

УДК 621.317

**ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ ШУМІВ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ АКТИВНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ**

В.Ю. Санніков

Київський національний університет технологій та дизайну

Розглянуто спосіб визначення активного опору речовин та матеріалів за значенням теплового шуму з виключенням впливу власних корельованих шумів елементів вимірювальної схеми на вимірювальну величину, що дозволяє підвищити точність виміру активного опору і розширити діапазон його виміру.

Ключові слова: тепловий шум, шумовий сигнал, дисперсія, активний опір, підсилювач, перемножувач

Одним з сучасних методів виміру активного опору речовин та матеріалів є використання теплових шумів. Тепловий шум або теплові електричні флуктуації – як наслідок теплового хаотичного руху носіїв струму, що знаходяться в тепловій рівновазі з молекулами речовини об'єкту. Такими носіями струму є вільні електрони, іони та дірки в напівпровідникових матеріалах. В загальному випадку тепловий шум обумовлений появою термозбуджених поляризованих молекул, що утворюють елементарні флюктуючі диполі [1].

Взагалі, шуми в електронних схемах розглядаються як заважаючі фактори. Але якщо в будь-якому фізичному або біологічному об'єкті, що знаходиться в тепловій рівновазі і який має активні втрати електричної енергії, присутні теплові шуми, то такий шум може бути інформаційним щодо опору або температури об'єкта. Складність вимірювання полягає в тому, щоб виділити інформативну складову теплового шуму об'єкту, що вимірюється на фоні шумів вимірювальної схеми, як теплового, так і шумів інших типів: дробових, фліккер-шумів, шумів генерації-рекомбінації, тощо [2].

В існуючих схемах визначення активного опору речовин та матеріалів [3, 4] запропоновані методи видалення впливу шумів різного типу та теплових шумів вимірювальної схеми. Однак вважається, що всі шуми вимірювальних елементів є некорельованими. В роботах [5, 6] запропоновано підхід для побудови вимірювальної схеми дисперсії шумових сигналів з врахуванням можливості появи у вимірювальному тракті корельованих теплових шумів її елементів. Але на значення теплового шуму впливають температура та активний опір об'єкту.

Постановка завдання

Основною задачею дослідження є повне виключення впливу власних корельованих і некорельованих шумів як активних, так і пасивних елементів вимірювальної схеми, що забезпечить підвищення точності виміру активного електричного опору матеріалів за дисперсією низькоінтенсивних шумових сигналів. Вирішення поставленої задачі підвищення точності виміру активного електричного опору за значенням дисперсії шумових сигналів дозволить створити теоретичний апарат реалізації шумових вимірювачів електричного опору, як електропровідних так і діелектричних матеріалів.

Об'єкти та методи досліджень

Об'єктом дослідження є методи вимірювання дисперсії шумових сигналів, що використовуються в електронних приладах оцінки електричного опору матеріалів. Основним методом дослідження є теорія виміру шумів, аналіз та синтез електронних схем.

Результати досліджень та їх обговорення

В основу запропонованого методу покладено алгоритми перетворення і виокремлення інформаційних шумових сигналів на фоні власних шумів елементів вимірювальних схем. Основна увага приділялась комутаційно-модуляційному алгоритму на основі структурно-часової надлишковості і одноканальності перетворень [7].

На рисунку приведена електрична функціональна схема шумового вимірювача активного опору речовин.

Шумовий вимірювач активного опору речовин працює наступним чином.

Під дією вимірюваної температури в первинному резистивному перетворювачі 1 виникає тепловий шум дисперсія якого, згідно формули Найквіста [8], має вигляд

$$\overline{U_x^2} = 4k\Delta fRT \quad (1)$$

де k – постійна Больцмана; Δf – смуга частот, в якій відбувається виділення теплових шумів; R – опір первинного резистивного перетворювача; T – термодинамічна температура первинного перетворювача.

Шумова напруга (1) через розділяючі конденсатори 4 і 5 поступає через автоматичні перемикачі 6 і 7 на входи диференціального підсилювача 8. Одночасно шумова напруга (1) безпосередньо впливає на входи диференціального підсилювача 9. Ємність розділяючих конденсаторів 4 і 5 вибирають з умови придушення низькочастотного шуму первинного резистивного перетворювача 1 (флікер-шуму),

який не несе інформації про активний електричний опір резистивного перетворювача. Частоту зріза шумової напруги обирають рівною 10-20 кГц.

При вказаному положенні автоматичних перемикачів 6 і 7 на входи диференціальних підсилювачів 8 і 9 впливає по суті одна і та ж шумова напруга $U_x(t)$.

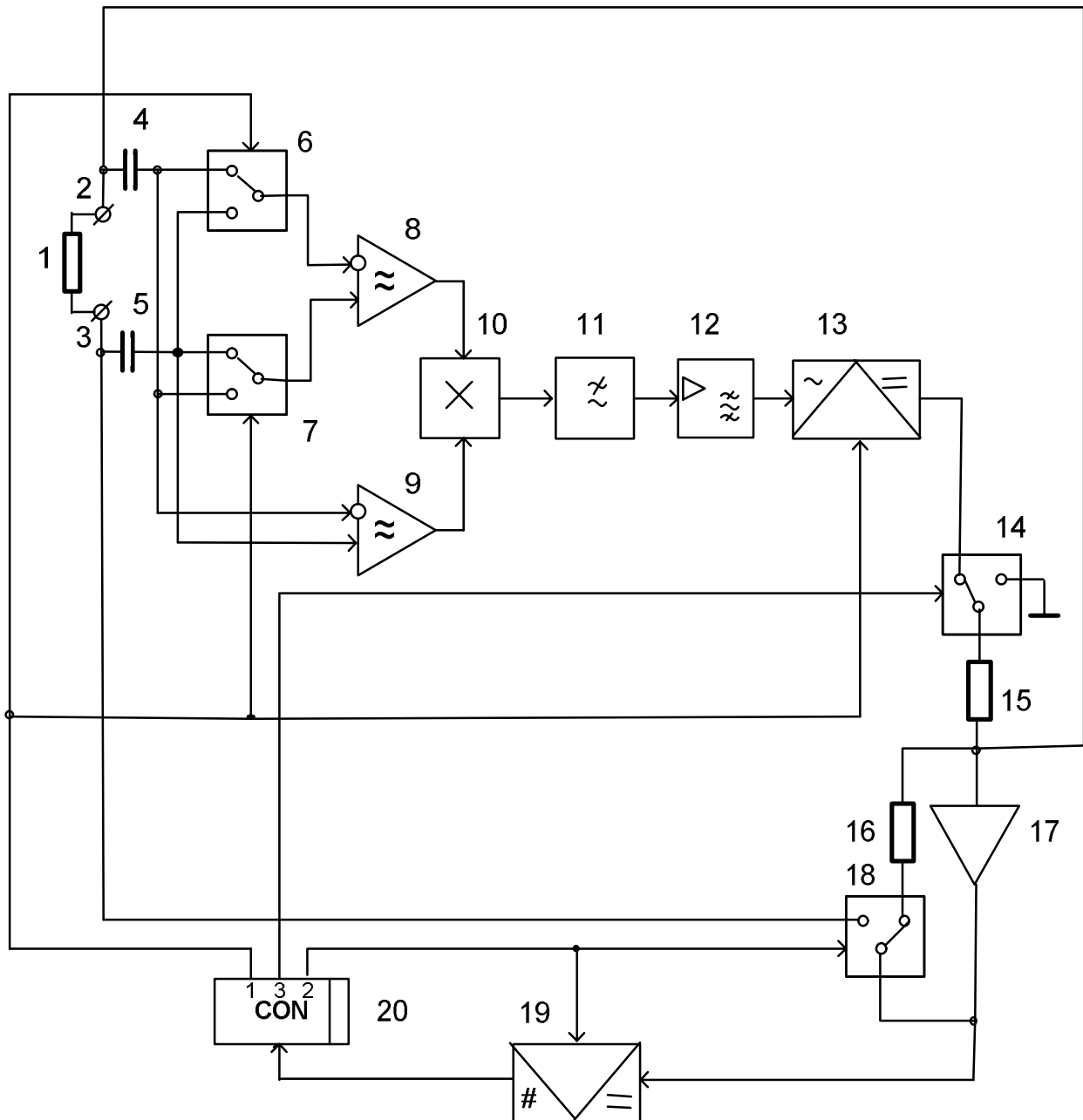


Рис. 1. Пристрій для вимірювання активного електричного опору речовин

1 – первинний резистивний перетворювач; 2, 3 – вхідні клеми; 4, 5 – розділючі конденсатори; 6, 7, 14, 18 – автоматичні перемикачі; 8, 9 – диференціальні підсилювачі; 10 – перемножувач; 11 – фільтр нижніх частот; 12 – вибіркового підсилювач; 13 – синхронний детектор; 15, 16 – постійні резистори; 17 – підсилювач постійного струму; 19 – аналого-цифровий перетворювач; 20 – контролер.

У іншому положенні автоматичних перемикачів 6 і 7 полярність миттєвих значень шумової напруги змінюється на протилежну – $U_x(t)$. Якщо вихідну шумову напругу представити в комплексному вигляді, то по черзі підсилювана шумова напруга буде різнополярною ($U_x(t)$ і $-U_x(t)$). Відповідно до цього шумові напруги на виході диференціального підсилювача 8 з врахуванням його власних шумів набуватимуть значень:

$$\dot{U}_1 = \dot{K}_1(\omega) \dot{U}_x + \dot{U}_{n1}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{K}_1(\omega) \dot{U}_x + \dot{U}_{n1}, \quad (3)$$

де $\dot{K}_1(\omega)$ – комплексний коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача 8; \dot{U}_{n1} – комплексна напруга його власних шумів.

Шумова напруга на виході диференціального підсилювача 9 буде з постійною полярністю

$$\dot{U}_3 = \dot{K}_2(\omega) \dot{U}_x + \dot{U}_{n2}, \quad (4)$$

де $\dot{K}_2(\omega)$ – комплексний коефіцієнт посилення диференціального підсилювача 9; \dot{U}_{n2} – комплексна напруга його власних шумів.

При безперервній роботі автоматичних перемикачів 6 і 7, які управляються комутаційними сигналами, що надходять з першого виходу контролера 20 з частотою F_1 , періодично шумова напруга (4) перемножується з шумовою напругою (2) і (3) в перемножувачі 10. В один такт комутації вихідна напруга перемножувача 10

$$\dot{U}_4 = S \dot{U}_3 \dot{U}_1, \quad (5)$$

в наступний такт комутації

$$\dot{U}_5 = S \dot{U}_3 \dot{U}_2, \quad (6)$$

де S – крутизна множувального перетворення.

Вихідна напруга перемножувача 10 усереднюється фільтром нижніх частот 11. З врахуванням усереднювання маємо послідовність імпульсів з амплітудами:

$$U_6 = K_3 S \{ [\dot{K}_2(\omega) \dot{U}_x + \dot{U}'_{n2} + \dot{U}''_{n2}] \times [\dot{K}_1(\omega) \dot{U}_x + \dot{U}'_{n1} + \dot{U}''_{n1}] \} + \overline{\Delta U}, \quad (7)$$

$$U_7 = K_3 S \{ [\dot{K}_2(\omega) \dot{U}_x + \dot{U}'_{n2} + \dot{U}''_{n2}] \times [-\dot{K}_1(\omega) \dot{U}_x + \dot{U}'_{n1} + \dot{U}''_{n1}] \} + \overline{\Delta U}, \quad (8)$$

де K_3 – коефіцієнт передачі фільтру нижніх частот 11; один штрих означає корельованість частини власних шумів диференціальних підсилювачів 8 і 9; два штрихи – некорельованість частини власних шумів; риска зверху відображає процес часового усереднювання добутків шумової напруги; $\overline{\Delta U}$ – напруга зсуву (дрейфу нуля) перемножувача 10.

Хоча в схемі використовуються два незалежні диференціальні підсилювачі, однак внаслідок паразитних зв'язків, нерівності коефіцієнтів підсилення, неідентичності частотних характеристик підсилювачів виникає корельована складова в двох шумових процесах, що і враховується у виразах (7) і (8).

При оцінці виразів (7) і (8) слід врахувати, що усереднені добутки двох некорельованих сигналів дорівнюють нулю. Тому

$$\overline{\dot{U}_{n1} \dot{U}_{n2}} = \overline{\dot{K}_1 \dot{U}_1 \dot{U}_{n2}} + \overline{\dot{K}_2 \dot{U}_2 \dot{U}_{n1}} = 0, \quad (9)$$

Тоді вирази (7) та (8) приймають вигляд:

$$\overline{U_8} = K_3 S [\overline{\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_x^2} + \overline{\dot{U}_{n1} \dot{U}_{n2}}] + \overline{\Delta U}, \quad (10)$$

$$\overline{U_9} = K_3 S [-\overline{\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_x^2} + \overline{\dot{U}_{n1} \dot{U}_{n2}}] + \overline{\Delta U}. \quad (11)$$

Вихідну напругу перемножувача 10 у вигляді послідовності імпульсів (10) і (11) можна представити у вигляді суми постійної напруги

$$U_{10} = \frac{\overline{U_8} + \overline{U_9}}{2} = K_3 S \overline{\dot{U}_{n1} \dot{U}_{n2}} + \overline{\Delta U}, \quad (12)$$

та змінної напруги

$$U_{11} = \frac{\overline{U_8} - \overline{U_9}}{2} = K_3 S \overline{\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_x^2} \text{sign sin}(2\pi F_1 t), \quad (13)$$

де $\text{sign sin}(2\pi F_1 t)$ – прямокутна огибаюча послідовності імпульсів на виході перемножувача 10; F_1 – частота імпульсів комутації на першому виході контролера 20.

Змінна складова напруги (13) посилюється вибіркоким підсилювачем 12, налаштованим на частоту комутації F_1 , і поступає на вхід синхронного детектора 13, який випрямляє змінну напругу (13) синхронно з частотою F_1 .

$$U_{12} = K_4 K_3 S \overline{\dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{U}_x^2}, \quad (14)$$

де K_4 – коефіцієнт спрямлення напруги.

Випрямлена напруга (14) через перший постійний резистор 15, що має опір R_0 , поступає на вхід операційного підсилювача постійного струму 17 коефіцієнт підсилення якого визначається відношенням опорів зворотнього зв'язку до опору першого постійного резистора 15. Включений в ланцюг зворотнього зв'язку автоматичний перемикач 18 послідовно комутує підключення або другого постійного резистора 16 (опір якого дорівнює опору R_0 першого постійного резистора 15), або включає в ланцюг зворотнього зв'язку опір R_x первинного резистивного перетворювача 1. В цьому випадку коефіцієнт підсилення операційного підсилювача постійного струму буде змінюватися та становить в першому випадку

$$K_5 = R_0 / R_0 = 1, \quad (15)$$

в другому випадку

$$K_6 = R_x / R_0. \quad (16)$$

Згідно виразів (15) та (16) значення вихідної напруги підсилювача постійного струму 17 для різних положень автоматичного перемикача 18 буде становити

$$U_{13} = K_5 K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{S U_x^2} + \Delta U_1 = K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{S U_x^2} + \Delta U_1, \quad (17)$$

$$U_{14} = K_6 K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{S U_x^2} + \Delta U_1 = \frac{R_x}{R_0} K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{S U_x^2} + \Delta U_1, \quad (18)$$

де ΔU_1 – дрейф нуля операційного підсилювача 17.

Частота F_2 перемикання автоматичного перемикача 18 встановлюється в два рази меншою від частоти F_1 комутації автоматичних перемикачів 6 і 7 з метою можливості підсилення обох напівперіодів змінної напруги U_{11} (13)

$$F_2 = F_1 / 2. \quad (19)$$

Отримані значення напруги (17) і (18) перетворюються аналого-цифровим перетворювачем 19 в коди $N1$ та $N2$

$$N1 = S_1 (K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{S U_x^2} + \Delta U_1), \quad (20)$$

$$N2 = S_1 (\frac{R_x}{R_0} K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{S U_x^2} + \Delta U_1). \quad (21)$$

де S_1 – коефіцієнт перетворення аналого-цифрового перетворювача 19.

Отримані коди поступають на вхід контролера 20 де запам'ятовуються.

На наступному етапі роботи перемикається автоматичний перемикач 14, який від'єднує сигнал з синхронного детектора 13 від постійного резистора 15 і подає на вхід

операційного підсилювача постійного струму 17 нульовий сигнал заземленого входу автоматичного перемикача 14. В цьому випадку на виході операційного підсилювача постійного струму 17 буде напруга дрейфу нуля ΔU_1 , яка може виникнути під час його роботи. Частота комутації F_3 автоматичного перемикача 14 встановлюється в чотири рази меншою частоти комутації F_1 . Таке співвідношення частоти комутації дає змогу контролеру 20 отримувати коди $N1, N2$ (інформаційні сигнали шумової напруги) та коди $N3, N4$ (сигнал дрейфу нуля операційного підсилювача 17) під час постійної комутації автоматичного перемикача 18. Оскільки дрейф нуля не залежить від коефіцієнта підсилення, то значення кодів $N3$ та $N4$ однакові і пропорційні значенню ΔU_1

$$N3 = N4 = S_1 \Delta U_1 \quad (22)$$

Після отримання та збереження кодів $N1, N2, N3, N4$ контролер 20 обчислює відношення різниці отриманих кодів $N2-N3$ та $N1-N3$

$$\frac{N2 - N3}{N1 - N3} = \frac{S_1 \left(\frac{R_x}{R_0} K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{SU_x^2} + \Delta U_1 \right) - S_1 \Delta U_1}{S_1 \left(K_1 K_2 K_3 K_4 \overline{SU_x^2} + \Delta U_1 \right) - S_1 \Delta U_1} = \frac{R_x}{R_0}. \quad (23)$$

Отримане співвідношення (23) дозволяє визначити значення активного опору первинного резистивного перетворювача 1

$$R_x = R_0 \frac{N2 - N3}{N1 - N3}. \quad (24)$$

З отриманого виразу (24) видно, що результат виміру активного опору R_x пропорційний значенню опору R_0 резистора 16 та співвідношенню кодів $N1$ та $N2$, які визначаються за значеннями теплового шуму первинного перетворювача 1 і не залежить від власних шумів диференціальних підсилювачів 8 і 9 як корельованих між собою, так і некорельованих. Також виключаються впливи зсуву нульового рівня (дрейфу нуля) ΔU перемножувача 10 та ΔU_1 операційного підсилювача 17. Використання постійного струму при включенні в ланцюг зворотнього зв'язку підсилювача 17 первинного резистивного перетворювача 1 не викликає похибок від падіння напруги на ньому за рахунок наявності розділяючих конденсаторів 4, 5.

Висновки

Виключення власних корельованих та некорельованих шумів елементів вимірювального тракту дозволяє збільшити точність виміру активного опору, а

усунення впливу температури первинного резистивного перетворювача, від якої залежить рівень теплового шуму, дозволяє використовувати пристрій для об'єктів, що знаходяться в різних теплових режимах роботи. Крім того використання даного методу визначення активного опору не потребує додаткової градуїровки пристрою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ван-дер-Зил А. Шум. Источники, описание, измерение/ А.Ван-дер-Зил; пер. с англ. – Д.И.Астров, Л.И.Самойлова; [наук. ред. В.И.Самсонова] – М.: Сов. радио, 1975. – 185 с. : илл.
2. Робинсон Р.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях/ Ричард Робинсон; пер. с англ. – М.С.Петровский, А.А.Загребин – М.: Атомиздат, 1980. – 215 с.: илл.
3. Санніков В.Ю. Теплошумовий метод вимірювання активного опору високоомних рідин [Електронний ресурс] / В.Ю. Санніков, Ю.О. Скрипник // Технології та дизайн. – 2012. – №1. – Режим доступу до журн.: http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/td/2012_1/12svyovr.pdf
4. Патент на корисну модель 50784 Україна, МПК⁸ G01N 27/06, G01R 27/22,. Пристрій для вимірювання активного опору високоомних рідин / Скрипник Ю.О., Санніков В.Ю., Барсуков В.З., Заморська М.С.; власник Київський національний університет технологій та дизайну. – № u200913060; заяв. 15.12.2009; опуб. 25.06.2010 Бюл. пром. влас., – №12/2010р.
5. Патент на корисну модель 58536 Україна, МПК⁸ G01R 19/02, G01R 29/26,. Пристрій для вимірювання дисперсії шумових сигналів / Скрипник Ю.О., Санніков В.Ю., Агафонов А.В.; власник Київський національний університет технологій та дизайну. – №u201014912; заяв. 13.12.2011; опуб. 11.04.2011 Бюл. пром. влас., – №7/2011р.
6. Санніков В.Ю. Підвищення точності вимірювання дисперсії шумових сигналів [Електронний ресурс] / В.Ю. Санніков, Ю.О. Скрипник // Технології та дизайн. – 2011. – №1. – Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/td/2011_1/2011-1.html

7. Скрипник Ю. О. Проектування засобів вимірювання з періодичним порівнянням. [Навч. посіб.] Книга третя. Вимірювання із зрівноважуючим перетворенням./ Скрипник Ю. О., Присенко М.О., Дубровний В.О.: – Київ: КНУТД, 2008. – 276 с.
8. Саватеев А.В. Шумовая термометрия [Текст] / А. В. Саватеев. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 132 с. : илл.; ББК 31.32

В.Ю. Санников

Использование тепловых шумов веществ и материалов для определения их активного электрического сопротивления

Рассмотрен способ определения активного сопротивления веществ и материалов по значению теплового шума с исключением влияния собственных коррелированных шумов элементов измерительной схемы на измерительную величину, что позволяет повысить точность измерения активного сопротивления и расширить диапазон его измерения.

Ключевые слова: тепловой шум, шумовой сигнал, дисперсия, активное сопротивление, усилитель, перемножитель

V.Yu. Sannikov

Use thermal noise substances and materials for the determination of their active electrical resistance

The way of determining the active resistance of substances and materials by the value of the thermal noise of the impact of its exclusion of correlated noise elements of the measuring system for measuring the value that can improve the accuracy of measurement of resistance and extend the range of its measurement.

Keywords: thermal noise, noise signal, variance, resistance, power, multipliers