



УКРАЇНА

(19) UA (11) 42028 (13) U
(51) МПК (2009)
G01K 7/30МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ТЕРМОШУМОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

1

2

(21) u200814209

(22) 10.12.2008

(24) 25.06.2009

(46) 25.06.2009, Бюл. № 12, 2009 р.

(72) СКРИПНИК ЮРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ, ЛІСОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ, ВОДОТОВКА ВОЛОДИМИР ІЛЛІЧ

(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) Термощумовий вимірювач температури діелектричних матеріалів, що містить повторювач напруги, перетворювач струму в напругу, послідовно з'єднані смуговий фільтр, підсилювач напруги, квадратичний перетворювач і інтегратор, який **відрізняється** тим, що в нього додатково введені накладний ємнісний датчик з дисковим і кільцевим електродами, зразковий конденсатор, три електрично-керованих перемикачі, аналого-цифровий перетворювач, мікроконтролер і ЕОМ, з'єднаний своїм послідовним портом з одним цифровим вхо-

дом-виходом мікроконтролера, інший вхід-вихід якого з'єднаний із цифровим виходом аналого-цифрового перетворювача, аналоговий вхід якого з'єднаний з виходом інтегратора, перший логічний вихід мікроконтролера з'єднаний з керуючим входом першого електрично-керованого перемикача, один вхід якого з'єднаний з дисковим електродом накладного ємнісного датчика, кільцевий електрод якого заземлений, до іншого входу підключений заземлений зразковий конденсатор, а вихід з'єднаний із входом другого електрично-керованого перемикача, виходи якого з'єднані з потенційними входами повторювача напруги та перетворювача струму в напругу, виходи яких з'єднані з входами третього електрично-керованого перемикача, вихід останнього з'єднаний із входом смугового фільтра, а керуючі входи другого й третього електрично-керованих перемикачів з'єднані між собою й підключені до другого логічного виходу мікроконтролера.

Корисна модель відноситься до області шумової термометрії й може бути використана для виміру температури діелектричних матеріалів за значенням електричної потужності теплових шумів.

У будь-якому діелектричному матеріалі навіть при відсутності вільних електронів присутній тепловий шум, обумовлений наявністю термобудованих поляризованих молекул, які утворюють елементарні флюктуючі диполі (див. Ван-дер-Зил А. Шум. Источники, описание измерение / пер. с англ. - М: Сов. Радио, 1973, с.27-30). Рівень теплових шумів визначається дисипативними втратами в діелектричному матеріалі й пропорційний його термодинамічній температурі. Вимірявши напругу теплових шумів і оцінивши дисипативні втрати в матеріалі, можна судити про середню величину температури по товщині або об'єму діелектричного матеріалу.

Відомий термощумовий вимірювач температури діелектричних матеріалів (див. Коридорф С. Ф., Подорольский А. Н. Установка для измерения средней по толщине температуры диелектрика // Известия вузов. Приборостроение. - 1972, - Т15. -

№5. - с.18-24), який містить конденсатор, між пластинами якого розміщений зразок досліджуваного матеріалу, перенастроювальний по частоті коливальний контур, широкосмуговий підсилювач, резонансний підсилювач і квадратичний усереднюючий індикатор.

Температура матеріалу визначається за формою, в яку входить дисперсія напруги теплового шуму як самого коливального контуру, так і коливального контуру із приєднанням до нього конденсатором з матеріалом, а також значення відповідних добротностей коливальних контурів.

Однак у відомому термощумовому вимірювачі температури є залежність рівня шумової напруги не тільки від вимірюваної температури, але й від рівня діелектричних втрат у досліджуваному матеріалі. Останні оцінюються за тангенсом кута втрат ($\operatorname{tg}\delta$), що залежно від состава й властивостей діелектричного матеріалу може змінюватися в широкому діапазоні значень (від 10^{-4} до 10^{-1} і більше).

Відомий також термощумовий вимірювач температури діелектричних матеріалів (див. Саватеев А. В. Шумовая термометрия. Л.: Энергоатомиздат.

(13) U

(11) 42028

(19) UA

Ленингр. отд-ние, 1987, - с.93-95), що містить повторювач напруги, перетворювач струму в напругу, послідовно з'єднані смуговий фільтр, підсилювач напруги, квадратичний перетворювач і інтегратор. Крім того, він включає термоопір, дві схеми фіксації рівнів, перемножувач напруг, з'єднаний з виходами схем фіксації рівнів і реєстратор, підключений до виходу перемножувача напруг.

Завдяки тому, що вимірюваною величиною є не дисперсія напруги теплового шуму, а потужність теплового шуму, не потрібний вимір або знання рівня дисипативних втрат у досліджуваному матеріалі. Однак, наявність власного шуму перетворювача струму в напругу, повторювача напруги й шумів підсилювального тракту є джерелом систематичної похибки, розмір якої тим більше, чим нижче вимірювана температура й більше рівень цих шумів.

В основу корисної моделі покладене завдання створити такий термошумовий вимірювач температури діелектричних матеріалів, в якому шляхом введення нових елементів і зв'язків досягалось би можливість виключити вплив власних шумів елементів вимірювальної схеми на вимірювану температуру, що забезпечить підвищення точності виміру температури й розширення діапазону вимірювання температур в області низьких температур.

Поставлене завдання досягається тим, що в термошумовий вимірювач температури діелектричних матеріалів, що містить повторювач напруги, перетворювач струму в напругу, послідовно з'єднані смуговий фільтр, підсилювач напруги, квадратичний перетворювач і інтегратор, згідно з корисною моделлю, додатково ведені накладний ємнісний датчик з дисковим і кільцевим електродами, зразковий конденсатор, три електрично-керованих перемикача, аналого-цифровий перетворювач, мікроконтролер і ЕОМ, з'єднаний своїм послідовним портом з одним цифровим входом-виходом мікроконтролера, інший вхід-вихід якого з'єднаний із цифровим виходом аналого-цифрового перетворювача, аналоговий вхід якого з'єднаний з виходом інтегратора, перший логічний вихід мікроконтролера з'єднаний з керуючим входом першого електрично-керованого перемикача, один вхід якого з'єднаний з дисковим електродом накладного ємнісного датчика, кільцевий електрод якого заземлений, до іншого входу підключений заземлений зразковий конденсатор, а вихід з'єднаний із входом другого електрично-керованого перемикача, виходи якого з'єднані з потенційними входами повторювача напруги та перетворювача струму в напругу, виходи яких з'єднані з входами третього електрично-керованого перемикача, вихід останнього з'єднаний із входом смугового фільтра, а керуючі входи другого й третього електрично-керованих перемикачів з'єднані між собою й підключені до другого логічного виходу мікроконтролера.

Введення в схему термошумового вимірювача температури діелектричних матеріалів накладного ємнісного датчика з дисковим і кільцевим електродами, зразкового конденсатора, трьох електрично-

керованих перемикачів, аналого-цифрового перетворювача, мікроконтролера й ЕОМ, включених зазначеним чином, дає можливість здійснити за допомогою комп'ютерної програми поетапно чотири проміжних виміри. На першому етапі, при підключенні електродів накладного ємнісного датчика до вимірювальної схеми, вимірюється дисперсія напруги теплового шуму досліджуваного матеріалу разом із власними шумами повторювача напруги й смугового підсилювального тракту. На другому етапі, при перемиканні накладного ємнісного датчика на зразковий конденсатор, вимірюється дисперсія напруги власних шумів повторювача напруги й смугового підсилювального тракту. На третьому етапі, при перемиканні повторювача напруги на перетворювач струму в напругу, вимірюється дисперсія струмового шуму самого перетворювача струму в напругу разом із шумами смугового підсилювального тракту. На четвертому етапі, при перемиканні зразкового конденсатора на накладний ємнісний датчик, вимірюється дисперсія шумового струму досліджуваного матеріалу разом із власними шумами перетворювача струму в напругу та смугового підсилювального тракту. Наступна математична обробка проміжних результатів у ЕОМ по запропонованому алгоритмі забезпечує одержання кінцевого результату виміру температури без впливу власних шумів елементів вимірювальної схеми й значення дисипативних втрат у досліджуваному матеріалі, що забезпечує підвищення точності виміру температури й розширення діапазону вимірюваних температур в області низьких температур.

На кресленні представлена електрична функціональна схема термошумового вимірювача температури діелектричних матеріалів.

Схема вимірювача містить накладний ємнісний датчик 1 з дисковим електродом 2 і охоплюючим кільцевим електродом 3, що заземлений. Дисковий електрод 2 з'єднаний з одним входом першого електрично-керованого перемикача 4, до другого входу якого підключений заземлений зразковий конденсатор 5. Вихід першого електрично-керованого перемикача 4 з'єднаний із входом другого електрично-керованого перемикача 6, виходи якого з'єднані з потенційними входами повторювача напруги 7 та перетворювача струму в напругу 8. Виходи повторювача напруги 7 й перетворювача струму в напругу 8 з'єднані із входами третього електрично-керованого перемикача 9, до виходу якого підключені послідовно з'єднані смуговий фільтр 10, підсилювач напруги 11, квадратичний перетворювач 12 і інтегратор 13. Аналоговий вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 14 з'єднаний із входом інтегратора 13, а цифровий вихід з'єднаний з одним із цифрових входом-виходом мікроконтролера 15, інший цифровий вхід-вихід якого з'єднаний з послідовним портом ЕОМ 16. Перший логічний вихід мікроконтролера 15 з'єднаний з керуючим входом першого електрично-керованого перемикача 4, другий логічний вихід мікроконтролера з'єднаний з з'єднаними між собою керуючими входами другого й третього електрично-керованих перемикачів 6 і 9. Позицією 17 позначений досліджуваний діелектричний матеріал.

Термозумовий вимірювач температури діелектричних матеріалів працює в такий спосіб.

У досліджуваному діелектричному матеріалі 17, внаслідок теплових флуктуацій електричних зарядів поляризованих молекул речовини, виникає електрична шумова напруга. Середньоквадратичне (ефективне) значення цієї напруги відповідно до формули Найквіста визначається вираженням:

$$U_{n1} = \sqrt{4kT_X \Delta f \operatorname{Re} Z}, \quad (1)$$

де k - постійна Больцмана;

T_X - термодинамічна температура досліджуваного матеріалу;

Δf - смуга частот, у якій виділяється шумова напруга;

$\operatorname{Re} Z$ - активна складова повного опору досліджуваного матеріалу.

Шумова напруга (1) знімається електродом 2 накладного ємнісного датчика 1 відносно заземленого електрода 3. При паралельній схемі заміщення електродної системи 2-3 активна складова повного опору складає:

$$\operatorname{Re} Z = \operatorname{tg} \delta / [\omega C (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)], \quad (2)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат досліджуваного матеріалу;

C - ємність електродної системи накладного датчика;

ω - середня кругова частота смуги виділяємих частот теплового шуму.

З формули (2) треба, що в ідеальному діелектрику ($\operatorname{tg} \delta = 0$) діелектричні втрати відсутні й теплова шумова напруга не виникає. В електродах датчика із провідного матеріалу ($\operatorname{tg} \delta = \infty$) тепловий шум також практично відсутній. У реальному діелектричному матеріалі ($\operatorname{tg} \delta > 0$) теплова шумова напруга завжди присутня й згідно (1) пропорційна температурі.

По програмі, введеної в ЕОМ 16, мікроконтролер 15 виробляє керуючі сигнали, які по перших і другому логічних виходах встановлюють перемикачі 4, 6 і 9 у верхнє (по кресленню) положення. При цьому шумова напруга накладного ємнісного датчика 1 через повторювач напруги 7 з високим вхідним опором надходить на смуговий фільтр 10 і далі на підсилювач напруги 11. При смузі частот Δf посиленна шумова напруга:

$$U_{n2} = K_2 K_3 \sqrt{K_1 U_{n1}^2 + U_{n3}^2}, \quad (3)$$

де K_1 - коефіцієнт перетворення накладного ємнісного датчика 1, що залежить від геометричних розмірів електродів;

K_2 - коефіцієнт передачі смугового фільтра 10 у смузі частот Δf ;

K_3 - коефіцієнт підсилення підсилювача напруги 11;

U_{n3} - середньоквадратичне значення власних шумів повторювача напруги 7, смугового фільтра 10 і підсилювача напруги 11, приведені до входу повторювача напруги 7.

Миттєві значення посиленої шумової напруги (3) квадратовуються за допомогою квадратичного перетворювача 12 і усереднюються інтегратором 13. Постійна складова усередненої напруги:

$$U_1 = S_1 K_4 \bar{U}_{n2}^2, \quad (4)$$

де S_1 - крутизна квадратичного перетворювача 12;

K_4 - коефіцієнт передачі інтегратора 13;

«-» - символ часового усереднення.

З урахуванням (3) постійна напруга (4) приймає вид:

$$U_1 = S_1 K_2^2 K_3^2 K_4 (K_1^2 \bar{U}_{n1}^2 + \bar{U}_{n3}^2), \quad (5)$$

де \bar{U}_{n1}^2 та \bar{U}_{n3}^2 - дисперсії вимірюваної шумової напруги (1) і власних шумів смугового підсилювального тракту (7, 10 і 11).

Отримана постійна напруга (5) перетворюється в цифровий код за допомогою аналого-цифрового перетворювача 14. Цифровий код

$$\{N_1\} = U_1 / q, \quad (6)$$

де q - одиниця молодшого розряду АЦП 14, надходить у мікроконтролер 15, в якому запам'ятовується. На цьому перший етап вимірів завершується.

На другому етапі вимірів командою мікроконтролера 15 по першому логічному виходу електрично-керований перемикач 4 переводиться в нижнє положення. При цьому відбувається перемикання накладного ємнісного датчика 1 на зразковий конденсатор 5. Ємність зразкового конденсатора 5 вибирають рівної ємності накладного датчика 1 і з мінімальними втратами ($\operatorname{tg} \delta < 10^{-5}$). Шумовий струм повторювача напруги 7 на зразковому конденсаторі 5 створює практично те ж падіння шумової напруги, що й падіння напруги на електродній системі 2-3 накладного ємнісного датчика 1. При тій же смузі виділяємих частот Δf фільтра 10 шумова напруга на виході підсилювача напруги 11 (3) зменшується до значення

$$U_{n4} = K_2 K_3 U_{n3}, \quad (7)$$

яке визначається тільки власними шумами повторювача напруги 7, смугового фільтра 10 і підсилювача напруги 11. У квадратичному перетворювачі 12 і інтеграторі 13 шумову напругу (7) квадратовують, усереднюють і одержують друге значення постійної напруги:

$$U_2 = S_1 K_2^2 K_3^2 K_4 \bar{U}_{n3}^2, \quad (8)$$

де \bar{U}_{n3}^2 - дисперсія напруги власних шумів смугового підсилювального тракту, приведена до входу повторювача напруги 7.

За допомогою АЦП 14 формують другий цифровий код

$$\{N_2\} = U_2 / q, \quad (9)$$

який надходить у мікроконтролер 15 і запам'ятовується.

На третьому етапі вимірів командою мікроконтролера 15 по другому логічному виході електрично-керовані перемикачі 6 і 9 встановлюються в

нижнє положення. В результаті зразковий конденсатор 5 підключається до входу перетворювача струму в напругу 8 з низьким вхідним опором. Це означає режим короткого замикання зразкового конденсатора 5. Завдяки практичній відсутності власного теплового шуму у зразковому конденсаторі 5 вихідна напруга перетворювача струму в напругу 8 буде пропорційно тільки власним шумам цього перетворювача, тобто:

$$U_{n5} = S_2 i_{n1}, \quad (10)$$

де S_2 - крутизна перетворення струму в напругу перетворювача 8;

i_{n1} - середньоквадратичне значення шумового струму.

Миттєві значення шумової напруги (10) фільтруються в смуговому фільтрі 10, підсилюється підсилювачем 11, квадратується у квадратичному перетворювачі 12 і усереднюється інтегратором 13. В процесі цих перетворень до шумової напруги (10) додаються власні шуми смугового підсилювального тракту. Завдяки тому, що шуми перетворювача струму в напругу 8 не корельовані із шумами смугового підсилювального тракту, то третє значення постійної напруги на виході інтегратора 13:

$$U_3 = S_1 K_2^2 K_3^2 K_4 (S_2^2 i_{n1}^2 + \overline{U_{n4}}^2), \quad (11)$$

де i_{n1}^2 - дисперсія власного шумового струму перетворювача струму в напругу 8;

$\overline{U_{n4}}^2$ - дисперсія шумової напруги смугового підсилювального тракту, приведена до входу перетворювача 8.

За допомогою АЦП 14 формується третій цифровий код, що так само запам'ятовується в мікроконтролері 15:

$$\{N_3\} = U_3 / q, \quad (12)$$

На четвертому етапі вимірів командою мікроконтролера 15 по першому логічному виходу електрично-керований перемикач 4 знову вертається у верхнє положення. У результаті цього до входу перетворювача струму в напругу 8 з низьким вхідним опором підключається накладний ємнісний датчик 1. Завдяки тому, що внутрішній опір накладного ємнісного датчика 1 як джерело теплового шуму надто більше вхідного опору перетворювача струму в напругу 8, то шумовий струм у досліджуваному матеріалі 17 визначається тільки активною складовою його повного опору (2). З урахуванням цього шумовий середньоквадратичний струм:

$$i_{n2} = \sqrt{\frac{4kT_X \Delta f}{Re Z}}, \quad (13)$$

Вихідна шумова напруга на виході перетворювача струму в напругу 8 у порівнянні з напругою (10) збільшиться до значення:

$$U_{n6} = S_2 \sqrt{i_{n1}^2 + K_1^2 i_{n2}^2}, \quad (14)$$

де K_1 - коефіцієнт, що визначає передатні властивості накладного ємнісного датчика 1.

Відповідно збільшується постійна напруга на виході інтегратора 13. З урахуванням власних шумів

мів смугового підсилювального тракту четверте значення постійної напруги:

$$U_4 = S_1 K_2^2 K_3^2 K_4 (S_2^2 (i_{n1}^2 + K_1^2 i_{n2}^2) + \overline{U_{n4}}^2), \quad (15)$$

де i_{n2}^2 - дисперсія шумового струму матеріалу накладного ємнісного датчика 1.

За допомогою АЦП 14 формується четвертий код

$$\{N_4\} = U_4 / q, \quad (16)$$

який надходить у мікроконтролер 15 і також запам'ятовується.

З пам'яті мікроконтролера 15 цифрові коди $\{N_1\}$, $\{N_2\}$, $\{N_3\}$ і $\{N_4\}$ по інтерфейсу передаються в ЕОМ 16, де по завершенні четвертого етапу (отриманні нового значення N_4) обчислюється результуючий код по формулі:

$$\{N_5\} = \sqrt{(\{N_1\} - \{N_2\})(\{N_4\} - \{N_3\})} = \sqrt{(U_1 - U_2)(U_4 - U_3)} / q. \quad (17)$$

Підставляючи у вираз (17) значення напруг (5), (8), (11) і (15) отримуємо:

$$\{N_5\} = S_1 S_2 K_1^2 K_2^2 K_3^2 K_4 U_{n1} i_{n2} / q. \quad (18)$$

Підставивши у вираз (18) значення шумової напруги U_{n1} з (1) і шумового струму i_{n2} з (13), остаточно отримуємо:

$$\{N_5\} = \frac{S_0 T_X}{q}, \quad (19)$$

де $S_0 = 4S_1 S_2 K_1^2 K_2^2 K_3^2 K_4 \Delta f$ - результуюча крутизна перетворення добутку шумової напруги й струму, тобто потужності, у температуру досліджуваного матеріалу.

Як видно з формули (19) результуючий код N_5 пропорційний температурі діелектричного матеріалу й не залежить від активної складової повного опору цього матеріалу, тобто від рівня дисипативних втрат ($\text{tg} \delta$) і ємності накладного датчика (С). При цьому результуюча крутість перетворення (S_0) не залежить від рівня власних шумів елементів вимірювальної схеми, а саме: шумів повторювача напруги 7, перетворювача струму в напругу 8, смугового фільтра 10, підсилювача напруги 11, квадратичного детектора 12 і інтегратора 13. Виключення впливу власних шумів вимірювальних перетворювачів шумового струму й напруги, а також смугового підсилювального тракту на результуючий код N_5 забезпечує підвищення точності виміру температури й дає можливість виміру низьких температур, коли вимірюваний шум стає співрозмірним із власними шумами вимірювального пристрою.

Результуюча крутизна перетворення визначається в процесі калібрування термшумового вимірювача.

Для цього діелектричний матеріал нагрівається до відомої температури калібрування T_K й визначається відповідний цифровий код:

$$\{N_K\} = \frac{S_0 T_K}{q}. \quad (20)$$

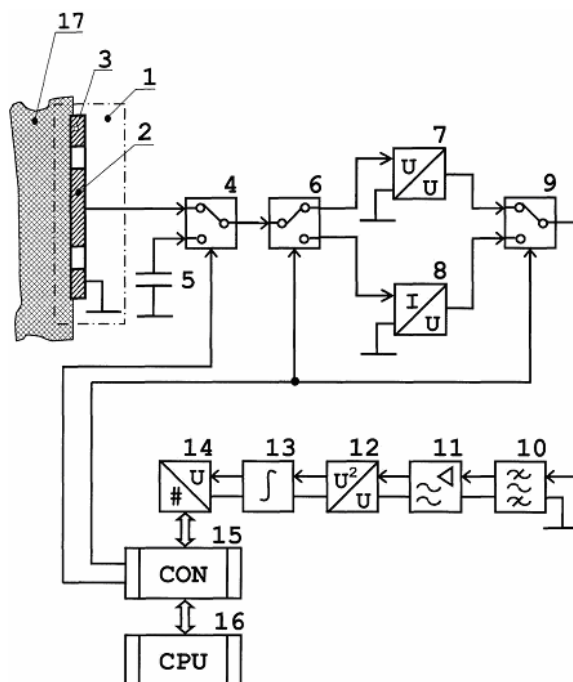
Якщо підставити значення результуючої крутості перетворення S_0 з (20) у вираження (19), то одержимо безпосередньо значення вимірюваної температури:

$$T_X = \frac{\{N_5\}}{\{N_K\}} T_K. \quad (21)$$

Значення каліброваної температури у вигляді цифрового коду N_K вводиться до пам'яті ЕОМ 16. У процесі вимірів обчислюється результуючий код $\{N_5\}$ і відповідно до формули (21) з урахуванням N_K визначається невідома температура T_X . Завдяки тому, що в запропонованому пристрої виключений вплив дисипативних втрат у матеріалі на його температуру, то калібрування може бути проведено на одному будь-якому діелектричному матеріалі, а виміри будуть достовірні для різноманітних асортиментів діелектричних матеріалів.

Використання запропонованого термошумового вимірювача температури в технологічних сертифікаційних випробуваннях дозволить:

- контролювати внутрішню температуру діелектричних матеріалів з низькою теплопровідністю й значним температурним градієнтом (будівельні, ізоляційні, оздоблювальні й ін. матеріали);
- виявляти порожнечі й розшарування в композиційних полімерних матеріалах по різниці внутрішньої й зовнішньої температури;
- контролювати й керувати середньою температурою розплавів полімерів в екструдерах при виготовленні полімерних виробів літцевими машинами;
- використовувати в медичній практиці для оцінки температури внутрішніх органів, різних пухлин і аномалій;
- оптимізувати процес розморожування харчових продуктів в електромагнітних полях, в яких традиційні датчики температури нагріваються.



Фіг.