватися в широких межах. Крім того, вимірювана постійна напруга залежить від смуги частот теплового шуму, що вимірюється, що постійну напругу важко стабілізувати при дії дестабілізуючих факторів. Велике підсилення, яке потрібне при вимірюванні шумової напруги, також нестабільне і вносить значну похибку у вимірюваний опір, а це не забезпечує необхідної точності вимірювання.

У пристрої для вимірювання опорів високоомних об'єктів [5] міститься автоматичний перемикач, що керується від мікроконтролера, АЦП, підключений до виходу квадратичного детектора, інвертор, що шунтується ключем, і зразковий резистор, який повинен бути в тепловому контакті з об'єктом, що досліджується. Це призводить до необхідності в зразковому високоомному резисторі, опір якого повинен бути близьким до опору об'єкта. Інакше при автоматичному перемиканні зразкового резистора на об'єкт, що досліджується, виникає похибка при зміні рівнів шумових напруг на порівнюваних опорах від шумового струму диференціального підсилювача. Крім того, на практиці важко виконати умову теплового контакту зразкового резистора з об'єктом, а відповідно забезпечити рівність температур зразкового резистора і об'єкта, що досліджується. Це викликає велику температурну похибку.

Відомий також пристрій для вимірювання опорів високоомних об'єктів [6], в якому напруга теплових шумів об'єкта, що досліджується, поступає на входи диференціального підсилювача безпосередньо на інвертор, що комутується. Вольтметр вимірює дисперсію (середній квадрат) шумової напруги, яка пропорційна опору об'єкта, що досліджується, а шкала вольтметра проградуєрована безпосередньо в одиницях опору. Але в цьому пристрої присутня залежність результату вимірювання вольтметром від параметрів перетворювального ланцюга вимірювальної схеми та температури об'єкта, що досліджується, не забезпечуючи точного результату вимірювання.

3. Постановка завдання

Завдання нашого дослідження – провести порівняльний аналіз відомих пристроїв для вимірювання опорів різноманітних високоомних об'єктів. Шляхом використання методів емпіричного та теоретичного дослідження визначити пристрій, що має найвищу точність вимірювання.

4. Результати дослідження

Пристрій для вимірювання опору високоомних об'єктів [7] дає вищу точність вимірювання, завдяки реалізації в ньому структурно-надлишкового методу вимірювання порівняно з пристроєм [6], в якому використовується термшумовий спосіб вимірювання.

На рис. 1 представлена функціональна схема пристрою, що дозволяє реалізувати структурно-надлишковий метод вимірювання.

Пристрій містить вхідні клеми 1 і 2. Клема 2 з'єднана через послідовно з'єднані постійні резистори 3 і 4 зі входом магазину резисторів 5, який своїм виходом

з'єднаний з клемою 1. Постійні резистори 3 і 4 періодично шунтуються автоматичним ключем 6. Середня точка з'єднання постійних резисторів 3 і 4 з'єднана з одним із входів диференціального підсилювача 7, другий вхід якого з'єднаний зі вхідною клемою 1 пристрою. До виходу диференціального підсилювача 7 підключені з'єднані послідовно смуговий фільтр 8, підсилювач 9 високої частоти і квадратичний детектор 10. Вихід квадратичного детектора 10 з'єднаний через інтегратор 11 і вибіркового підсилювача 12 низької частоти із входом синхронного детектора 13. Керуючий вхід синхронного детектора 13 з'єднаний з виходом генератора 14 низької частоти. До виходу синхронного детектора 13 підключений через фільтр 15 нижніх частот індикатор 16. Керуючий вхід автоматичного ключа 6 з'єднаний також з виходом генератора 14 низької частоти. Позицією 17 позначений високоомний об'єкт, що досліджується.

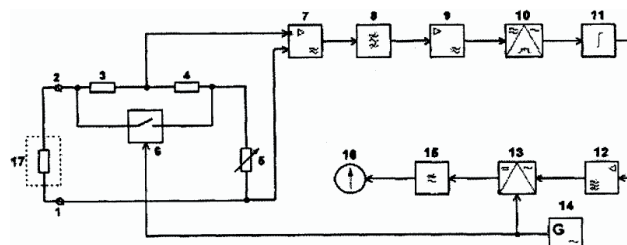


Рис. 1. Функціональна схема пристрою для вимірювання опорів високоомних об'єктів із використанням структурного методу

Для пристрою на рис. 1 значення невідомого опору визначається з виразу [7]

$$R_x = R_1 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3},$$

де R_2, R_3, R_4 – опори відповідно постійних резисторів 3, 4, і магазину опорів 5,

$R_1 = R_x$ – внутрішній опір джерела термоЕРС.

На рис. 2 представлена вимірювальна схема, за допомогою якої реалізується термшумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів.

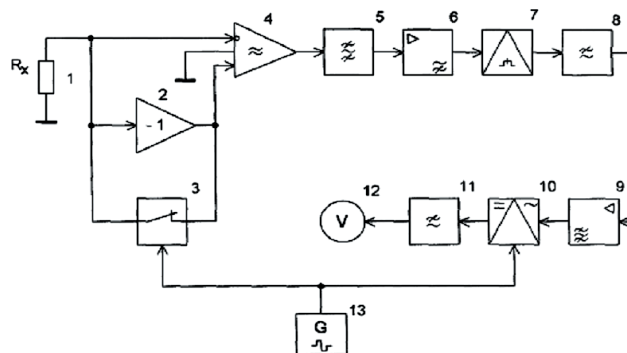


Рис. 2. Вимірювальна схема термшумового пристрою для вимірювання опорів високоомних об'єктів

Позицією 1 позначено досліджуваний високоомний об'єкт з опором R_x . В вимірювальну схему входять інвертор 2, що шунтується за допомогою автоматично-

го ключа 3, диференціальний підсилювач 4, до виходу якого підключені послідовно з'єднані смуговий фільтр 5, підсилювач високої частоти 6, квадратичний детектор 7, фільтр нижніх частот 8, вибіркового підсилювач низької частоти 9, синхронний детектор 10, другий фільтр нижніх частот 11 і вольтметр 12. Позицією 13 позначено мультівібратор, який з'єднано з керуючим входом автоматичного ключа 3 і керуючим входом синхронного детектора 10.

Для пристрою рис. 2 значення невідомого опору визначається з виразу

$$U = S_0 \cdot R_x$$

$$S_0 = \frac{64}{\pi} k k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 k_5 S_1 S_2 T \Delta f$$

де S_0 – результуюча крутизна перетворення опору в напругу [В/Ом],

k – стала Больцмана,

k_1 – коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача,

k_2 – коефіцієнт підсилення підсилювача високої частоти,

k_3 – коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот,

k_4 – коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача,

k_5 – коефіцієнт передачі другого фільтра нижніх частот,

S_1 – крутизна квадратичного детектування,

S_2 – крутизна перетворення синхронного детектора,

T – термодинамічна температура об'єкта шуму,

Δf – смуги частот, що задаються смуговим фільтром 5.

Проведемо розрахунок похибки вимірювання для двох пристроїв.

Для першого пристрою представимо досліджуванний опір, як функцію кількох змінних $R_x = f(R_2, R_3, R_4)$.

$$f(R_2, R_3, R_4) = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4$$

Оскільки функція $f(R_2, R_3, R_4)$ являє собою добуток функцій від змінних, знайдемо випадкову складову похибки за відомою формулою.

$$\Delta f = \frac{R_2}{R_3} R_4 \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial R_2} \ln\left(\frac{R_2}{R_3} R_4\right) \cdot \Delta R_2\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial R_3} \ln\left(\frac{R_2}{R_3} R_4\right) \cdot \Delta R_3\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial R_4} \ln\left(\frac{R_2}{R_3} R_4\right) \cdot \Delta R_4\right)^2}$$

Прийmemo співвідношення опорів

$$\frac{R_2}{R_3} \cdot R_4 = 1 \times 10^9 \text{ Ом,}$$

$$a \ R_2 = 100000 \text{ Ом,}$$

$$R_3 = 10 \text{ Ом, } R_4 = 100000 \text{ Ом.}$$

Також враховуємо, що для широкоживаних резисторів С2-23 [8], що використовуються в нашому пристрої, відхилення опорів від нормального значення для типу В не перевищує 1%. Тому можна вважати, що $\Delta R_2 = 0,01 R_2$ Ом, $\Delta R_3 = 0,01 R_3$ Ом, $\Delta R_4 = 0,01 R_4$ Ом.

Розрахунок величини Δf проводимо для окремого випадку набору резисторів R_2, R_3, R_4 . Для порівняння

похибок приладів зручно використовувати відносну похибку, яка для нашого випадку становить $\gamma_1 = 1,7\%$.

Для другого пристрою шуканий опір виражається функцією

$$g(U, k, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, S_1, S_2, T, \Delta f) =$$

$$= \frac{\pi U}{(64 k k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 S_1 S_2 T \Delta f)}$$

Аналогічно з попереднім аналізом розраховуємо похибку. Попередньо прийmemo до уваги наступне.

Для диференціального підсилювача AD8130ARZ [9], що використовується в даному пристрої, при коефіцієнті підсилення 50 і використанні резисторів С2-23 типу В маємо

$$k_1(R_1, R_2) = \frac{R_1}{R_2}$$

Вважаємо джерелом похибки відхилення від номінального значення резисторів диференціального підсилювача, тобто для типових значень резисторів $R_1 = 100000$ і $R_2 = 2000$ $\delta R_1 = 0,01 R_1$, $\delta R_2 = 0,01 R_2$ відповідно.

$$\delta k_1 = k_1(R_1, R_2) \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial R_1} \ln(k_1(R_1, R_2)) \cdot \delta R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial R_2} \ln(k_1(R_1, R_2)) \cdot \delta R_2\right)^2} = 0,707$$

Для підсилювача високої частоти AN7148, нормована нестабільність коефіцієнта перетворення 0,25% (максимальна 0,75%). Тому для нормального значення коефіцієнта підсилення маємо записати $k_2 = 44,5$

$$\delta k_2 = \frac{0,25 \cdot k_2}{100} = 0,111$$

Коефіцієнт передачі активного фільтра нижніх частот, як правило, близькі до одиниці, а його нестабільність для фільтра Батерворта 5-го порядку виконаного [10] на мікросхемі К284УЭ1 [11] нормована на рівні 0,25%, тобто для $k_3 = 0,98$

$$\delta k_3 = \frac{0,25 \cdot k_3}{100} = 2,45 \times 10^{-3}$$

Для селективного підсилювача оптимальним вважаємо коефіцієнт підсилення $k_4 = 2,5$, бо потрібно мати досить широку полосу пропускання і одночасно задовільну селективність, а тому похибку для нього визначаємо як

$$\delta k_4 = k_4(R_{11}, R_{22}) \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial R_{11}} \ln(k_4(R_{11}, R_{22})) \cdot \delta R_{11}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial R_{22}} \ln(k_4(R_{11}, R_{22})) \cdot \delta R_{22}\right)^2} = 0,035,$$

$$\text{де } k_4(R_{11}, R_{22}) = \frac{R_{11}}{2R_{22}};$$

$$R_{11} = 25000 \text{ Ом і } R_{22} = 5000 \text{ Ом,}$$

$$\delta R_{11} = 0,01 R_{11} \text{ Ом, } \delta R_{22} = 0,01 R_{22} \text{ Ом.}$$

$$\text{Тобто для } k_4 = 2,5 \text{ отримаємо } \delta k_4 = 5 \times 10^{-4}.$$

Для визначення похибки від зміни крутизни квадратичного детектування звернемо увагу на той факт, що для вимірювання середньоквадратичного значен-

ня напруги складної форми застосовують квадратичні детектори з параболічною характеристикою без лінійного члена. Тому для крутизни вхідної вольт-амперної характеристики транзистора КТЗ15Б [8] можна записати значення максимальної напруги 0,3 В. Тоді:

$$S_1(\Delta I_6, \Delta U_{63}) = \frac{\Delta I_6}{\Delta U_{63}}$$

Враховуючи, що $\Delta I_6 = 0,17$ А, $\Delta U_{63} = 0,3$ В і $\delta \Delta I_6 = 0,00 \Delta I_6$ А, $\delta \Delta U_{63} = 0,01 \Delta U_{63}$ В відповідно, а її нестабільність визначається параметрами елементів R_3 та R_4 і може бути обчислена

$$\delta S_1 = S_1(\Delta I_6, \Delta U_3) \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial \Delta I_6} \ln(S_1(\Delta I_6, \Delta U_{63})) \cdot \delta \Delta I_6\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \Delta U_{63}} \ln(S_1(\Delta I_6, \Delta U_{63})) \cdot \delta \Delta U_{63}\right)^2} = 5,667 \cdot 10^{-3} \text{ В/Ом}$$

$$S_1 = S_1(\Delta I_6, \Delta U_{63}) = 0,567 \text{ В/Ом.}$$

Для визначення похибки від зміни крутизни синхронного детектування враховуємо, що нестабільність крутизни передачі коливається в межах 1%. При значенні коефіцієнта передачі близько 3, цю складову можна визначити так

$$\delta S_2 = 3 \cdot 0,01 = 0,03, \text{ В/Ом,}$$

$$\text{а } S_2 = 3 \text{ В/Ом.}$$

Точність вимірювання температури термометрами опору відома і становить 0,1К. $T = 300\text{К}$, $\Delta T = 0,1\text{К}$.

Точність вимірювання напруги визначається величиною молодшого розряду АЦП. Тобто для 12-ти розрядного АЦП для діапазону напруги від 0 В до 5 В маємо похибку

$$\delta U = \frac{5}{2^{12}} = 1,221 \times 10^{-3} \text{ В.}$$

Вибираємо полосу частот типову для теплового шуму $\Delta f = 20$ МГц відмінною від дробових і фліккер-шумів в діапазоні вище 100 кГц.

Вважаючи стабільність генератора на рівні 1% можемо записати для остаточної похибки другого пристрою

$$\Delta g = g \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial U} \lg(g) \cdot \delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial k_1} \lg(g) \cdot \delta k_1\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial k_2} \lg(g) \cdot \delta k_2\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial k_3} \lg(g) \cdot \delta k_3\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial k_4} \lg(g) \cdot \delta k_4\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial k_5} \lg(g) \cdot \delta k_5\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial S_1} \lg(g) \cdot \delta S_1\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial S_2} \lg(g) \cdot \delta S_2\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial T} \lg(g) \cdot \delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \Delta f} \lg(g) \cdot \delta \Delta f\right)^2}$$

$$\Delta g = 8,747 \times 10^6 \text{ Ом,}$$

$$g = g(U, k, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, S_1, S_2, T, \Delta f) = 3,262 \times 10^8 \text{ Ом,}$$

Тоді відносна похибка складає $\gamma_2 = \Delta g/g = 2,681\%$.

5. Висновки

Із отриманих розрахунків видно, що використання структурного методу вимірювань для пристрою за [7]

дає значно меншу похибку вимірювання. В першу чергу це пов'язано з тим, що на результат вимірювання першого пристрою не впливають нестабільність параметрів вимірювальної схеми ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, S_1, S_2$), рівень власних шумів магазину опорів. Усунення впливу вказаних факторів дозволяє досягнути високої точності вимірювання порівняно з другим пристроєм, а похибку вимірювання знизити до теоретичного рівня 1,7% при вимірюванні опорів високоомних об'єктів в діапазоні до 1000М Ом.

Література

1. Зори, А.А. Методы и средства повышения точности электронных измерительных систем [Текст] : Монография / А.А.Зори, В.Д. Корнев, М.Г. Хламов. Донецк: ДонНТУ, 2004.-140 с.
2. Грибанов Ю.И. Измерения в высокоомных цепях [Текст] / Ю.И. Грибачов – М.: Энергия, 1967. – 126с.
3. Скрипник Ю.О., Курко В.Р., Скрипник В.Й. Шумова кондуктометрия // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини [Текст]. Збірник наукових праць. – 2002. – вип. 12. – С. 109 – 112.
4. Каламеєць Т.П. Аналіз вимірювання опорів високоомних об'єктів [Текст] / Т.П. Каламеєць // Вісник КНУТД. – 2005. – №5. – С. 18 – 20.
5. Скрипник Ю.О., Термощумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів [Текст] / Ю.О. Скрипник, Т.П. Каламеєць // Автоматика та інформаційно вимірювальна техніка. – Хмельницький, 2005. – №1. – С.88-91.
6. Термощумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів [Текст]: пат. 14264 Україна: МПК G1R 27 / 00 / Скрипник Ю.О., Іванченко О.В., Наконечний М.П., Каламеєць Т.П.; заявник та власник патенту Київський національний університет технологій та дизайну. – № u2005-09841; заявл. 19.10.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл.№5.-1-8с.
7. Пристрій для вимірювання опорів високоомних об'єктів [Текст]: пат. 24640 Україна: МПК G1R 27 / 00 / Скрипник Ю.О., Іванченко О.В., Наконечний М.П., Каламеєць Т.П.; заявник та власник патенту Київський національний університет технологій та дизайну. – № u200701624; заявл. 16.02.2007; опубл. 10.07.2007, Бюл.№10.-1-8с.
8. Б.Х. Кривицкий Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники [Текст] / Б.Х. Кривицкий – М.: Энергия, 1977.-115с.
9. Low Level Measurements Handbook – Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurements, 6th Ed. KEITHLEY Instruments, Inc., USA 2004.
10. Arthur Bernard Williams, Fred J. Taylor. Electronic filter design handbook [Текст] /Paramus, NJ: Prentice-Hall, 1990. – 120 с.
11. A. V. Oppenheim, R. W. Schafer Digital Signal Processing [Текст] / Paramus, NJ: Prentice-Hall, 1975. – 45с.