



УКРАЇНА

(19) UA (11) 19248 (13) U
(51) МПК (2006)
G01R 27/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ТЕРМОШУМОВИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ВИСОКООМНОГО ОБ'ЄКТА

1

2

(21) u200605502

(22) 19.05.2006

(24) 15.12.2006

(46) 15.12.2006, Бюл. № 12, 2006 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Каламєєць Тетяна Петрівна

(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) Термошумовий спосіб визначення опору високоомного об'єкта, при якому з досліджуваного об'єкта знімають шумову напругу, розгалужують її на дві напруги, одну з них періодично інвертують з низькою частотою, порівнюють інвертовану напругу з неінвертованою, отримують різницеву модульовану по амплітуді напругу, підсилюють її в смузі частот теплових флуктуацій та квадратично детектують, підсилюють вибірково низькочастотну змінну складову продетектованої напруги, синх-

ронно її детектують та усереднюють, отримують постійну напругу, який **відрізняється** тим, що отриману постійну напругу перетворюють в перший цифровий код, який запам'ятовують, з досліджуваного об'єкта знімають шумовий струм, який перетворюють в іншу шумову напругу, отримують іншу постійну напругу, перетворюють її в другий цифровий код, який запам'ятовують, а опір високоомного об'єкта визначають за формулою

$$R_X = S_i \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}$$

де R_X - опір високоомного об'єкта; N_1 - перший цифровий код; N_2 - другий цифровий код; S_i - крутість перетворення шумового струму об'єкта в шумову напругу.

Корисна модель відноситься до вимірювальної техніки і може бути використана для оцінки електричного опору високоомних об'єктів (ізоляція електроприладів, газові та плазмові середовища, поля електричних втрат, полімерні матеріали, датчики малопровідних середовищ і т. ін.) за рівнем їх теплових шумів.

Відомо, що рівень теплового шуму або теплових флуктуацій в фізичних тілах та середовищах однозначно пов'язаний з температурою об'єкту та його електричним опором. Кількісно він визначається формулою Найквіста [див. Рытов С.М. Теория электрических флуктуаций и теплового излучения. -М.: Издательство АН СССР, 1953 -с.46-50]:

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

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

 k - постійна Больцмана; T - термодинамічна температура; Δf - смуга частот теплового шуму; R - опір досліджуваного об'єкту.

Відомий термошумовий спосіб визначення опору високоомного об'єкту [див. Скрипник Ю.О., Курко В.Р., Скрипник В.Й. Шумова кондуктометрия /Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. Збірник наукових праць. -вип.12. -С.109-112], в якому шумову напругу досліджуваного об'єкту підсилюють, квадратично детектують і вимірюють постійну складову продетектованої напруги, за якою визначають електричний опір.

Через накладення власних шумів підсилювача на теплові шуми досліджуваного об'єкту неможливо досить точно вимірювати опір. Операції способу не дозволяють розділити шуми об'єкту, що вимірюються та власні шуми підсилювача і усунути вплив останніх на результат вимірювання.

Відомий також термошумовий спосіб визначення опору високоомного об'єкту [див. Заявка на корисну модель №2004032055, МПК7 G01R27/00. Термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів. Рішення про видачу патенту від 18.01.2006р.], при якому з досліджуваного об'єкту знімають шумову напругу, розгалужують її на дві напруги, одну з них періодично інвертують з низькою частотою, порівнюють інвертовану напругу з

(13) U
(11) 19248
(19) UA

не інвертованою, отримують різницеву модульовану по амплітуді напругу, підсилюють її в смузі частот теплових флуктуацій та квадратично детектують, підсилюють вибірково низькочастотну змінну складову продетектованої напруги, синхронно її детектують та усереднюють, отримують постійну напругу.

У відомому способі усувається вплив власних шумів підсилювача на результат вимірювання теплових шумів об'єкту, що представлений в вигляді постійної напруги. Але значення цієї напруги визначає не тільки рівень теплових шумів досліджуваного об'єкту, але і його температури, яка може змінюватися в широких межах. Крім того, вимірювана постійна напруга залежить від смуги частот теплового шуму, що вимірюється, яку важко стабілізувати при дії дестабілізуючих факторів. Велике підсилення, що потрібне при вимірюванні шумової напруги, також нестабільне і вносить велику похибку в вимірюємий опір, що не забезпечує необхідної точності вимірювання.

В основу корисної моделі покладена задача створити такий термошумовий спосіб визначення опору високоомного об'єкту, в якому введення нових операцій з шумовими сигналами дозволило б усунути вплив температури досліджуваного об'єкту, нестабільності смуги частот і підсилення шумових напруг на результат вимірювання, що забезпечить підвищення точності визначення опорів високоомних об'єктів.

Поставлена задача вирішується тим, що в термошумовий спосіб визначення опору високоомного об'єкту, при якому з досліджуваного об'єкту знімають шумову напругу, розгалужують її на дві напруги, одну з них періодично інвертують з низькою частотою, порівнюють інвертовану напругу з неінвертованою, отримують різницеву модульовану по амплітуді напругу, підсилюють її в смузі частот теплових флуктуацій та квадратично детектують, підсилюють вибірково низькочастотну змінну складову продетектованої напруги, синхронно її детектують та усереднюють, отримують постійну напругу, який відрізняється тим, що отриману постійну напругу перетворюють в перший цифровий код, який запам'ятовують, з досліджуваного об'єкту знімають шумовий струм, який перетворюють в іншу шумову напругу, отримують іншу постійну напругу, перетворюють її в другий цифровий код, який запам'ятовують, а опір високоомного об'єкту визначають за формулою

$$R_X = S_i \sqrt{N_1 / N_2},$$

де R_X - опір високоомного об'єкту;

N_1 - перший цифровий код;

N_2 - другий цифровий код;

S_i - крутизна перетворення шумового струму об'єкту в шумову напругу.

Введення в термошумовий спосіб визначення опору високоомного об'єкту нових операцій по перетворенню постійних напруг, пропорційних шумовій напрузі і шумовому струму досліджуваного об'єкту, в цифрові коди, подальше ділення цифрового коду шумової напруги на цифровий код шумового струму, добування квадратного кореня із частки від ділення кодів дозволяє в результаті отримати цифровий код пропорційний вимірюємо-

му опору об'єкта, який не залежить від температури об'єкта, смуги частот перетворюємих шумових напруг, значень підсилень і функціональних перетворень в підсилювально-перетворювальному тракці, що підвищує точність визначення опорів високоомних об'єктів.

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

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 та синхронний детектор 14. До виходу синхронного детектора 14 підключений інтегруючий аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 15, вихід якого з'єднаний з електронно-обчислювальною машиною (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 наступним чином.

При вказаному положенні перемикачів 2 і 5 з досліджуваного об'єкту 1 знімається перша шумова напруга $U_{X1}(t)$, яка на виході перемикача 5 розгалужується на дві однакових напруги $U_1(t) = U_2(t) = U_{X1}(t)$. Одна з напруг $U_1(t)$ змінює свою полярність інвертором 6, який періодично шунтується ключем 7. Періодично інвертована напруга $U_1(t)$ діє на прямий вхід диференціального підсилювача 8, на інверсний вхід якого діє не інвертована 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 не інвертовану напругу $U_2(t)$ як $+\dot{U}_2$.

При розімкненому ключі 7 розгалужені напруги, одна з яких інвертується не віднімаються, а додаються на виході диференціального підсилювача 8. З урахуванням власних шумів диференціального підсилювача 8 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 8;

\dot{U}_H і \dot{U}_B - напруги низькочастотних і високочастотних шумів на виході диференціального підсилювача 8.

В термошумовому способі визначення опору високоомного об'єкту інформаційний шум від досліджуваного об'єкту 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 7 інвертування однієї із шумових напруг відсутнє і різницева напруга на виході диференціального підсилювача 8 визначається тільки власними шумами:

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

Автоматичний ключ 7 керується низькочастотною прямокутною напругою, яка формується ЕОМ 16. В результаті періодичних замикань-розмикань ключа 7 на виході диференціального підсилювача 8 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 9. Відфільтрована від низькочастотних складових напруга підсилюється високочастотним підсилювачем 10.

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 10.

Складові модульованої напруги (3) і (4) квадратично детектуються в квадратичному детекторі 11 і усереднюються фільтром 12 нижніх частот. В результаті усереднення квадратично перетворених шумів утворюється послідовність імпульсів з амплітудами:

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

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

де S_1 - крутизна квадратичного детектування;
 k_3 - коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот;
 символ $\overline{\quad}$ означає операцію усереднення.

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

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

де F - частота періодичного інвертування шумової напруги;

$\text{signsin} 2\pi Ft$ - низькочастотна напруга прямокутної форми;

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

Вибірковим підсилювачем 13, налаштованим на частоту F , підсилюється перша гармоніка напруги (7). Напруга першої гармоніки з урахуванням амплітуд імпульсів (5) і (6):

$$U_{10} = \frac{8}{\pi} k_4 k_3 k_2^2 k_1 S_1 \left(\overline{U_B U_{X1} + k_1 U_{X1}^2} \right) + \Delta U_H, \quad (8)$$

де k_4 - коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 13 низької частоти;

ΔU_H - частина напруги низькочастотних шумів, що попадають в смугу пропускання вибіркового підсилювача 13 низької частоти.

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

$$\overline{U_B U_{X1}} = 0. \quad (9)$$

Другий член виразу (8) представляє собою середній квадрат напруги теплових шумів, тобто дисперсію 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 1;

Δf - смуга частот, що визначається смуговим фільтром 9;

R_X - опір досліджуваного об'єкту 1.

З урахуванням співвідношень (8) і (9) низькочастотна напруга (7) пропорційна тільки дисперсії теплових шумів:

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

Низькочастотну напругу (11) синхронно детектують синхронним детектором 14 і усереднюють в АЦП інтегруючого типу 15. Цифровий код на виході АЦП 15 визначається тільки постійною складовою продетектованої 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 q - одиниця молодшого розряду АЦП 15;

S_2 - крутизна перетворення синхронного детектора 14.

Цифровий код N_1 запам'ятовується в ЕОМ 16. Після цього по команді ЕОМ 16 перемикачі 2 і 5 переводяться в нижнє положення. При цьому до досліджуваного об'єкту 1 підключається перетворювач 4 "струм-напруга" з низькоомним входом. На виході перетворювача 4 формується напруга, пропорційна шумовому струму об'єкту:

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

де S_i - крутизна перетворення струму в напругу.

Друга шумова напруга (13) після розгалуження і інвертування поступає на входи диференціального підсилювача 8. В результаті періодичного інвертування однієї із розгалужених напруг на виході диференціального підсилювача 8 формується модульована напруга, що складається із часової послідовності комплексів:

$$\dot{U}_5 = k_2 (2k_1 \dot{U}_{X2} + \dot{U}_B), \quad (14)$$

$$\dot{U}_6 = k_2 \dot{U}_B. \quad (15)$$

Підсилюють модульовану по амплітуді напругу в смузі частот теплових флуктуацій і квадратично детектують. В результаті детектування шумової

напруги утворюється низькочастотна напруга огинаючої, перша гармоніка якої:

$$U_{11}' = \frac{8}{\pi} k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 S_1 U_{X2}^2 \sin 2\pi f t + \Delta U_H(t). \quad (16)$$

В результаті синхронного детектування і усереднення в процесі аналогово-цифрового перетворення отримують другий цифровий код:

$$N_2 = \frac{8}{\pi} \frac{k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 S_1 S_2}{q} U_{X2}^2, \quad (17)$$

Дисперсія другої шумової напруги визначається дисперсією шумового струму:

$$U_{X2}^2 = S_2^2 i_X^2, \quad (18)$$

де дисперсія струмових шумів в режимі короткого замикання об'єкту обернено пропорційна його опору:

$$i_X^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_X} \quad (19)$$

Цифровий код N_2 також запам'ятовується в ЕОМ 16. В процесорі ЕОМ 16 перший цифровий код N_1 ділиться на другий цифровий код N_2 . Отримують частку від ділення двох кодів, яка пропорційна відношенню дисперсій першої та другої шумових напруг:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{X1}^2}{U_{X2}^2}. \quad (20)$$

Підставляючи в вираз (20) значення дисперсій (10) і (18), отримуємо:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{4kT\Delta f R_X}{S_1^2 i_X^2}. \quad (21)$$

З урахуванням виразу (19) маємо:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{R_X^2}{S_1^2}. \quad (22)$$

Із відношення цифрових кодів добувають корінь квадратний і за отриманим значенням цифрового коду визначають значення вимірюємого опору, яке виводиться на цифровий індикатор 17:

$$R_X = S_1 \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} \quad (23)$$

Із отриманого виразу (23) видно, що вимірювання опору R_X не залежить від температури досліджуваного об'єкту 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 в діапазоні 0,5-500 МОм. Для усунення впливу низькочастотних шумів типу флікер-шум, зовнішніх наведень і завад тепловий шум доцільно вимірювати в смузі частот 50-200 кГц при частоті періодичного інвертування 75-150 Гц. Випадкову складову похибки через статистичні характеристики шумових напруг можливо понизити збільшенням часу усереднення результатів вимірювань до 3-5с.

