



УКРАЇНА

(19) UA (11) 14264 (13) U
(51) МПК (2006)
G01R 27/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ТЕРМОШУМОВИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ ВИСОКООМНИХ ОБ'ЄКТІВ

1

2

(21) u200509841

(22) 19.10.2005

(24) 15.05.2006

(46) 15.05.2006, Бюл. № 5, 2006 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Курко Володимир
Романович, Каламєєць Тетяна Петрівна(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ(57) Термошумовий спосіб вимірювання опорів
високоомних об'єктів, при якому з досліджуваного
об'єкта знімають шумову напругу, вимірюють пос-
тійну напругу, за значенням якої визначають опір

досліджуваного об'єкта, який **відрізняється** тим, що шумову напругу розгалужують на дві напруги, одну з яких періодично інвертують з низькою частотою, порівнюють інвертовану напругу з неінвертованою, отримують різницеву модульовану напругу, яку підсилюють в смузі частот високочастотних теплових шумів та квадратично детектують, виділяють із детектованої напруги змінну складову з низькою частотою інвертування, вибірково підсилюють низькочастотну змінну напругу, синхронно її детектують та усереднюють.

Корисна модель відноситься до вимірювальної техніки і може бути використана для визначення опорів високоомних об'єктів, таких як електрична ізоляція, високоомні резистори, електричний опір різноманітних речовин і матеріалів, опір втрат, тощо за дисперсією теплових шумів високоомного об'єкту без зовнішньої напруги.

В будь-якому фізичному об'єкті, який має активні втрати електричної енергії, присутні теплові шуми. 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 флуктуючі диполі [див. Ван-дер-Зил А. Шум. Источники, описание, измерение. / Пер. с англ. - М.: Сов. радио, 1975 - с.27-30].

Відомий термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів [див. а.с. №195161, МПК G01K7/01, бюл. №9, 1967], що заснований на вимірюванні дисперсії теплових шумів об'єкту, що досліджується:

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

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

k - постійна Больцмана;

T - термодинамічна температура;

Δf - смуга частот вимірюємого теплового шуму;

R - опір досліджуваного об'єкту.

В відповідності з приведеним співвідношенням (формулою Найквіста) дисперсія теплового шуму пропорційна електричному опору R і зростає зі збільшенням опору.

Складність виділення і вимірювання теплових шумів на фоні апаратних шумів, як теплового, так і шумів інших типів (дробових, контактних, флікер-шумів, тощо), не дозволяє отримати достатню точність вимірювання опорів.

Відомий термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів [див. Карба Л.П. Установка для измерения коэффициента шума и активного сопротивления двухполюсников на радиочастотах // Известия ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). - 1969. - вып.80, с.57-60], в якому шумову напругу, що знімається з досліджуваного об'єкту, фільтрують, виділяють високочастотні теплові шуми і пригнічують низькочастотні шуми нетеплового характеру.

Однак високочастотні теплові шуми підсилюючих елементів вимірювальної схеми сумуються з тепловими шумами досліджуваного об'єкту, що спотворює результати вимірювання опорів і знижує їх достовірність.

Відомий також термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів [див. Скрипник Ю.О., Курко В.Р., Скрипник В.Й. Шумова кондукто-

(13) U
(11) 14264
(19) UA

метрія / Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. Збірник наукових праць. - К.: 2002, вип.12, с.109-112], при якому з об'єкту, що досліджується знімають шумову напругу, вимірюють постійну напругу, за значенням якої визначають опір досліджуваного об'єкту.

Крім того, шумову напругу підсилюють і зводять до квадрату.

Складністю відомого способу є розділення вимірюємого інформаційного теплового шуму об'єкту і власних шумів вимірювальної апаратури. Справа в тім, що корисний шумовий сигнал і шуми апаратури - статистично нерозрізнені випадкові процеси, що перекривають один одного. Крім того, корисний сигнал нищівно малий (близько одиниць та долей мікровольт за напругою і близько 10^{-18} - 10^{-16} за потужністю). Тому після необхідного підсилення шумового сигналу досліджуваного об'єкту відношення сигнал-завада стає набагато меншим за одиницю. В цих умовах вимірювання дисперсії теплових шумів об'єкта супроводжується великими похибками, що знижує точність визначення опорів високоомних об'єктів.

В основу корисної моделі поставлена задача створити такий термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів, в якому введення нових операцій забезпечило би підвищення точності термошумового вимірювання опорів високоомних об'єктів.

Поставлена задача вирішується тим, що в термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів, при якому з об'єкту, що досліджується знімають шумову напругу, вимірюють постійну напругу, за значенням якої визначають опір досліджуваного об'єкту, згідно корисної моделі, шумову напругу розгалужують на дві напруги, одну з яких періодично інвертують з низькою частотою, порівнюють інвертовану напругу з неінвертованою, отримують різницеву модульовану напругу, яку підсилюють в смузі частот високочастотних теплових шумів та квадратично детектують, виділяють із детектованої напруги змінну складову з низькою частотою інвертування, вибірково підсилюють низькочастотну змінну напругу, синхронно її детектують та усереднюють.

Введення в термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів операцій по розгалуженню шумової напруги, що знімається з досліджуваного об'єкту, на дві напруги, одну із яких періодично інвертують з низькою частотою, порівнянню періодично інвертованої напруги з неінвертованою, підсиленню різницевої модульованої напруги в смузі частот високочастотних теплових шумів, квадратичному детектуванню підсиленої високочастотної напруги, виділенню із детектованої напруги змінної складової з низькою частотою інвертування, вибіркового підсиленню низькочастотної змінної напруги, яку синхронно детектують і усереднюють, дозволяє відокремити сигнал, що пропорційний дисперсії високочастотного теплового шуму, від високочастотних апаратних шумів в смузі підсилення модульованого сигналу і низькочастотних шумів детектора в смузі підсилення низькочастотного сигналу, що забезпечує підвищення точності термошумового вимірювання опорів

високоомних об'єктів.

На Фіг. зображено вимірювальну схему, за допомогою якої реалізується запропонований спосіб термошумового 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 автоматичного 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, вибірково 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.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Шумовий інформаційний сигнал $U_x(t)$, який знімається з опору R_x високоомного об'єкту 1, розгалужується на дві однакові напруги $U_1(t)=U_2(t)=U_x(t)$. Одна з розгалужених напруг $U_1(t)$ періодично інвертується за допомогою інвертора 2 і автоматичного ключа 3, який періодично шунтує інвертор 2. Якщо шумовий сигнал $U_x(t)$ представити в комплексному вигляді як \dot{U}_x , то періодично інвертований сигнал $U_1(t)$ можливо представити як часову послідовність комплексних напруг $+\dot{U}_1$ і $-\dot{U}_1$.

Неінвертовану напругу \dot{U}_2 порівнюють з періодично інвертованою напругою $+\dot{U}_1$ і $-\dot{U}_1$, за допомогою диференціального підсилювача 4, власні шуми якого зазвичай перевищують інформаційний шум \dot{U}_x . При замкненому автоматичному ключі 3 інвертування інформаційного шуму відсутнє і різницева напруга на виході диференціального підсилювача ($\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = 0$) визначається тільки його власними шумами

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

де \dot{U}_H - напруга низькочастотних шумів, приведена до виходу диференціального підсилювача;

\dot{U}_B - напруга високочастотних шумів, приведена до виходу диференціального підсилювача.

В розімкнутому стані автоматичного ключа 3 на прямий вхід диференціального підсилювача 4 діє інвертована напруга - \dot{U}_1 . На інверсний вхід диференціального підсилювача продовжує поступати напруга \dot{U}_2 , яка інвертується в самому підсилювачі. При підсиленні в диференціальному підсилювачі двох інвертованих напруг ($-\dot{U}_1$ і $-\dot{U}_2$) на його виході формується сумарна напруга інформаційних шумів на фоні власних шумів підсилювача:

$$\dot{U}_4 = \dot{U}_H + \dot{U}_B - 2k_1\dot{U}_x, \quad (2)$$

де k_1 - коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача.

Автоматичний ключ 3 керується мультівібра-

тором 13, частоту перемикачів якого обирають в області низьких частот (50-300Гц). В результаті періодичних замикань-розмикань автоматичного ключа на виході диференціального підсилювача 4 виникає різницева модульована напруга, що складається із пакетів нерівних напруг (1) і (2). Модульована частотою інвертування напруга підсилюється підсилювачем високої частоти 6 в смузі частот смугового фільтру 5, який подавляє низькочастотну шумову напругу і пропускає високочастотну шумову напругу.

В смузі частот підсиленої напруги в основному попадають високочастотні теплові шуми опору 1 високоомного об'єкту, теплові та дробові шуми диференціального підсилювача 4. Тому складові підсиленої модульованої напруги можна представити в вигляді пакетів тільки високочастотних напруг:

$$\dot{U}_5 = k_2 \dot{U}_B, \quad (3)$$

$$\dot{U}_6 = k_2 (\dot{U}_B - 2k_1 \dot{U}_X), \quad (4)$$

де k_1 - коефіцієнт підсилення підсилювача високої частоти.

Складові модульованої напруги (3) і (4) квадратично детектуються в блоці 7 і усереднюються в фільтрі нижніх частот 8. Продетектовані і усереднені напруги представимо як постійні складові напруг, які слідує з частотою інвертування:

$$U_7 = k_3 S_1 \left[k_2 \overline{\dot{U}_B} \right] \text{ на інтервалі } 0 < t < \frac{1}{2F}, \quad (5)$$

$$U_8 = k_3 S_1 \left[k_2 (\overline{\dot{U}_B} - 2k_1 \overline{\dot{U}_X}) \right] \text{ на інтервалі } \frac{1}{2F} < t < \frac{1}{F}, \quad (6)$$

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

В часовій послідовності усереднених напруг (5) і (6) присутня напруга низькочастотної огибаючої модульованої напруги:

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

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

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

Вибірковим підсилювачем 9, налаштованим на частоту F перемикачів мультівібратора 13, виділяється і підсилюється основна гармоніка низькочастотної огибаючої (7). З урахуванням значень напруг (5) і (6) низькочастотна напруга на виході вибіркового підсилювача 9 буде такою:

$$U_{10} = \frac{16}{\pi} k_4 k_3 S_1 \left(k_1 \overline{\dot{U}_X^2} - \overline{\dot{U}_B \dot{U}_X} \right) \sin 2\pi Ft + \Delta \overline{\dot{U}_H}, \quad (8)$$

де k_4 - коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача;

$\Delta \overline{\dot{U}_H}$ - частина напруги низькочастотних шумів,

що потрапляють в смузі пропускання вибіркового підсилювача.

Потрібно врахувати, що теплові шуми \dot{U}_X високоомного об'єкту і високочастотні шуми \dot{U}_B диференціального підсилювача між собою некорельовані. Тому їх усереднений добуток буде рівним:

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

В той же час середній квадрат шумової напруги $\overline{\dot{U}_X^2}$ представляє собою дисперсію теплових шумів, яка в відповідності з формулою Найквіста визначається виразом:

$$\overline{\dot{U}_X^2} = 4kT \Delta f R_X, \quad (10)$$

де k - постійна Больцмана;

T - термодинамічна температура об'єкту шуму;

Δf - смуга частот, що задається смуговим фільтром 5;

R_X - опір 1 досліджуваного об'єкту.

З урахуванням виразу (9) низькочастотна напруга (8) пропорційна дисперсії теплових шумів:

$$U_{11} = \frac{16}{\pi} k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 S_1 \overline{\dot{U}_X^2} \sin 2\pi Ft + \Delta U_H(t). \quad (11)$$

Низькочастотну напругу (11) синхронно детектують детектором 10, що керується мультівібратором 13, і усереднюють другим фільтром нижніх частот 11. В результаті усереднення пригнічується вплив низькочастотних шумів $\Delta U_H(t)$ і згладжується синхронно детектована напруга. Постійна складова цієї напруги, що вимірюється вольтметром 12, пропорційна тільки дисперсії високочастотних теплових шумів:

$$U_{12} = \frac{16}{\pi} k_1^2 k_2^2 k_3 k_4 S_1 S_2 k_5 \overline{\dot{U}_X^2}, \quad (12)$$

де S_2 - крутизна перетворення синхронного детектора;

k_5 - коефіцієнт передачі другого фільтра нижніх частот.

З урахуванням значення дисперсії теплових шумів (10) отримаємо:

$$U_{13} = S_0 R_X, \quad (13)$$

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

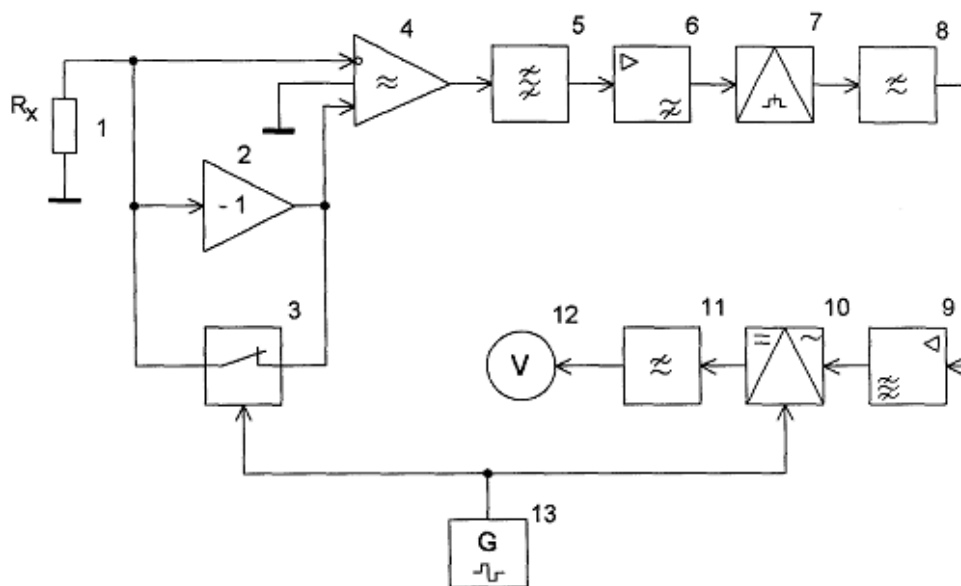
крутизна перетворення опору в напругу [В/Ом].

Таким чином, постійна напруга, що вимірюється пропорційна опору досліджуваного об'єкту і не залежить від рівня власних шумів диференціального підсилювача, які визначають низьке відношення інформаційний шум - власний шум на його виході. Вплив низькочастотних шумів нетеплового характеру пригнічено підсиленням шумової напруги в смузі частот високочастотних теплових шумів, а також вибіркового підсиленням низькочастотної змінної напруги на частоті періодичного інвертування з послідовним синхронним детектуванням і усередненням. Завдяки цьому забезпечується можливість вимірювання великих опорів за рівнем їх теплових шумів без зовнішньої напруги. При цьому знімаються обмеження на відношення сигнал-завада на вході вимірювальної апаратури.

Дослідження показали можливість вимірювання великих опорів в діапазоні 1-100МОм та вище при підсиленні на 80дБ в смузі пропускання

$\Delta f = 100 \text{ кГц}$ відносно частоти $f = 1 \text{ МГц}$ та температури довкілля $T = 290\text{--}300 \text{ К}$. Частота періодичного інвертування теплового шуму обрана рівною 75 Гц , що виключає вплив завад від промислової мережі (50 Гц). Час усереднення синхронно детектованої

напруги обрано не більше, як 3 с . Відносна похибка вимірювання опорів високоомних об'єктів не перевищує $\pm 1,5\%$. При збільшенні часу усереднення до $5\text{--}10 \text{ с}$ похибку вимірювання можливо зменшити до $\pm 0,5\%$.



Фиг.