

Винахід відноситься до пристроїв безконтактного вимірювання температури важкодоступних тіл чи середовищ по випромінюванню в широкому спектральному діапазоні довжин хвиль і може бути використаний в області вимірювальної техніки.

Відомий радіаційний пірометр (див. А.с. СРСР №1584530, кл. G01J5/22, бюл. №34, 1995), що містить оптично зв'язані оптико-механічну систему і приймач випромінювання, вихід якого через підсилювач і синхронний детектор з'єднаний з регістратором, а також блок синхронізації, зв'язаний з оптико-механічною системою, і фазозсувну схему, вихід якої приєднаний до управляючого входу синхронного детектора, а вихід - до першого виходу блока синхронізації, крім того радіометр містить опорний випромінювач, оптично спряжений з оптико-механічною системою, і блок пошуку екстремуму, а фазозсувна схема виконана керуючою, при цьому вхід керування фазозсувної схеми з'єднаний з виходом блока пошуку екстремуму, вхід якого приєднаний до виходу синхронного детектора, а вхід керування - до другого виходу блока синхронізації.

Даному пристрою властива недостатня точність вимірювань температури, яка обумовлена тим, що фотоприймач має нелінійну, довгострокову і температурну нестабільність функції перетворення. Останнє обумовлює появу похибки нелінійної, адитивної і мультиплікативної складових систематичної похибки. До того ж, фотоприймач чутливий до впливу температури оточуючого середовища. Це призводить до появи додаткових похибок результату вимірювань. Термостатування фотоприймача і підсилювача тільки частково забезпечує зменшення згаданих похибок і потребує створення термостатів з похибкою термостатування не гірше, ніж $\pm 0,1^\circ\text{K}$.

Відомий радіаційний пірометр (див. патент України №18417 С1, кл. G01J5/12, бюл. №6, 1997), який містить пірометр повного випромінювання, до виходу якого підключений аналогово-цифровий перетворювач, кодові виходи якого з'єднані з шиною даних системи обробки з цифровим індикатором, напівпрозоре дзеркало, вбудований електронагрівач, нейтральний фільтр з пристроєм вводу-виводу фільтра, причому пристрій обладнано двома цифроаналоговими перетворювачами, вивід першого з них підключений до керуючого входу пристрою вводу-виводу фільтра, електроди нагрівача підключені до виходу другого цифроаналогового перетворювача, кодові виходи цифроаналогових перетворювачів з'єднані з системою обробки, напівпрозоре дзеркало, яке розміщене поза фокусуючою системою пірометра під кутом 45° до ортогональних потоків основного і додаткового теплових випромінювань пірометра, а фільтр, який водиться, розташований між дзеркалом і фотоприймачем пірометра.

У відомому пристрою припускається, що фотоприймач має лінійну функцію перетворення (ФП), тоді як більшість фотоприймачів мають нелінійну ФП. Нелінійність ФП та нестабільність її параметрів приводить до появи нелінійної складової похибки результату вимірювання температури. В відомому пірометрі не вирішується задача корекції нелінійної складової похибки. Чутливість пірометра залежить тільки від чутливості фотоприймача. В цілому відомий радіаційний пірометр не забезпечує високу точність і чутливість вимірювання.

Відомий також радіаційний пірометр (див. патент України №55947, кл. G01J5/08, бюл. №4, 2003), що містить оптично з'єднані між собою по основній оптичній осі заслінку, яка екранує потік випромінювання, перший скляний об'єктив, перший сірий клин, дзеркальну польову діафрагму, другий сірий клин, обтюраторний диск із синхронним двигуном, апертурну діафрагму, другий скляний об'єктив, світлофільтр, та канал візуалізації зображення об'єкта дослідження, який складається з третього скляного об'єктива та відбивного дзеркала, послідовно розташовані на додатковій оптичній осі параболічне дзеркало, додатковий світлофільтр, фокусуючу лінзу та світловипромінюючий діод, додатковий світловипромінюючий діод і фотоприймач-формував синхроімпульсів, які розташовані по обидві сторони від обтюраторного диска, перший, другий, третій перетворювачі "код-переміщення", МДМ-підсилювач, загальну шину, мікропроцесор з клавіатурою, реєстр числа, цифровий відліковий пристрій, цифроаналоговий перетворювач, електронний стабілізатор температури, через загальну шину з'єднані між собою мікропроцесор з клавіатурою, реєстр числа, цифровий відліковий пристрій, цифроаналоговий перетворювач та електронний стабілізатор температури, електронний стабілізатор температури має тепловий зв'язок з МДМ-підсилювачем, вхід синхронізації МДМ-підсилювача з'єднаний з виходом фотоприймача-формувача синхроімпульсів, вихід цифроаналогового перетворювача підключений до світловипромінюючого діоду, заслінка, що екранує потік випромінювання, з'єднана з першим перетворювачем "код-переміщення", інформативні входи якого підключені до однойменних входів другого та третього перетворювачів "код-переміщення", виходи яких механічно з'єднані відповідно з першим та другим сірими клинами, цифрові виходи a, b, c мікропроцесора підключені до об'єднаних між собою інформативних входів першого, другого і третього перетворювачів "код-переміщення", керуючі виходи f, d, e яких підключені до відповідних виходів реєстра числа. Крім того, радіаційний пірометр містить підсилювач-формував синхроімпульсів, фотодіод, дешифратор та аналого-цифровий перетворювач.

Даному пірометру властива низька точність вимірювань температури в широкому її діапазоні, що обмежує область застосування пірометра. Це обумовлено обмеженням діапазоном довжин хвиль випромінювання, що поступає на фотодіод. Крім того, фотодіоди не призначені для вимірювання радіаційної температури. Використання аналого-цифрового перетворювача також обмежує точність та чутливість вимірювання по причині недостатньої розрядності.

В основу винаходу покладена задача створити такий радіаційний пірометр, в якому введення нових елементів та їх зв'язків забезпечило б підвищення точності і чутливості вимірювання температури важкодоступних об'єктів в широкому діапазоні температур.

Поставлена задача вирішується тим, що в радіаційному пірометрі, що містить оптично з'єднані між собою по одній оптичній осі заслінку, яка екранує потік випромінювання, перший скляний об'єктив, перший сірий клин, дзеркальну польову діафрагму, другий сірий клин, обтюраторний диск із синхронним двигуном, апертурну діафрагму, другий скляний об'єктив, перший світлофільтр, та канал візуалізації зображення об'єкта дослідження, який включає третій скляний об'єктив та відбивне дзеркало, послідовно розташовані на другій оптичній осі параболічне дзеркало, другий світлофільтр, фокусуючу лінзу та світловипромінюючий діод, додатковий світловипромінюючий діод і фотоприймач-формував синхроімпульсів, які розташовані по обидві сторони від

обтюраторного диска, перший, другий, третій перетворювачі "код-переміщення", МДМ-підсилювач (модулятор-демодулятор), загальну шину, через яку з'єднані між собою мікропроцесор з клавіатурою, регістр числа, цифровий відліковий пристрій, цифроаналоговий перетворювач та електронний стабілізатор температури, при цьому електронний стабілізатор температури має тепловий зв'язок з МДМ-підсилювачем, вхід синхронізації МДМ-підсилювача з'єднаний з виходом фотоприймача-формувача синхроімпульсів, вихід цифроаналогового перетворювача підключений до світловипромінюючого діоду, заслінка, яка екранує потік випромінювання, з'єднана з першим перетворювачем "код-переміщення", інформативні входи якого підключені до однойменних входів другого та третього перетворювачів "код-переміщення", виходи яких механічно з'єднані відповідно з першим та другим сірими клинами, цифрові виходи a, b, c мікропроцесора підключені до об'єднаних між собою інформативних входів першого, другого і третього перетворювачів "код-переміщення", керуючі виходи f, d, e яких підключені до відповідних виходів регістра числа, згідно з винаходом, додатково введені болометр, фільтр нижніх частот, формувач імпульсів, змішувач частот, генератор опорної частоти, генератор змінної частоти та термочутливий п'єзореzonаторний перетворювач, який включає п'єзореzonатор та нагрівальний елемент, підключений до виходу МДМ-підсилювача, п'єзореzonатор підключений до генератора змінної частоти, вихід якого з'єднаний з сигнальним входом змішувача частот, вхід керування останнього підключений до виходу генератора опорної частоти, а вихід через послідовно з'єднані фільтр нижніх частот та формувач імпульсів підключений до аналогового входу мікропроцесора, болометр розташований по одній оптичній осі за світлофільтром і підключений до входу МДМ-підсилювача.

Введення в радіаційний пірометр болометра, термочутливого п'єзореzonаторного перетворювача, генератора змінної частоти, генератора опорної частоти, змішувача частот, фільтра нижніх частот та формувача імпульсів забезпечує виключення нелінійної, мультиплікативної і адитивної складової похибки вимірювань температури.

Одержані результати проміжних вимірювань інтенсивності корегуючих потоків випромінювання разом з результатом вимірювання інтенсивності інформативного потоку випромінювання обчислюються за алгоритмом, який задає послідовність фактів вимірювання та враховує нелінійність ФП вимірювального каналу, що містить послідовно з'єднані болометр, МДМ-підсилювач, термочутливий п'єзореzonаторний перетворювач, генератора змінної частоти, генератора опорної частоти, змішувача частот, фільтра нижніх частот та формувач імпульсів. Це дає можливість лінеаризувати загальну функцію перетворення пірометра та визначити з високою точністю дійсне значення температури.

За рахунок використання потрібного перетворення променевої енергії у частоту електричних сигналів генератора стало можливим підвищення чутливості радіаційного пірометра за рахунок усереднення дії випадкових завад та шумів.

Використання теплочутливого п'єзореzonаторного перетворювача, який має високу чутливість перетворення теплової енергії в частоту (на частоті 20 МГц основної гармоніки п'єзоелемента Y-зрізу чутливість дорівнює 18 кГц/°C), разом з болометром забезпечують загальне підвищення чутливості більш ніж на порядок.

На кресленні показана структурна комбінована схема радіаційного пірометра.

Вздовж однієї оптичної осі послідовно розташовані заслінка 1, яка екранує потік випромінювання, перший скляний об'єктив 2, дзеркальна польова діафрагма 3, обтюраторний диск 4 із синхронним двигуном 5, апертурна діафрагма 6, другий скляний об'єктив 7, перший світлофільтр 8. Канал візуалізації зображення включає третій скляного об'єктива 9 та відбивне дзеркало 10. На другій оптичній осі послідовно розташовані параболічне дзеркало 11, другий світлофільтр 12, фокусуюча лінза 13 та світловипромінюючий діод 14. Додатковий світловипромінюючий діод 15 і фотоприймач-формува 16 синхроімпульсів розташовані по обидві сторони від обтюраторного диска 4. Вихід фотоприймача-формува 16 синхроімпульсів з'єднаний зі входом синхронізації МДМ-підсилювача 17. Болометр 18 підключений до МДМ-підсилювача 17, з виходом якого з'єднаний нагрівальний елемент 20 термочутливого п'єзореzonаторного перетворювача 19. Електронний стабілізатор температури 27 має тепловий зв'язок з МДМ-підсилювачем 17. Заслінка 1, яка екранує потік випромінювання, механічно з'єднана з першим перетворювачем "код-переміщення" 22, інформативні входи якого підключені до однойменних входів другого 23 та третього 24 перетворювачів "код-переміщення", виходи яких механічно з'єднані відповідно з першим 25 та другим 26 сірими клинами. П'єзореzonатор 21 термочутливого п'єзореzonаторного перетворювача 19 підключений до генератора змінної частоти 28, вихід якого з'єднаний з сигнальним входом змішувача частот 29, вхід керування якого підключений до виходу генератора опорної частоти 30. Вихід змішувача частот 29 через фільтр нижніх частот 31 та формувач імпульсів 32 підключений до аналогового входу мікропроцесора 33 з клавіатурою. Цифрові "виходи-виходи" мікропроцесора 33 з'єднані зі входами регістра числа 36. Цифрові виходи a, b, c мікропроцесора 33 підключені до об'єднаних між собою інформативних входів першого 22, другого 23 і третього 24 перетворювачів "код-переміщення". Керуючі виходи f, d, e регістра числа 36 підключені до входів керування першого 22, другого 23 і третього 24 перетворювача "код-переміщення", а його входи з'єднані з загальною шиною 37. Мікропроцесор 33 з клавіатурою також з'єднаний через загальну шину 37 з цифровим відліковим пристроєм 35 та цифроаналоговим перетворювачем 34, вхід якого підключений до світловипромінюючого діоду 14.

Для виділення потоку випромінювання в заданій спектральній області використовуються світлофільтри 8, 12 з шириною смуги пропускання 0,4-1,8 нм. Для вирішення зазначеної задачі в якості фотоприймача застосований широкосмуговий болометр 18. Для підвищення його чутливості запропоновано додаткове використання термочутливого п'єзореzonаторного перетворювача 19.

Необхідно зауважити, що болометр 18 та термочутливий п'єзореzonаторний перетворювач 19 мають квадратичні функції перетворення. В такому випадку результуюча ФП потоку випромінювання в частоту вихідного сигналу генератора 28 описується наступним рівнянням величин:

$$f_x = S'_1 P_x^2 + S'_2 P_x + \Delta f_{3M}, \quad (1)$$

де $S'_H = S_H(1 + \gamma_H)$, $S'_L = S_L(1 + \gamma_L)$, $\gamma_H = \Delta S_H / S'_H$, $\gamma_L = \Delta S_L / S'_L$, $\Delta S_H, \Delta S_L$ - зміна чутливості нелінійної та лінійної складової функції перетворення (1); $\Delta f_{зм}$ - частота електричного сигналу при $P_x=0$; теплова потужність

$$P_x = kQ_e = rI^2, \quad (2)$$

де r - опір нагрівального елемента; I - струм через нагрівальний елемент; k - коефіцієнт пропорційності; променева енергія Q_e

$$Q_e = \Phi_e \Delta t = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_e dt, \quad (3)$$

В (3) $\Delta t (\{\Delta t\} = \{t_2\} - \{t_1\})$ - проміжок часу такту вимірювання, Φ_e - потік випромінювання. Нестабільність параметрів цієї функції перетворення приводить до появи систематичних похибок вимірювання. Внутрішні стаціонарні шуми болометра і підсилювача інтегруються (див. аналітичний вираз (3)) в результаті перетворення інтенсивності потоку випромінювання у потужність $P_{ш}$, яка, в кінцевому випадку, враховується як складова зміщення функції (1).

Пристрій працює наступним чином.

Після включення живлення включається синхронний двигун 5, який приводить до обертання обтюраторний диск 4. За час $\Delta t_{пр}$ радіаційний пірометр прогрівається. Усі його функціональні блоки встановлюються у вихідний стан по команді з мікропроцесора 33. Цифровий відліковий пристрій 35 показує нуль.

В результаті калібрування радіаційного пірометра за допомогою стандартних джерел білого світла з нормованими характеристиками одержують коди чисел N_0, N_1, N_{11} і N_{12} . Коди чисел N_0 і N_1 відповідають каліброваним за значеннями інтенсивностей потокам випромінювання Φ_{e2} і Φ_{e3} . Коди чисел N_{11} і N_{12} вибрані такі, що забезпечують формування струмів I_1 і I_2 відповідно на світловипромінюючому діоді 14, значення яких дорівнюють відповідно двом каліброваним за значенням інтенсивності потоків випромінювання $\{\Phi_{e2}\}$ і $\{\Phi_{e3}\}$. Крім того, у пам'яті мікропроцесора 33 зберігається програма виконання заданої послідовностей операцій вимірювання, керування та обчислення. Вона забезпечує функціонування радіаційного пірометра як єдиного програмно-технічного засобу вимірювання, а також обробку результатів проміжних вимірювань по запропонованому рівнянню числових значень (алгоритму обробки результатів вимірювань).

Процес вимірювань дійсного значення температури містить у собі п'ять тактів вимірювань і один такт обробки отриманих результатів.

За допомогою каналу візуалізації радіаційний пірометр направляється на об'єкт дослідження.

Після натискання кнопки "Пуск", на клавіатурі мікропроцесора 33 (на фіг. не приведена) формується сигнал початку вимірювань. У першому такті вимірювання заслінка 1, яка екранує потік випромінювання від об'єкта дослідження - нагрітого тіла, переводиться у закритий стан. В цьому випадку потік випромінювання не проходить вздовж однієї оптичної вісі і не поступає на болометр 18. В результаті значення променевої енергії дорівнює нулю, тобто

$$Q_{e1} = \Phi_{e0} \Delta t = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{e0} dt,$$

де $\Delta t (\{\Delta t\} = \{t_2\} - \{t_1\})$ - проміжок часу такту вимірювання, Φ_{e0} - потік випромінювання з нульовим значенням інтенсивності. На виході МДМ-підсилювача 17 з'являється сигнал, що відповідає нульовому значенню інтенсивності потоку випромінювання, що подається на болометр 18. Через нагрівальний елемент 20 термочутливого п'єзореzonансного перетворювача 19 (ТПП) протікає струм $I_0 \approx 0$, який не призводить до підвищення температури перетворювача 19 за межі температурної стабілізації, яка встановлюється за допомогою електронного стабілізатора температури 27.

В цьому такті вимірювання теплова потужність $P_{x1} = kQ_{e1} = rI_0^2 = 0$ (де I_0 - струм через нагрівальний елемент при потоці Φ_{e0}). За допомогою генератора 28, до якого підключений ТПП 19, генерується електричний сигнал

$$u_1(t) = U_{m1} \sin 2\pi f_1 t \quad (4)$$

з частотою

$$f_1 = S'_H P_{x1}^2 + S'_L P_{x1} + \Delta f_{см} = \Delta f_{см}. \quad (5)$$

Генератор опорної частоти 30 формує сигнал опорної частоти f_0 , яка перевищує максимально допустиму частоту перебудови генератора 28, наприклад, на 1 МГц.

$$u_0(t) = U_{m0} \sin 2\pi f_0 t. \quad (6)$$

Сигнали (4) і (6) поступають на змішувач частот 29.

За допомогою фільтра нижніх частот 31 виділяється електричний сигнал різницевої частоти $f_{10} (\{f_{10}\} = \{f_2\} - \{f_0\})$. Змішаний сигнал

$$u_{зм1}(t) = U_{m3} \sin 2\pi (f_1 - f_0) t = U_{m3} \sin 2\pi f_{10} t, \quad (7)$$

де f_0 - частота опорного генератора 30.

у формувачі 32 імпульсів перетворюється в послідовність імпульсів

$$u_{u1}(t) = \frac{\tau_u}{T_{10}} U_0 \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^N \frac{(2n-1) \sin 2\pi f_{10} t}{n-1} \right), \quad (8)$$

де U_0 - амплітуда імпульса,

тривалістю τ_u , періодом $\{T_{10}\} = 1/\{f_{10}\}$ і частотою слідування f_{10} . Ці імпульси надходять до мікропроцесора 33. В мікропроцесорі 33 по заданій програмі здійснюється вимірювання частоти слідування цих імпульсів. Результат вимірювання запам'ятовується у вигляді коду числа $N_{10} = \{f_{10}\} \{ \Delta t_0 \}$, де Δt_0 - інтервал часу вимірювання.

В другому такті вимірювань по команді з мікропроцесора 33 на входи цифроаналогового перетворювача 34 подається код числа N_{11} . В результаті на виході цифроаналогового перетворювача 34 формується струм I_1 , який поступає на світловипромінюючий діод 14. Останній генерує калібрований за значенням інтенсивності потік випромінювання Φ_{e2} . Після проходження через фокусуючу лінзу 13, другий світлофільтр 12, параболічне дзеркало 11, перший скляний об'єктив 2, дзеркальну польову діафрагму 3, потік випромінювання Φ_{e2} модулюється обтюраторним диском 4. Обертання обтюраторного диска 4 забезпечується синхронним двигуном, що підключений до стабілізованого джерела живлення. Його частота обертання вибрана рівною 12,5 Гц. Далі промодульований потік випромінювання Φ_{e2} через апертурну діафрагму 6, другий скляний об'єктив 7 і перший світлофільтр 8 поступає на болометр 18. Вихідний сигнал болометра 18 підсилюється за допомогою МДМ-підсилювача 17 у задане число k_{yc} раз. Вихідна напруга $u_2(t)$ МДМ-підсилювача 17 подається на нагрівальний елемент 20. В результаті променева енергія

$$Q_{e2} = \Phi_{e2} \Delta t = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{e2} dt$$

перетворюється в теплову потужність $P_{x2} = kQ_{e2} = \tau I_1^2$, що виділяється на нагрівальному елементі 20 за рахунок струму I_1 . В результаті нагріву термочутливого п'єзореzonатора 19 на виході генератора змінної напруги 28 формується електричний сигнал $u_2(t) = U_{m2} \sin 2\pi f_2 t$ з частотою f_2

$$f_2 = S_H P_{x2}^2 + S_H P_{x2} + \Delta f_{3m}. \quad (9)$$

Електричні сигнали $u_2(f)$ і (6) поступають на змішувач частот 29. За допомогою фільтра нижніх частот 31 виділяється електричний сигнал різницевої частоти $f_{20} (\{f_{20}\} = \{f_2\} - \{f_0\})$. Цей сигнал за допомогою формувача імпульсів 32 перетворюється у послідовність прямокутних імпульсів

$$u_{u2}(t) = \frac{\tau_u}{T_{20}} U_0 \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^N \frac{(2n-1) \sin 2\pi f_{20} t}{n-1} \right), \quad (10)$$

де $\{T_{20}\} = 1/\{f_{20}\}$,

і з частотою слідування f_{20} . Ці імпульси надходять у лічильник мікропроцесора 33. По програмі в мікропроцесорі 33 здійснюється вимірювання частоти слідування зазначених імпульсів. Результат вимірювання запам'ятовується у вигляді коду числа $N_{20} = \{f_{20}\} \{ \Delta t_0 \}$.

В третьому такті вимірювання по команді з мікропроцесора 33 на входи цифроаналогового перетворювача 34 подається другий код числа N_{12} . В результаті на виході цифроаналогового перетворювача 34 формується другий струм I_2 , який поступає на світловипромінюючий діод 14. Останній генерує калібрований за значенням інтенсивності потік випромінювання Φ_{e3} . Після проходження через фокусуючу лінзу 13, другий світлофільтр 12, параболічне дзеркало 11, перший скляний об'єктив 2, дзеркальну польову діафрагму 3, цей потік випромінювання Φ_{e2} модулюється обтюраторним диском 4. Далі промодульований потік випромінювання Φ_{e3} через апертурну діафрагму 6, другий скляний об'єктив 7, перший світлофільтр 8 поступає на болометр 18. Вихідний сигнал болометра 18 підсилюється за допомогою МДМ-підсилювача 17 у задане число k_{yc} раз. Вихідна напруга $u_3(t)$ МДМ-підсилювача 17 подається на нагрівальний елемент 20. В результаті променева енергія

$$Q_{e3} = \Phi_{e3} \Delta t = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{e3} dt$$

перетворюється в теплову потужність $P_{x2} = kQ_{e3} = \tau I_2^2$, що виділяється на нагрівальному елементі 20 за рахунок струму I_2 . В результаті нагріву термочутливого п'єзореzonатора 19 на виході генератора змінної напруги 28 формується електричний сигнал $u_3(t) = U_{m3} \sin 2\pi f_3 t$ з частотою

$$f_3 = S_H P_{x3}^2 + S_H P_{x3} + \Delta f_{3m}. \quad (11)$$

Як і у перші 2 такти сигнали $u_3(t)$ і (6) поступають на змішувач частот 29. За допомогою фільтра нижніх частот 31 виділяється сигнал різницевої частоти $f_{30} (\{f_{30}\} = \{f_3\} - \{f_0\})$. Цей сигнал за допомогою формувача імпульсів 32 перетворюється у послідовність прямокутних імпульсів

$$u_{u3}(t) = \frac{\tau_u}{T_{30}} U_0 \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^N \frac{(2n-1) \sin 2\pi f_{30} t}{n-1} \right), \quad (12)$$

де $\{T_{30}\} = 1/\{f_{30}\}$,

і з частотою слідування f_{30} . Ці імпульси надходять у лічильник мікропроцесора 33. По програмі в мікропроцесорі 33 здійснюється вимірювання частоти слідування зазначених імпульсів. Результат вимірювання

запам'ятовується у вигляді коду числа $N_{30} = \{f_{30}\} \{ \Delta t_0 \}$.

У четвертому такті вимірювань відновлюється дія інформативного потоку випромінювання Φ_{ex} , що відповідає температурі T_x на чутливий елемент болометра 18. Це здійснюється шляхом відкриття заслінки 1, яка екранує потік випромінювання, по команді з мікропроцесора 33. При чому через світловипромінюючий діод 14 тече незмінний струм I_2 . На болометр 18 надходить потік випромінювання як від нагрітого тіла Φ_{ex} , так і від світловипромінюючого діода 14 Φ_{e3} . У четвертому такті значення інтенсивності потоку випромінювання Φ_{e4} дорівнює сумі значень інтенсивності потоків випромінювання Φ_{ex} і потоку випромінювання Φ_{e2} ($\{ \Phi_{e4} \} = \{ \Phi_{ex} \} + \{ \Phi_{e2} \}$). Вихідний сигнал болометра 18 підсилюється по амплітуді в k_{yc} раз. Вихідна напруга $u_4(t)$ МДМ-підсилювача 17 подається на нагрівальний елемент 20. В результаті променева енергія

$$Q_{e4} = \Phi_{e4} \Delta t = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{e4} dt$$

перетворюється в теплову потужність $P_{ж4} = k Q_{e4}$, що виділяється на нагрівальному елементі 20. На виході генератора змінної напруги 28 формується електричний сигнал $u_4(t) = U_{m4} \sin 2\pi f_4 t$ з частотою

$$f_4 = S_H' P_{x4}^2 + S_H' P_{x4} + \Delta f_{cm}. \quad (13)$$

Електричні сигнали $u_4(t)$ і (6) поступають на змішувач частот 29. Сигнал різницевої частоти f_{40} ($\{f_{40}\} = \{f_4\} - \{f_0\}$), що виділяється фільтра нижніх частот 31, поступає на формувач імпульсів 32. Останній формує послідовність прямокутних імпульсів

$$u_{u4}(t) = \frac{\tau_u}{T_{40}} U_0 \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^N \frac{(2n-1) \sin 2\pi f_{40} t}{n-1} \right), \quad (14)$$

де $\{T_{40}\} = 1/\{f_{40}\}$,

і з частотою слідування f_{40} . Ці імпульси надходять у лічильник мікропроцесора 33. По програмі в мікропроцесорі 33 здійснюється вимірювання частоти слідування отриманих імпульсів. Результат вимірювання

запам'ятовується у вигляді коду числа $N_{40} = \{f_{40}\} \{ \Delta t_0 \}$.

У п'ятому такті вимірювань по команді з мікропроцесора 33 на входи цифро-аналогового перетворювача 34 подається код числа N_{11} . В результаті на виході цифро-аналогового перетворювача 34 формується струм I_1 , який поступає на світловипромінюючий діод 14. В цьому такті на болометр 18 надходить потік випромінювання від нагрітого тіла і від світловипромінюючого діода 14. Інтенсивність потоку випромінювання Φ_{e5} , що надходить на болометр 18, дорівнює сумі значень інтенсивності потоків випромінювання Φ_{ex} і Φ_{e3} ($\{ \Phi_{e5} \} = \{ \Phi_{ex} \} + \{ \Phi_{e3} \}$). Вихідний сигнал болометра 18 підсилюється в k_{yc} раз за допомогою МДМ-підсилювача 17. Вихідна напруга $u_5(t)$ МДМ-підсилювача 17 подається на нагрівальний елемент 20. В результаті променева енергія

$$Q_{e5} = \Phi_{e5} \Delta t = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{e5} dt$$

перетворюється в теплову потужність $P_{ж5} = k Q_{e5}$, що виділяється на нагрівальному елементі 20. В результаті нагріву термочутливого п'єзорезонатора 19 на виході генератора змінної напруги 28 формується електричний

сигнал $u_5(t) = U_{m5} \sin 2\pi f_5 t$ з частотою

$$f_5 = S_H' P_{x5}^2 + S_H' P_{x5} + \Delta f_{cm}. \quad (15)$$

Електричні сигнали $u_5(t)$ і (6) поступають на змішувач частот 29. Сигнал різницевої частоти f_{50} ($\{f_{50}\} = \{f_5\} - \{f_0\}$), що виділяється за допомогою фільтра нижніх частот 31, поступає на формувач імпульсів 32. Останній формує послідовність прямокутних імпульсів

$$u_{u5}(t) = \frac{\tau_u}{T_{50}} U_0 \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^N \frac{(2n-1) \sin 2\pi f_{50} t}{n-1} \right), \quad (16)$$

де $\{T_{50}\} = 1/\{f_{50}\}$,

які слідує з частотою f_{50} . Ці імпульси надходять у лічильник мікропроцесора 33. По програмі в мікропроцесорі 33 здійснюється вимірювання частоти слідування отриманих імпульсів. Результат вимірювання

запам'ятовується у вигляді коду числа $N_{50} = \{f_{50}\} \{\Delta t_0\}$.

У шостому такті, за допомогою мікропроцесора 33 проводиться обробка отриманих результатів отриманих вимірів відповідно до рівняння числових значень

$$N_x = (N_0 N_1) \frac{(N_{05} - N_{04}) - (N_{03} - N_{02})}{(N_1 + N_0)(N_{02} + N_{03} - 2N_{01}) - (N_1 - N_0)(N_{03} - N_{02})}. \quad (17)$$

По електронних таблицях визначається дійсне значення температури T_x об'єкта відповідно до коду числа N_x (17). Отримане значення виводиться на табло цифрового відлікового пристрою 35.

Запропоноване технічне рішення оптичного пірометра забезпечує не тільки автоматичне виключення всіх складових систематичної похибки результату визначення дійсного значення температури нагрітого об'єкта, але й похибки від нелінійності. Завдяки чому підвищується точність вимірювання температури важкодоступних тіл чи середовищ та розширюється діапазон її вимірювання. Особливістю схемотехнічного рішення радіаційного пірометра є використання термочутливого п'єзорезонаторного перетворювача, який забезпечує підвищення загальної чутливості радіаційного пірометра. Високоточне перетворення вихідного сигналу болометра в частоту електричних сигналів спрощує процес її вимірювання і також підвищує загальну точність пірометра. Крім того, за рахунок теплового перетворення типу "інтенсивність світлового потоку-електрична потужність-теплова потужність-частота електричного сигналу", яке передбачає проміжне інтегрування (див. (3)) електричного сигналу, забезпечується суттєве зменшення і випадкової складової похибки вимірювання.

Покажемо, що запропоноване рівняння надлишкових вимірювань (17) забезпечує виключення нелінійної, мультиплікативної і адитивної складових похибки вимірювання. Для цього підставимо в (17) вирази для N_0 , N_1 та N_{01} - N_{05} . Тоді маємо:

$$\begin{aligned} N_9 &= N_0 N_1 \frac{(N_{05} - N_{04}) - (N_{03} - N_{02})}{(N_1 + N_0)(N_{02} + N_{03} - 2N_{01}) - (N_1 - N_0)(N_{03} - N_{02})} = \\ &= \Phi_{e2} \Phi_{e3} \frac{\Delta t((f_{05} - f_{04}) - (f_{03} - f_{02}))}{\Delta t((\Phi_{e2} + \Phi_{e3})(f_{03} - f_{02}) - (\Phi_{e2} - \Phi_{e3})(f_{02} + f_{03} - 2f_{01}))} = \\ &= \Phi_{e2} \Phi_{e3} \frac{(f_5 - f_0 - f_4 + f_0) - (f_3 - f_0 - f_2 + f_0)}{(\Phi_{e2} + \Phi_{e3})(f_3 - f_0 - f_2 + f_0) - (\Phi_{e2} - \Phi_{e3})(f_2 - f_0 + f_3 - f_0 + 2f_0)} = \\ &= \frac{\Phi_{e2} \Phi_{e3} (S_H(P_5^2 - P_4^2) + S_L(P_5 - P_4)) - (S_H(P_3^2 - P_2^2) + S_L(P_3 - P_2))}{(\Phi_{e2} + \Phi_{e3})(S_H(P_3^2 - P_2^2) + S_L(P_3 - P_2)) - (\Phi_{e2} - \Phi_{e3})(S_H(P_3^2 + P_2^2) + S_L(P_3 + P_2) + 2f_{cm} - 2f_{cm})} = \quad (18) \text{ Як видно} \\ &= \frac{\Phi_{e2} \Phi_{e3} k \Delta t ((S_H(\Phi_{e5}^2 - \Phi_{e4}^2) + S_L(\Phi_{e5} - \Phi_{e4})) - (S_H(\Phi_{e3}^2 - \Phi_{e2}^2) + S_L(\Phi_{e3} - \Phi_{e2})))}{k \Delta t ((\Phi_{e2} - \Phi_{e3})(S_H(\Phi_{e3}^2 - \Phi_{e2}^2) + S_L(\Phi_{e3} - \Phi_{e2})) - (\Phi_{e2} - \Phi_{e3})(S_H(\Phi_{e3}^2 + \Phi_{e2}^2) + S_L(\Phi_{e3} + \Phi_{e2})))} = \\ &= \frac{\Phi_{e2} \Phi_{e3} (S_H(\Phi_e + \Phi_{e3})^2 - (\Phi_e + \Phi_{e2})^2) + S_L(\Phi_{e3} - \Phi_{e2}) - S_H(\Phi_{e3}^2 - \Phi_{e2}^2) - S_L(\Phi_{e3} - \Phi_{e2}))}{(\Phi_{e2} + \Phi_{e3}) S_H(\Phi_{e3}^2 - \Phi_{e2}^2) + S_L(\Phi_{e3}^2 - \Phi_{e2}^2) - (\Phi_{e2} - \Phi_{e3}) S_H(\Phi_{e2}^2 + \Phi_{e3}^2) - S_L(\Phi_{e2}^2 - \Phi_{e3}^2)} = \\ &= \frac{\Phi_{e2} \Phi_{e3} S_H(\Phi_e^2 + 2\Phi_e \Phi_{e3} + \Phi_{e3}^2 - \Phi_e^2 - 2\Phi_e \Phi_{e2} - \Phi_{e2}^2 - \Phi_{e3}^2 + \Phi_{e3}^2)}{S_H((\Phi_{e3}^2 - \Phi_{e2}^2)(\Phi_{e3} + \Phi_{e2}) - (\Phi_{e3}^2 + \Phi_{e2}^2)(\Phi_{e2} - \Phi_{e3}))} = \Phi_e \end{aligned}$$

з (18), у результаті вимірювання відсутні всіх складові систематичної похибки, у тому числі і похибки від нелінійності. Це підтверджує вирішення поставленої задачі та досягнення технічного результату.

Таким чином, запропоноване технічне рішення радіаційного пірометра забезпечує підвищення чутливості та точності вимірювання. Причому, підвищення чутливості радіаційного пірометра забезпечується за рахунок реалізації потрібного перетворення променевої енергії у частоту електричних сигналів генератора та за рахунок усереднення дії випадкових завад та шумів. Підвищення точності вимірювання забезпечується за рахунок автоматичного виключення нелінійної, адитивної та мультиплікативної похибок результату вимірювання температури нагрітого об'єкта. За рахунок підвищення чутливості і точності вимірювань забезпечується також розширення низу діапазону вимірювання температури.

