



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 52659

(13) C2

(51) 7 G01K7/30

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) РАДІОТЕПЛОВИЙ ТЕРМОМЕТР

1

2

(21) 98116155

(22) 23 11 1998

(24) 15 01 2003

(46) 15 01 2003, Бюл. №1, 2003р

(72) Скрипник Юрій Олександрович, Потапов Ана-
толій Олександрович, Іващенко Володимир
Олександрович(73) Державна академія легкої промисловості Ук-
раїни, Товариство з обмеженою відповідальністю
"Вікторія"(56) Саватеев А В Шумовая термометрия, Л,
Энергоатомиздат, 1987г, с 69 - 70(57) Радіотепловий термометр, що містить рупор-
ну антену, послідовно з'єднані балансний
змішувач, підсилювач проміжної частоти, квадра-
тичний детектор, підсилювач низької частоти, син-
хронний детектор і інтегратор, НВЧ гетеродин,
перший вентиль, вихід якого з'єднаний з другим
входом балансного змішувача і цифровий вольт-
метр, підключений до виходу інтегратора, який

відрізняється тим, що в нього введені послідовно
з'єднані НВЧ переривник-відбивач, тривходовий
циркулятор і загороджувальний фільтр, вихід якого
з'єднаний з входом балансного змішувача, а вхід
НВЧ переривника-відбивача підключений до вихо-
ду рупорної антени, другий вентиль і двоплечий
подільник потужності, вхід якого з'єднаний з вихо-
дом НВЧ гетеродина, вихід першого плеча
з'єднаний з входом першого вентиля, вихід другого
плеча з'єднаний з входом другого вентиля,
послідовно з'єднані генератор проміжної частоти,
керований атенюатор, амплітудний модулятор і
третій вентиль, вихід якого з'єднаний з третім вхо-
дом тривходового циркулятора, другий вхід керованого
атенюатора з'єднаний з виходом
інтегратора, а другий вхід амплітудного модулято-
ра з'єднаний з виходом другого вентиля, генера-
тор низької частоти, вихід якого з'єднаний з другим
входом НВЧ переривника-відбивача і другим вхо-
дом синхронного детектора

Винахід стосується термометрів, які викорис-
товують залежність інтенсивності шумового радіо-
випромінювання від температури, і може бути ви-
користаний для дистанційного виміру температури
труднодоступних об'єктів, таких як ядерні реакто-
ри, печі металургійного і реактори хімічного виро-
бництва, ротори генераторів, тягових двигунів і т.п.

Кожне нагріте тіло випромінює електромагніт-
ні хвилі в широкому діапазоні довжин хвиль. Най-
більша інтенсивність випромінювання співпадає з
інфрачервоним діапазоном довжин хвиль (ІЧ). Од-
нак ІЧ випромінювання екранується, як правило,
елементами конструкції контрольованого об'єкту.
Але, в багатьох випадках, конструктивні елементи
з цегли, кераміки і інших теплоізолюючих матеріа-
лів радіопрозорі для випромінювання більш довгих
хвиль, ніж ІЧ, наприклад для надвисоких час-
тот (НВЧ).

Випромінювальна здатність нагрітих тіл в діа-
пазоні НВЧ радіохвиль (1 – 300 ГГц) підкоряється
закону Релея-Джинса

$$B = \frac{2f^2 k T \beta}{c^2}$$

Де f - частота, k - постійна Больцмана, T - тем-
пература, β - коефіцієнт випромінювання (сірості), c -
швидкість світла в вакуумі

З цього закону випливає, що чим вище часто-
та, тим більше випромінювальна здатність нагріто-
го тіла. Тому на НВЧ найбільш прийнятним діапа-
зоном довжин хвиль є міліметровий (30 – 300 ГГц)
діапазон, в якому більшість діелектричних матеріа-
лів є радіопрозорими. За своїм характером радіо-
теплове випромінювання є шумовим і по структурі
не відрізняється від теплових шумів в провіднику.

Відомий радіотепловий термометр [див. Вік-
торов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиово-
лновые измерения параметров технологических
процессов - М. Энергоатомиздат, 1989, С. 196 -
197], що містить рупорну антену, встановлену в
циліндрі, який обертається, виконаному з радіо-
прозорого матеріалу, і радіоприймача, що включає
змішувач з гетеродином, підсилювач проміжної
частоти і квадратичний детектор, до виходу якого

(13) C2

(11) 52659

(19) UA

підключений індикатор

Принцип дії радіотеплового термометра оснований на реєстрації електромагнітної енергії, що випромінюється контрольованим об'єктом в діапазоні міліметрових хвиль. Величина випромінюваної енергії у відповідності з формулою Планка пропорційна температурі об'єкту в широкому температурному діапазоні. Тому шкала індикатора градується безпосередньо в градусах по значенню продетектованого сигналу на виході квадратичного детектора, пропорційного потужності НВЧ сигналу, що приймається. Однак нижня межа потужності сигналу, що приймається, обмежена потужністю шумів гетеродину і змішувача. Тому чутливість і точність такого термометра обмежена і знаходиться в межах 2 - 3°C в температурному діапазоні до 2000°C.

Відомий також радіотепловий термометр [див. Саватеев А. В., Шумовая термометрия Л. Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987, С 69 - 70], який включає рупорну антену, послідовно з'єднані балансний змішувач, підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, підсилювач низької частоти, синхронний детектор і інтегратор, НВЧ гетеродин, перший ventиль, вихід якого з'єднаний з другим входом балансного змішувача і цифровий вольтметр, підключений до виходу інтегратора. Крім того відомий радіотепловий термометр містить послідовно з'єднані хвильоводний графітовий датчик і мікрохвильовий перемикач, виконаний у вигляді хвильоводного сегменту з пазом, в якому обертається диск, половина диску заповнена абсорбційним матеріалом і слугує джерелом теплового шуму при кімнатній температурі, індуктивний датчик частоти обертання диску мікрохвильового перемикача і формувач опорної напруги, вхід якого з'єднаний з виходом індуктивного датчика, а вихід з'єднаний з керуючим входом синхронного детектора.

Шумові сигнали від навантаженого хвильоводу і абсорбційного матеріалу диску по чергово перетворюються, і посилюються одноканальним модуляційним трактом, де власні шуми тракту виключаються з результату виміру. Однак нестійкість і флюктуаційна нестабільність параметрів одноканального тракту не дозволяють знизити похибку вимірів менш 1 - 2%.

Джерелом ще однієї складової похибки виміру є ступінь сірості об'єкту випромінювання β -коефіцієнт випромінювання, який, як правило, невідомий. Оскільки β міняється в широких межах (від 0,3 до 0,95), то виникає велика методична похибка.

В основу винаходу покладена задача створення такого радіотеплового термометра, в якому шляхом введення нових елементів і зв'язків виключився вплив нестабільності параметрів підсилювально-перетворювального тракту термометра і коефіцієнта випромінювання на результат виміру температури, завдяки чому підвищиться чутливість термометра до температури і знизиться похибка вимірів.

Поставлена задача вирішується там, що в радіотепловий термометр, що містить, рупорну антену, послідовно з'єднані балансний змішувач, підсилювач проміжної частоти, квадратичний де-

тектор, підсилювач низької частоти, синхронний детектор і інтегратор, НВЧ гетеродин, перший ventиль, вихід якого з'єднаний з другим входом балансного змішувача, і цифровий вольтметр, підключений до виходу інтегратора, згідно винаходу введені послідовно з'єднані НВЧ переривач-відбивач, трьохвходовий циркулятор і загороджувальний фільтр, вихід якого з'єднаний з входом балансного змішувача, а вхід НВЧ переривача-відбивача підключений до виходу рупорної антени, другий ventиль і двоплечний подільник потужності, вихід якого з'єднаний з виходом НВЧ гетеродина, вихід першого плеча з'єднаний з входом першого ventиля, вихід другого плеча з'єднаний з входом другого ventиля, послідовно з'єднані генератор проміжної частоти, керований атенюатор, амплітудний модулятор і третій ventиль, вихід якого з'єднаний з третім входом трьохвходового циркулятора, другий вхід керованого атенюатора з'єднаний з виходом інтегратора, а другий вхід амплітудного модулятора з'єднаний з виходом другого ventиля, генератор низької частоти, вихід якого з'єднаний з другим входом НВЧ переривача-відбивача і другим входом синхронного детектора.

Саме введення в схему термометра НВЧ переривача-відбивача, трьохвходового циркулятора і загороджувального фільтру між рупорною антенною і балансним змішувачем, підключення до третього входу трьох входового циркулятора амплітудного модулятора, входи якого підключені з одного боку до генератора проміжної частоти, через що керований атенюатор управляється його вихідним сигналом, з іншого боку до НВЧ генератора через подільник потужності, а також управління НВЧ переривача-відбивача і синхронного детектора від генератора низької частоти, забезпечують виключення впливу нестабільності параметрів підсилювально-перетворювального тракту термометра на результат виміру, а також впливу нестабільності коефіцієнта випромінювальної здатності об'єкту на температуру, яка вимірюється, що дозволяє підвищити чутливість термометра до температури і знизити похибку вимірів.

На фіг 1 подана функціональна блок-схема радіотеплового термометра, на фіг 2 - спектри перетворення.

Термометр містить послідовно з'єднані рупорну антену 1, НВЧ переривач-відбивач 2, трьохвходовий циркулятор 3, загороджувальний фільтр 4, балансний змішувач 5, підсилювач проміжної частоти 6, квадратичний детектор 7, вибірний підсилювач 8 низької частоти, синхронний детектор 9 і інтегратор 10, послідовно з'єднані генератор 11 проміжної частоти, керований атенюатор 12, другий вхід якого підключений до виходу інтегратора 10, амплітудний модулятор 13 і третій ventиль 14, з'єднані виходом з третім входом циркулятора 3, НВЧ гетеродин 15, підключений через двоплечний подільник потужності 16, перший ventиль 17 і другий ventиль 18, до другого входу балансного змішувача 5 і амплітудного модулятора 13, генератор 19 відповідно низької частоти, підключений до других входів НВЧ переривача-відбивача 2 і синхронного детектора 9, і цифровий вольтметр 20, підключений також до виходу інтегратора 10. Позицією 21 позначений об'єкт контролю.

Радіотепловий термометр працює таким чином. Рупорною антеною 1 (фіг 1) приймається широкопasmовий (шумовий) сигнал НВЧ діапазону хвиль в смузі $\Delta\omega$ (фіг 2, а). Ширина смуги сигналу, що приймається, визначається смугою пропускання антени і інших перетворювальних елементів тракту надвисоких частот. У відкритому стані НВЧ переривача-відбивача 2 (фіг 1) шумовий сигнал проходить крізь циркулятор 3, загороджувальний фільтр 4, частота подавлення якого вибрана рівній частоті ω_r (фіг 2, б) НВЧ гетеродина 15, і поступає на вхід балансного змішувача 5. В балансному змішувачі відбувається змішування прийнятого широкопasmового сигналу з монохроматичним сигналом НВЧ гетеродина ω_r , в результаті якого утворюються сигнали різносної (проміжної) частоти ω_p . В смугу пропускання $\Delta\omega_p$ (фіг 2, в) підсилювача проміжної частоти 6 (фіг 1) попадуть перетворені по частоті спектральні складові радіотеплового випромінювання, що відстоять від частоти гетеродину ω_r на значення проміжної частоти ω_p (фіг 2, б).

В смугу прийому радіотеплового випромінювання на третій вхід циркулятору 3 надходить сигнал НВЧ гетеродину 15, модульований по амплітуді в модуляторі 13 сигналом генератора 11 проміжної частоти. Модульований сигнал проходить крізь відкритий переривач-відбивач 2 і випромінюється рупорною антеною 1 в напрямку об'єкту, що досліджується 21. Якщо об'єкт не має властивостей абсолютно чорного тіла ($\beta < 1$), то частина відбитого сигналу знов приймається антеною 1, відбитий сигнал через відкритий переривач-відбивач 2, циркулятор 3 і загороджувальний фільтр 4 надходить також на вхід балансного змішувача 5. Оскільки загороджувальний фільтр 4 не пропускає сигнал частоти ω_r , то на вході змішувача діятимуть тільки сигнали бокових частот $\omega_r \pm \omega_p$ модульованого НВЧ сигналом. В результаті змішування з сигналом гетеродину ω_r підсилювачем проміжної частоти 6 виділяються сигнали різносної частоти ω_p . Через те, що сигнал гетеродину 11 не зкорельований з спектральними складовими радіотеплового випромінювання, дисперсію сумарного сигналу на виході підсилювача проміжної частоти 6 можна записати у вигляді

$$(U_1^2)^2 = S_1 k_1 \{ (\beta \bar{V}_1 \bar{V}_2)^2 + [(1-\beta) \bar{K}_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2]^2 + (\bar{V}_4 \bar{V}_2)^2 \} \quad (1)$$

Де S_1 - крутизна частотного перетворення,

K_1 - коефіцієнт підсилення підсилювача проміжної частоти,

β - коефіцієнт випромінювання (сіроти) об'єкту,

K_0 - коефіцієнт пропорційності,

V_1^2 - амплітуда радіотеплового випромінювання в смузі перетворення,

V_2 - амплітуда напруги НВЧ гетеродину,

V_3 - амплітуда напруги гетеродину проміжної частоти,

V_4^2 - амплітуда власних шумів в смузі перетворення

НВЧ переривач-відбивач 2, коли закритий, працює по принципу повного відбивання НВЧ сигналу. Тому в інтервалі часу відбивання радіотеплового випромінювання на балансний змішувач 5 надходить модульований сигнал НВЧ гетеродину, що через циркулятор 3 падає на закритий перери-

вач-відбивач 25 відбивається від нього і знов через циркулятор 3 і фільтр 4 попадає на вхід балансного змішувача 5. З урахуванням власних шумів дисперсія сумарного сигналу на виході підсилювача проміжної частоти 6

$$(U_1^2)^2 = S_1 k_1 \{ (K_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2)^2 + (\bar{V}_4 \bar{V}_2)^2 \} \quad (2)$$

В результаті періодичних переривань сигналу радіотеплового випромінювання на виході підсилювача проміжної частоти 6 формується низько-частотна послідовність радіоімпульсів з амплітудами, пропорційними дисперсіям (1) і (2). В результаті детектування радіоімпульсів квадратичним детектором 7 утворюються відеоімпульси з амплітудами

$$(U_2^1) = S_1^2 k_1 S_2 \{ (\beta \bar{V}_1 \bar{V}_2)^2 + [(1-\beta) \bar{K}_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2]^2 + (\bar{V}_4 \bar{V}_2)^2 \} \quad (3)$$

$$(U_1^1) = S_1^2 k_1 S_2 \{ (K_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2)^2 + (\bar{V}_4 \bar{V}_2)^2 \} \quad (4)$$

Де S_2 - крутизна перетворення квадратичного детектора

З послідовності відеоімпульсів з амплітудами (3) і (4) підсилювачем 8 низької частоти виділяється і посилюється змінна складова напруги. Підсилювач настроєний на низьку частоту Ω генератора 19, з якою слідує радіо і відеоімпульси. Через обмеженість смуги пропускання $\Delta\Omega$ підсилювача (фіг 2, г) його вихідна напруга може бути представлена у вигляді суми двох складових

$$U_3(t) = K_2 \frac{U_2^1 - U_1^1}{2} \text{SignSin} \Omega t + V_5(t) \quad (5)$$

Де K_2 - коефіцієнт підсилення низькочастотного підсилювача, V_5 - вузькосмуговий шумовий сигнал в смузі пропускання низькочастотного підсилювача, зумовлений флуктуаціями коефіцієнта підсилення підсилювача проміжної частоти. Підставляючи в вираз (5) значення амплітуд (3) і (4), одержуємо

$$U_3(t) = 0.5 S_1^2 k_1 S_2 k_2 \{ (\beta \bar{V}_1 \bar{V}_2)^2 + [(1-\beta) \bar{K}_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2]^2 + (K_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2)^2 \} \text{SignSin} \Omega t + V_5(t) \quad (6)$$

В результаті перемноження в синхронному детекторі 9 прямокутної керуючої напруги $\text{SignSin} \Omega t$ з посиленою напругою (6) формується постійна складова напруги і шумова складова

$$U_4 = \alpha \{ (\beta \bar{V}_1 \bar{V}_2)^2 + [(1-\beta) \bar{K}_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2]^2 + (K_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2)^2 \} + V_6(t) \quad (7)$$

Де $\alpha = 0.5 S_1^2 S_2 k_1 k_2 k_3$ - результуючий коефіцієнт перетворення підсилювально-перетворювального тракту, K_3 - коефіцієнт випрямлення синхронного детектора, $V_6(t)$ - напруга шумової складової

Випрямлена напруга U_4 з низькочастотними шумами $V_6(t)$ заряджає інтегратор 10. При достатньо великій постійній часу τ інтегратора ($\tau = 2.5 \text{ сек}$) шумова напруга усереднюється ($V_6(t) = 0$), а вихідна напруга зростає і збільшує коефіцієнт передачі K_0 атенюатора 12. Із зростанням K_0 постійна складова напруга (7) прямує до нуля, бо радіотеплове випромінювання компенсується сигналом бокових частот. При нульовому значенні випрямленої напруги заряд інтегратора 10 припиняється, а його вихідна напруга утримує значення K_0 , при якому

$$\{ (\beta \bar{V}_1 \bar{V}_2)^2 + [(1-\beta) \bar{K}_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2]^2 = (K_0 \bar{V}_3 \bar{V}_2)^2 \} \quad (8)$$

Вирішивши рівняння (8) відносно коефіцієнта передачі атенюатора K_0 по потужності, одержуємо

$$K_0 = \frac{\bar{V}_1^2}{V_3^2} \quad (9)$$

Враховуючи, що коефіцієнт передачі атенюатора 12 по потужності пропорційний керуючій напрузі U_5 з виходу інтегратора 10, остаточно отримаємо

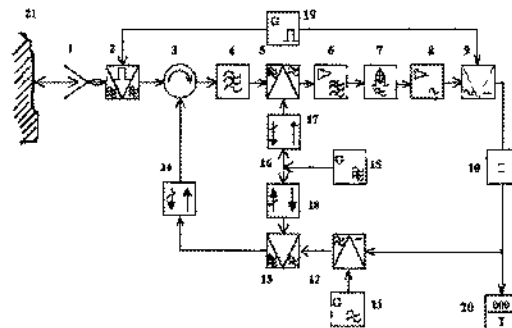
$$U_5 = \frac{\bar{V}_1^2}{S_3 V_3^2} \quad (10)$$

Де S_3 - крутизна перетворення по керуючому входу атенюатора

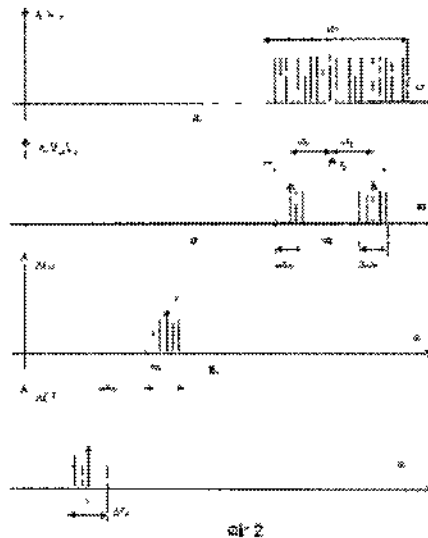
Оскільки вихідну напругу генератора 11 проміжної частоти достатньо просто застабілізувати ($V_3 = \text{Const}$), а керований атенюатор для проміжної частоти можна виконати із стабільною характеристикою ($S_3 = \text{Const}$), то вихідна

напруга інтегратора буде пропорційна потужності радіо теплового випромінювання \bar{V}_1^2 , а значить пропорційна температурі об'єкту. Вихідна напруга інтегратора 10 вимірюється цифровим вольтметром 20. При цьому, як випливає із співвідношення (10), результат виміру не залежить від коефіцієнта випромінювання об'єкту β і нестабільності параметрів підсилювально-перетворювального тракту (S_1, S_2, K_1, K_2 і K_3). Не впливає також на результат виміру і нестабільність потужності НВЧ гетеродину (\bar{V}_3^2). Тому підвищується чутливість схеми до температури об'єкту і знижуються інструментальна і методична похибки виміру.

При контролі температури в газових печах в діапазоні 900 - 1200°C запропонований термометр має поріг чутливості на рівні 0.03 - 0.05°C, а похибка виміру не перевищує 0.5°C.



Фиг. 1



Фиг. 2