

УДК 621.317

Ю. О. Скрипник, д. т. н., проф.; Т. П. Каламеєць

ТЕРМОШУМОВИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ ВИСОКООМНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті представлено термошумовий вимірювач опорів високоомних об'єктів, в якому виключається вплив температури досліджуваного об'єкта, яка може змінюватися в широких межах, вплив нестабільності смуги частот шумової напруги, вплив нестабільності підсилення шумових напруг. Це забезпечує підвищення точності визначення опорів високоомних об'єктів за рівнем їх теплових шумів.

Ключові слова: високоомний об'єкт, термошумовий вимірювач, тепловий шум, шумова напруга, шумовий струм.

Відомо, що рівень теплового шуму або теплових флуктуацій у фізичних тілах та середовищах однозначно пов'язаний з температурою об'єкта та його електричним опором. Кількісно він визначається формулою Найквіста [1]:

$$\overline{U^2} = 4kT\Delta fR ,$$

де $\overline{U^2}$ – середній квадрат (дисперсія) теплового шуму;

k – постійна Больцмана;

T – термодинамічна температура;

Δf – смуга частот теплового шуму;

R – опір об'єкта, що досліджується.

Отже, для вимірювання опорів високоомних об'єктів можливо в якості джерела вимірювальної інформації використовувати власні теплові шуми, особливо у випадках, коли з тих чи інших причин неможливе прикладення зовнішньої напруги на датчик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Було проведено аналіз існуючих вимірювачів опорів високоомних об'єктів.

У вимірювачі опорів високоомних об'єктів [2] 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 [3] 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 теплових шумів об'єкта, що досліджується, але і його температури, яка може змінюватися в широких межах. Крім того вимірювана постійна напруга залежить від смуги частот теплового шуму, що вимірюється, цю постійну напругу важко стабілізувати при дії дестабілізуючих факторів. Велике підсилення, яке потрібне при вимірюванні шумової напруги, також нестабільне і вносить велику похибку у вимірюваний опір, а це не забезпечує необхідної точності вимірювання.

Постановка завдання

Завдання нашого дослідження – забезпечити підвищення точності вимірювання опорів високоомних об'єктів за рахунок усунення впливу температури об'єкта, що досліджується, нестабільності смуги частот і підсилення шумових напруг на результат вимірювання.

Результати та їх обговорення

Представлений нами спосіб можна використовувати для оцінки електричного опору високоомних об'єктів за рівнем їх теплових шумів, таких як ізоляція електроприладів, газові та плазмові середовища, поля електричних втрат, полімерні матеріали, датчики малопрвідних середовищ і т. ін.

На рисунку представлена аналого-цифрова схема, що дозволяє реалізувати запропонований спосіб.

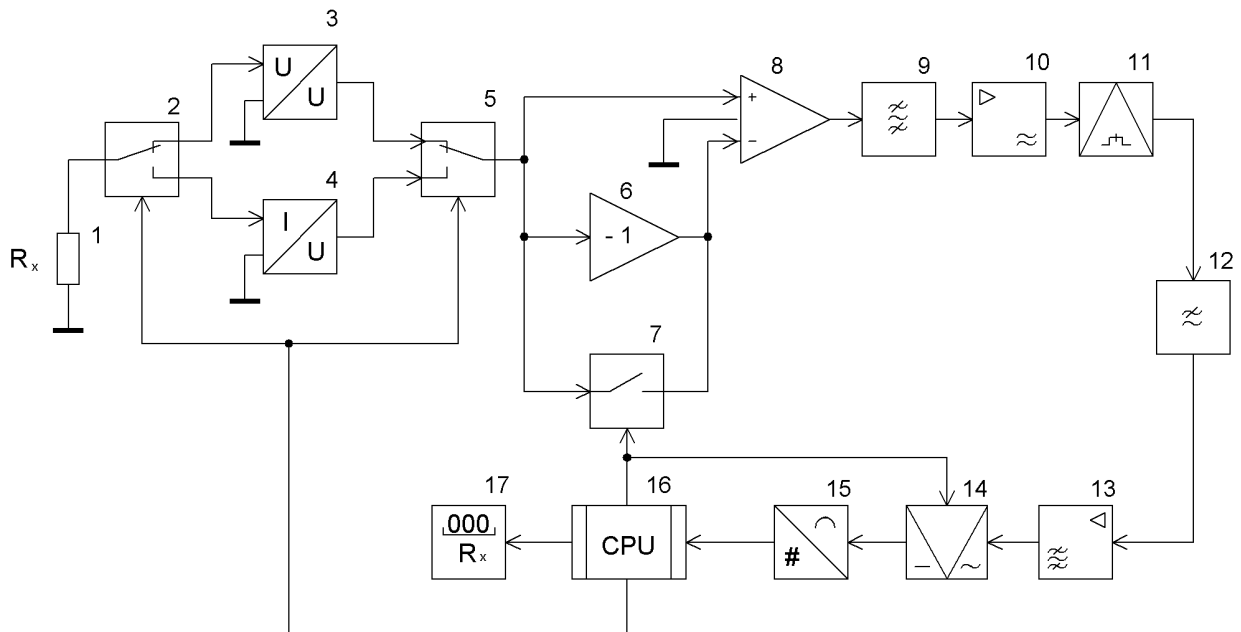


Рис. Структурна схема термшумового вимірювача опорів високоомних об'єктів

Високоомний об'єкт 1 через перемикач 2 підключається до високоомного перетворювача 3 “напруга – напруга” або до низькоомного перетворювача 4 “струм – напруга”. Перемикач 5 підключає інвертор 6, що шунтується ключем 7, та диференціальний підсилювач 8 до виходів перетворювачів 3 і 4. До виходу диференціального підсилювача 8 підключені послідовно з'єднані смуговий фільтр 9, підсилювач 10 високої частоти, квадратичний детектор 11, фільтр 12 нижніх частот, вибіркового підсилювача 13 низької частоти, синхронний детектор 14, інтегруючий аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 15, електронно-обчислювальна машина (ЕОМ) 16. Виходи ЕОМ з'єднані з керуючими входами перемикачів 2, 5 та ключа 7. До ЕОМ 16 підключений також цифровий індикатор 17.

Спосіб здійснюється таким чином.

При вказаному положенні перемикачів з досліджуваного об'єкта знімається шумова напруга $U_{X1}(t)$, яка розгалужується на дві однакових напруги $U_1(t)=U_2(t)=U_{X1}(t)$. Одна з напруг $U_1(t)$ змінює свою полярність інвертором, який періодично шунтується ключем. Періодично інвертована напруга $U_1(t)$ діє на прямий вхід диференціального підсилювача 8, на інверсний вхід якого діє неінвертована напруга $U_2(t)$.

Якщо шумову напругу $U_{X1}(t)$ представити в комплексному вигляді \dot{U}_{X1} , то періодично інвертовану напругу $U_1(t)$ можна представити як часову послідовність комплексів $+\dot{U}_1$ і $-\dot{U}_1$, а неінвертовану напругу $U_2(t)$ як $+\dot{U}_2$. При розімкненому ключі розгалужені напруги, одна з яких інвертується, не віднімаються, а додаються на виході диференціального підсилювача. З урахуванням власних шумів диференціального підсилювача на виході підсилювача маємо сумарну напругу:

$$\dot{U}_3 = 2k_1\dot{U}_{X1} + \dot{U}_H + \dot{U}_B, \quad (1)$$

де k_1 – коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача;

\dot{U}_H і \dot{U}_B – напруги низькочастотних і високочастотних шумів на виході диференціального підсилювача.

У термошумовому способі визначення опору високоомного об'єкта інформаційний шум від досліджуваного об'єкта навіть після підсилення ($2k_1\dot{U}_X$) одного порядку з власними шумами на виході підсилювача ($2k_1\dot{U}_{X1} \approx \dot{U}_B$). Тому ними не можна нехтувати.

При замкненому ключі інвертування однієї із шумових напруг відсутнє – різницєва напруга на виході диференціального підсилювача визначається тільки власними шумами:

$$\dot{U}_4 = \dot{U}_H + \dot{U}_B. \quad (2)$$

Автоматичний ключ керується низькочастотною прямокутною напругою, яка формується ЕОМ. У результаті періодичних замикань-розмикань ключа на виході диференціального підсилювача шумова напруга змінюється від сумарного значення (1) до різницевого значення (2), тобто формується модульована по амплітуді шумова напруга. Модульована напруга фільтрується в смузі частот теплових флуктуацій смуговим фільтром. Відфільтрована від низькочастотних складових напруга підсилюється високочастотним підсилювачем.

Високочастотні складові підсиленої модульованої напруги можна представити як:

$$\dot{U}_5 = k_2(2k_1\dot{U}_{X1} + \dot{U}_B), \quad (3)$$

$$\dot{U}_6 = k_2\dot{U}_B, \quad (4)$$

де k_2 – коефіцієнт підсилення підсилювача високої частоти.

Складові модульованої напруги (3) і (4) квадратично детектуються в квадратичному детекторі і усереднюються фільтром нижніх частот. У результаті усереднення квадратично перетворених шумів утворюється послідовність імпульсів з амплітудами:

$$U_7 = k_3 S_1 \left[k_2 \left(\overline{2k_1\dot{U}_{X1} + \dot{U}_B} \right) \right]^2, \quad (5)$$

$$U_8 = k_3 S_1 \left[k_2 \overline{\dot{U}_B} \right]^2, \quad (6)$$

де S_1 – крутизна квадратичного детектування;

k_3 – коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот.

У послідовності усереднених напруг (5) і (6) з нерівними амплітудами виділяють низькочастотну огинаючу прямокутних імпульсів:

$$U_9 = \frac{U_7 - U_8}{2} \text{sign} \sin 2\pi Ft + U_H(t), \quad (7)$$

де F – частота періодичного інвертування шумової напруги;

$\text{sign} \sin 2\pi Ft$ – низькочастотна напруга прямокутної форми;

$U_H(t)$ – низькочастотні шуми квадратичного детектора.

Вибірковим підсилювачем, налаштованим на частоту F , підсилюється перша гармоніка напруги (7). Напруга першої гармоніки з урахуванням амплітуд імпульсів (5) і (6):

$$U_{10} = \frac{8}{\pi} k_4 k_3 k_2 k_1 S_1 \left(\overline{\dot{U}_B \dot{U}_{X1}} + k_1 \overline{\dot{U}_{X1}^2} \right) + \Delta \dot{U}_H, \quad (8)$$

де k_4 – коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача низької частоти;

$\Delta \dot{U}_H$ – частина напруги низькочастотних шумів, що попадають у смугу пропускання

вибіркового підсилювача низької частоти.

У вираз (8) входить добуток напруг власних високочастотних шумів диференціального підсилювача і теплових шумів об'єкта. Але потрібно врахувати, що ці шуми між собою некорельовані. Тому їх усереднений добуток дорівнює нулю:

$$\overline{\dot{U}_B \dot{U}_{X1}} = 0. \quad (9)$$

Другий член виразу – середній квадрат напруги теплових шумів, тобто дисперсія теплових флуктуацій. Згідно формули Найквіста:

$$\overline{U_{X1}^2} = 4kT\Delta f R_X, \quad (10)$$

де k – постійна Больцмана;

T – термодинамічна температура об'єкта;

Δf – смуга частот, яка визначається смуговим фільтром;

R_X – опір досліджуваного об'єкта.

З урахуванням вище зазначеного низькочастотна напруга пропорційна тільки дисперсії теплових шумів:

$$U_{11} = \frac{8}{\pi} k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 S_1 \overline{U_{X1}^2} \sin 2\pi Ft + \Delta U_H(t). \quad (11)$$

Низькочастотна напруга синхронно детектується синхронним детектором і усереднюється в АЦП. Цифровий код на виході АЦП визначається тільки постійною складовою протектованої напруги:

$$N_1 = \frac{8}{\pi} \frac{k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 S_1 S_2}{q} \overline{U_{X1}^2}, \quad (12)$$

де S_2 – крутизна перетворення синхронного детектора;

q – одиниця молодшого розряду АЦП, ($q = \frac{U_{on}}{2^n}$, де U_{on} – опорна напруга АЦП, n – розрядність АЦП).

Цифровий код N_1 запам'ятовується в ЕОМ. Після цього по команді ЕОМ перемикачі переводяться в нижнє положення. При цьому до досліджуваного об'єкта підключається перетворювач “струм – напруга” з низькоомним входом. На виході перетворювача формується напруга, пропорційна шумовому струму об'єкта:

$$U_{X2} = S_i i_X(t), \quad (13)$$

де S_i – крутизна перетворення струму в напругу.

Друга шумова напруга після розгалуження й інвертування поступає на входи диференціального підсилювача. Після аналогічного вище описаному перетворенню отримуємо цифровий код:

$$N_2 = \frac{8}{\pi} \frac{k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 S_1 S_2}{q} \overline{U_{X2}^2}. \quad (14)$$

Дисперсія другої шумової напруги визначається дисперсією шумового струму: $\overline{U_{X2}^2} = S_2^2 \overline{i_X^2}$, де дисперсія струмових шумів в режимі короткого замикання об'єкта обернено пропорційна його опорі:

$$\overline{i_X^2} = \frac{4kT\Delta f}{R_X}. \quad (15)$$

Цифровий код N_2 також запам'ятовується в пам'яті ЕОМ. У процесорі ЕОМ перший цифровий код ділиться на другий цифровий код. Отримуємо частку від ділення двох кодів,

яка пропорційна відношенню дисперсій першої та другої шумових напруг:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\overline{U_{X1}^2}}{\overline{U_{X2}^2}}, \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{4kT\Delta f R_X}{S_i^2 \overline{i_X^2}}. \quad (16)$$

З урахуванням виразу (15) маємо:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{R_X^2}{S_i^2}. \quad (17)$$

Із відношення цифрових кодів добувають корінь квадратний, і за отриманим значенням цифрового коду визначають значення вимірюваного опору, яке виводиться на цифровий індикатор:

$$R_X = S_i \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}. \quad (18)$$

Висновки

Із отриманого виразу видно, що значення вимірюваного опору R_X не залежить від температури досліджуваного об'єкта T , смуги частот Δf , в якій вимірюються дисперсії шумової напруги і струму, параметрів підсилювально-перетворювального тракту (k_1, k_2, k_3, k_4 і S_1, S_2) та рівня власних шумів цього тракту (U_H і U_B). Усунення впливу вказаних факторів дозволяє досягнути високої точності вимірювання, а остаточну похибку знизити до значення менше $\pm 0,2\%$ при вимірюванні опорів у діапазоні $0,5 - 500 \text{ МОм}$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рытов С.М. Теория электрических флуктуаций и теплового излучения. – М.: Издательство АН СССР, 1953. – С. 46 – 50.
2. Скрипник Ю.О., Курко В.Р., Скрипник В.Й. Шумова кондуктометрія // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. Збірник наукових праць. – 2002. – вип. 12. – С. 109 – 112.
3. Каламеєць Т.П. Аналіз вимірювання опорів високоомних об'єктів // Вісник КНУТД. – 2005. – №5. – С. 18 – 20.

Скрипник Юрій Олексійович – професор кафедри,

Каламеєць Тетяна Петрівна – аспірант кафедри.

Кафедра автоматизації та комп'ютерних систем, Київський національний університет технологій та дизайну