

## КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*21-е столетие характеризуется широким использованием микропроцессорной техники для автоматизации измерительных процессов, обработки результатов промежуточных измерений и передачи информации по каналам связи. Использование методов избыточных измерений при создании радиационных пирометров предполагает непосредственное использование микропроцессора, цифроаналогового преобразователя, регистра, цифрового отсчетного устройства и других средств вычислительной техники для организации процесса управления тактами измерений по априори заданной программе, обработки и накопления полученных результатов в течение значительного промежутка времени. В работе рассматривается техническое решение радиационного пирометра повышенной чувствительности и точности измерения температуры труднодоступных объектов в широком диапазоне измерения температуры.*

© В.Т. Кондратов,  
А.А. Зарницына, Н.М. Сердюк,  
2003

УДК 006.91:621.74

В.Т.КОНДРАТОВ, А.А.ЗАРНИЦЫНА, Н.М.СЕРДЮК

### РАДИАЦИОННЫЙ ПИРОМЕТР С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Температура является важнейшим параметром многих технологических процессов. Задача бесконтактного измерения температуры становится особо актуальной и важной, когда требуется измерение температуры труднодоступных тел или сред. Существует большое разнообразие приборов и методов бесконтактного измерения температуры [1-5]. Наибольшее распространение и развитие получили радиационные пирометры, обеспечивающие измерение температуры в инфракрасной области спектра.

Ниже рассматривается техническое решение микропроцессорного радиационного пирометра, структурная комбинированная схема которого показана на рисунке.

Для выделения потока излучения в заданной спектральной области используются светофильтры 13 и 14 с шириной полосы пропускания 0,4 - 1,8 нм. Для решения указанной задачи в качестве фотоприемника 17 используется широкополосный болометр, например типа БВЦ-0,2х2 с интегральной чувствительностью 20 В/Вт [1].

Задача повышения точности измерения решается для случая, когда измерительный канал, состоящий из болометра 17, МДМ-усилителя 23 и термочувствительного пьезорезонаторного преобразователя 24, имеет квадратичную функцию преобразования (ФП) потока излучения в частоту выходного сигнала генератора 27. Она описывается

уравнением величин вида

$$f = S'_{н} P_x^2 + S'_{л} P_x + \Delta f_{см}, \quad (1)$$

где  $S'_{н} = S_{н}(1+\gamma_{н})$ ;  $S'_{л} = S_{л}(1+\gamma_{л})$ ;  $\gamma_{н} = \Delta S_{н} / S'_{н}$ ;  $\gamma_{л} = \Delta S_{л} / S'_{л}$ ;  $\Delta S_{н}$  и  $\Delta S_{л}$  – изменение чувствительности нелинейной и линейной составляющей ФП (1);  $\Delta f_{см}$  – частота электрического сигнала при  $\{P_x\}=0$ ;  $P_x$  – тепловая мощность, определяемая уравнением величин

$$P_x = kQ_e = I^2 r. \quad (2)$$

Здесь  $r$  – сопротивление нагревательного элемента;  $I$  – ток через нагревательный элемент;  $k$  – коэффициент пропорциональности. Лучевая энергия  $Q_e$  связана с потоком излучения  $\Phi_e$  уравнением величин вида

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

$\Delta t = t_2 - t_1$  – время измерения.

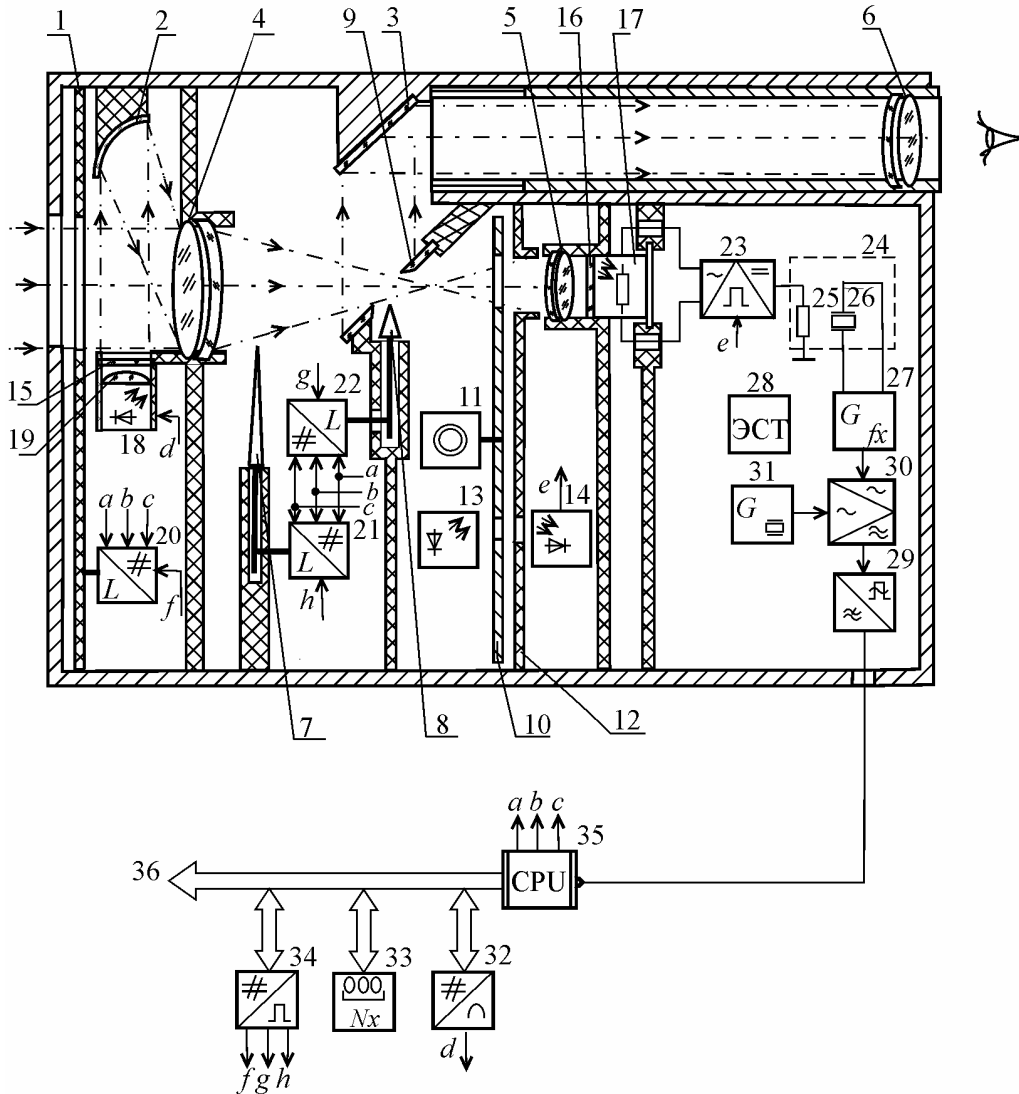
Нестабильность параметров ФП (см. формулу (1)) приводит к появлению аддитивной, мультипликативной и нелинейной составляющей погрешности измерения. Внутренние стационарные шумы болометра и МДМ-усилителя интегрируются (см. аналитическое выражение (3)) при преобразовании интенсивности потока излучения в мощность  $P_{ш}$ .

В предложенном техническом решении радиационного пирометра реализуется метод избыточных измерений температуры [6], обеспечивающий проведение 5 тактов измерений однородных физических величин и одного такта обработки результатов промежуточных измерений согласно априори полученному уравнению избыточных измерений:

$$\Phi_e = (\Phi_{e1}^2 + \Delta\Phi_e^2) \frac{(U_5 - U_4) - (U_3 - U_2)}{(\Phi_{e1} - \Delta\Phi_e)(U_2 + U_3 - 2U_1) - (\Phi_{e1} + \Delta\Phi_e)(U_3 - U_2)}.$$

Рассмотрим сущность работы радиационного пирометра.

После подачи питания радиационного пирометра его функциональные блоки устанавливаются в исходное состояние по команде из микропроцессора 35. Включается синхронный двигатель 11, что приводит к вращению обтюраторного диска 10. Цифровое отсчетное устройство 33 устанавливается в нуль.



РИСУНОК

В постоянно перепрограммируемом запоминающем устройстве (ППЗУ) микропроцессора 35 записывается программа выполнения заданной последовательности операций измерения, управления и вычисления. Она обеспечивает функционирование радиационного пирометра как единого программно-технического средства измерения, а также обработку результатов промежуточных измерений по предложенному уравнению числовых значений (алгоритму обработки результатов измерений). Кроме того, в ППЗУ записывают коды чисел

$N_0$  и  $N_1$ , которые соответствуют калиброванным по значениям интенсивностей потокам излучения  $\Phi_{e2}$  и  $\Phi_{e3}$ ; коды чисел  $N_{I1}$  и  $N_{I2}$ , обеспечивающие формирование токов  $I_{01}$  и  $I_{02}$  через светоизлучающий диод 18, значения которых равны соответственно разности и сумме двух калиброванных по значению интенсивности потоков излучения  $\Phi_{e1}$  и  $\Delta\Phi_e$  ( $\{\Phi_{e2}\} = \{\Phi_{e1}\} - \{\Delta\Phi_e\}$ ,  $\{\Phi_{e3}\} = \{\Phi_{e1}\} + \{\Delta\Phi_e\}$ ).

Канал визуализации включает в себя третий стеклянный объектив 6 и отражающее зеркало 3, а оптико-электронный измерительный канал состоит из следующих оптико-электронных элементов и блоков: 1, 4, 5, 7 - 12, 16.

С помощью канала визуализации поток излучения от исследуемого объекта через оптическую систему направляется на болометр 17 радиационного пирометра.

После нажатия кнопки «Пуск» с помощью клавиатуры микропроцессора 35 (на рисунке не показана) формируется сигнал начала измерений. В первом такте измерения экранирующая заслонка 1 переводится в закрытое состояние. В этом случае поток излучения не проходит через оптическую систему и не поступает на болометр 17. В результате значение лучевой энергии равняется нулю, то есть  $\{Q_{e1}\} = \{\Phi_{e0}\} \{\Delta t\} = 0$ , так как  $\{\Phi_{e0}\} = 0$ . На выходе МДМ-усилителя 23 появляется сигнал  $U_1$ , соответствующий нулевому значению интенсивности потока излучения  $\Phi_{e0}$ . Через нагревательный элемент 25 термочувствительного пьезорезонаторного преобразователя 24 (ТПП) протекает ток  $I_0$ , обусловленный напряжением  $U_1$ . Этот ток нагрева настолько мал, что не приводит к заметному повышению температуры преобразователя 24.

В первом такте измерения тепловая мощность  $P_{x1} = kQ_{e1} = I_0^2 r$  ( $\{P_{x1}\} \approx 0$ ) (где  $I_0$  – ток через нагревательный элемент при потоке  $\Phi_{e0}$ ) с помощью ТПП 24 и генератора 27 преобразуется в электрический сигнал

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

частоты

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

Генератор опорной частоты 31 формирует сигнал

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

опорной частоты  $f_0$ , которая превышает максимально допустимую частоту перестройки генератора 27, например на 1 МГц.

Сигналы (4) и (6) поступают на смеситель частот 30. В результате на его выходе формируется сигнал разностной частоты

$$u_{см1}(t) = U_{m3} \sin 2\pi(f_1 - f_0)t = U_{m3} \sin 2\pi f_{10}t, \quad (7)$$

где  $f_0$  – частота опорного генератора 31.

С помощью фильтра нижних частот-формирователя импульсов 29 смещенный по частоте электрический сигнал преобразуется в последовательность импульсов продолжительностью  $\tau_u$ , периодом  $T_{10}=1/f_{10}$  и частотой следования  $f_{10}$ :

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

где  $U_0$  – амплитуда импульса.

Полученная последовательность импульсов поступает в микропроцессор 35, где по заданной программе осуществляется измерение частоты следования этих импульсов. Результат измерения запоминается в виде кода числа  $N_{10} = f_{10} \Delta t_0$  (здесь  $\Delta t_0$  – интервал времени измерения).

Во втором такте измерений по программе, записанной в памяти микропроцессора 35, на входы цифроаналогового преобразователя 32 подается код числа  $N_{11}$ . На выходе цифроаналогового преобразователя 32 формируется ток  $I_{01}$ , поступающий на светоизлучающий диод 18, который генерирует калиброванный по значению интенсивности поток излучения  $\Phi_{e2}$ , равный разности двух калиброванных по значению интенсивности потоков излучения  $\Phi_{e1}$  и  $\Delta\Phi_e$ , т.е.  $\{\Phi_{e2}\} = \{\Phi_{e1}\} - \{\Delta\Phi_e\}$ . После прохождения через фокусирующую линзу 19, второй светофильтр 16, параболическое зеркало 2, первый стеклянный объектив 4, зеркальную полевую диафрагму 9, поток излучения  $\Phi_{e2}$  модулируется обтюраторным диском 10. Вращение обтюраторного диска 10 осуществляется синхронным двигателем 11 с частотой вращения 12,5 Гц, который подключен к стабилизированному источнику питания. Промоделированный поток излучения  $\Phi_{e2}$  через апертурную диафрагму 12, второй стеклянный объектив 5 и светофильтр 15 поступает на болометр 17. Изменение падения напряжения на болометре 17 усиливается с помощью МДМ-усилителя 23 в заданное число  $k_{yc}$  раз. Выходное напряжение  $U_2$  МДМ-усилителя 23 подается на нагревательный элемент 25 и через него протекает ток  $I_1$ . В результате лучевая энергия

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

превращается в тепловую мощность  $P_{x2} = kQ_{e2} = I_1^2 r$ , которая выделяется на нагревательном элементе 25 за счет тока  $I_1$ . В результате нагрева термочувствительного пьезорезонатора 24 на выходе генератора переменного напряжения 27 формируется электрический сигнал  $u_2(t) = U_{m2} \sin 2\pi f_2 t$  частоты  $f_2$ :

$$f_2 = S'_n P_{x2}^2 + S'_л P_{x2} + \Delta f_{cm}. \quad (9)$$

Сигнал  $u_2(t)$  аналогично преобразуется в последовательность импульсов

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

где  $T_{20}=1/f_{20}$  с частотой следования  $f_{20} = f_2 - f_0$ . Эти импульсы поступают в микропроцессор 35. По программе в микропроцессоре 35 осуществляется измерение частоты следования этих импульсов. Результат измерения запоминается в виде кода числа  $N_{20} = f_{20} \Delta t_0$ .

В третьем такте измерений на входы цифроаналогового преобразователя 32 подается код числа  $N_{I2}$ . В результате на выходе цифроаналогового преобразователя 32 формируется второй ток  $I_{02}$ , поступающий на светоизлучающий диод 18, который генерирует калиброванный по значению интенсивности поток излучения  $\Phi_{e3}$ , равный сумме двух калиброванных по значению интенсивности потоков излучения  $\Phi_{e1}$  и  $\Delta\Phi_e$ , т. е.  $\{\Phi_{e3}\} = \{\Phi_{e1}\} + \{\Delta\Phi_e\}$ . После прохождения через фокусирующую линзу 19, второй светофильтр 16, параболическое зеркало 2 оптико-электронного канала промодулированный поток излучения  $\Phi_{e3}$  поступает на болометр 17. Изменение падения напряжения на болометре 17 усиливается с помощью МДМ-усилителя 23. Выходное напряжение  $U_3$  МДМ-усилителя 23 подается на нагревательный элемент 25 и обуславливает прохождение через него тока  $I_2$ . В результате лучевая энергия

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

превращается в тепловую мощность  $P_{x2} = kQ_{e3} = I_2^2 r$ , которая выделяется на нагревательном элементе 25 за счет тока  $I_2$ . В результате нагрева термочувствительного пьезорезонатора 24 на выходе генератора переменного напряжения 27 формируется электрический сигнал  $u_3(t) = U_{m3} \sin 2\pi f_3 t$  частоты

$$f_3 = S'_H P_{x3}^2 + S'_L P_{x3} + \Delta f_{cm}. \quad (11)$$

Сигнал  $u_3(t)$  с помощью фильтра нижних частот-смесителя частот 30 преобразуется в периодическую последовательность прямоугольных импульсов

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

где  $T_{30}=1/f_{30}$ , с частотой следования  $f_{30} = f_3 - f_0$ . Эти импульсы поступают через последовательный порт в микропроцессор 35. Результат измерения частоты следования импульсов (12) также запоминается в памяти микропроцессора в виде кода числа  $N_{30} = f_{30} \Delta t_0$ .

В четвертом такте измерений восстанавливается действие информативного потока излучения  $\Phi_{ex}(\lambda)$ , соответствующего температуре  $T_x$ , на чувствительный эле-

мент болометра 17. Это осуществляется путем открытия экранирующей заслонки 1 по заданной программе при неизменном токе  $I_{02}$  через светоизлучающий диод 18. На болометр 17 поступает поток излучения как от нагретого тела  $\Phi_{ex}$ , так и от светоизлучающего диода 18  $\Phi_{e3}$ . В четвертом такте значение интенсивности потока излучения  $\Phi_{e4}$  равно сумме значений интенсивности потоков излучения  $\Phi_{ex}$  и  $\Phi_{e3}$  ( $\{\Phi_{e4}\} = \{\Phi_{ex}\} + \{\Phi_{e3}\}$ ). Полученный первый суммарный поток излучения  $\Phi_{e4}$  аналогичным образом поступает на болометр 17 и изменяет его сопротивление. Падение напряжения на болометре усиливается по амплитуде в  $k_{yc}$  раз. Выходное напряжение  $U_4$  МДМ-усилителя 23 обуславливает прохождение через нагревательный элемент 25 тока  $I_3$ . В результате лучевая энергия

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

превращается в тепловую мощность  $P_{x4} = kQ_{e4} = I_3^2 r$ , которая выделяется на нагревательном элементе 25. На выходе генератора 27 формируется электрический сигнал  $u_4(t) = U_{m4} \sin 2\pi f_4 t$  частоты

$$f_4 = S'_н P_{x4}^2 + S'_л P_{x4} + \Delta f_{см} \quad (13)$$

Данный сигнал аналогичным образом преобразуется в периодическую последовательность прямоугольных импульсов

$$u_{u4}(t) = \frac{\tau_u}{T_{40}} u_0 \left( \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^n \frac{(2n-1) \sin 2\pi f_{40} t}{n-1} \right), \quad (14)$$

где  $T_{40} = 1/f_{40}$ , длительностью  $\tau_u$  и с частотой следования  $f_{40} = f_4 - f_0$ . Эти импульсы поступают в микропроцессор 35, где по программе осуществляется измерение частоты их следования. Результат измерения запоминается в виде кода числа  $N_{40} = f_{40} \Delta t_0$ .

В пятом такте измерений на входы цифроаналогового преобразователя 32 подается код числа  $N_{л1}$ . В результате на выходе цифроаналогового преобразователя 32 формируется ток  $I_{01}$ , который поступает на светоизлучающий диод 18. В этом такте на болометр 17 поступает поток излучения  $\Phi_{ex}$  от нагретого тела и поток  $\Phi_{e2}$  от светоизлучающего диода 18. Интенсивность потока излучения  $\Phi_{e5}$ , поступающая на болометр 17, равна сумме значений интенсивности потоков излучения  $\Phi_{ex}$  и  $\Phi_{e2}$  ( $\{\Phi_{e5}\} = \{\Phi_{ex}\} + \{\Phi_{e2}\}$ ). Падение напряжения на болометре 17 усиливается в  $k_{yc}$  раз с помощью МДМ-усилителя 23. Выходное напряжение  $U_5$  МДМ-усилителя 23 поступает на нагревательный элемент 25, обуславливая прохождение через него тока  $I_4$ . В результате лучевая энергия

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

превращается в тепловую мощность  $P_{x5} = kQ_{e5} = I_4^2 r$ , которая выделяется на нагревательном элементе 25. В результате нагрева термочувствительного пьезорезонатора 24 на выходе генератора сменного напряжения 27 формируется электрический сигнал  $u_5(t) = U_{m5} \sin 2\pi f_5 t$  частоты

$$f_5 = S'_{н} P_{x5}^2 + S'_{л} P_{x5} + \Delta f_{см}, \quad (15)$$

который аналогичным образом преобразуется в последовательность импульсов

$$u_{u5}(t) = \frac{\tau_u}{T_{50}} u_0 \left( \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^n \frac{(2n-1) \sin 2\pi f_{50} t}{n-1} \right), \quad (16)$$

где  $T_{50} = 1/f_{50}$ , длительностью  $\tau_u$  и с частотой следования  $f_{50} = f_5 - f_0$ . С помощью микропроцессора 35 осуществляется измерение частоты следования этих импульсов. Результат измерения запоминается в виде кода числа  $N_{50} = f_{50} \Delta t_0$ .

В шестом такте с помощью микропроцессора 35 проводится обработка результатов промежуточных измерений по уравнению числовых значений

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

По электронным таблицам соответствия, записанным в микропроцессоре 35, определяется действительное значение температуры  $T_x$  объекта по коду числа  $N_x$ . Полученное значение выводится на табло цифрового отсчетного устройства 33.

Предложенное техническое решение радиационного пирометра обеспечивает не только автоматическое исключение всех составляющих систематической погрешности результата определения действительного значения температуры нагретого объекта, но и погрешности от нелинейности. Благодаря этому повышается точность измерения температуры труднодоступных тел или сред и расширяется диапазон ее измерения. Особенностью схемотехнического решения радиационного пирометра является использование термочувствительного пьезорезонаторного преобразователя, который обеспечивает повышение общей чувствительности радиационного пирометра. Высокоточное преобразование выходного сигнала болометра в частоту электрических сигналов упрощает процесс ее высокоточного измерения. Кроме того, за счет использования тройного преобразования типа "интенсивность светового потока – электрическая мощность – тепловая мощность – частота электрического сигнала", которое предусматривает промежуточное интегрирование (см. формулу



(3) электрического сигнала, обеспечивается существенное уменьшение случайной составляющей погрешности измерения.

Важной составной частью радиационного пирометра является микропроцессор. На него возложены функции управления тактами измерений, обработки результатов промежуточных измерений, их хранение и т.д.

В предложенном техническом решении радиационного пирометра повышение точности и чувствительности измерения температуры достигнуто за счет реализации нового метода и соответственного уравнения избыточных измерений. Обработка результатов промежуточных измерений по предложенному уравнению числовых значений обеспечивает исключение влияния на результат измерения абсолютных значений параметров измерительного канала и их отклонений от номинальных значений. Использование многозарядного цифроаналогового преобразователя позволяет с высокой точностью формировать токи, подаваемые на светоизлучающий диод и, тем самым, с высокой точностью реализовать калиброванные по значению интенсивности световые потоки  $\Phi_{e2}$  и  $\Phi_{e3}$ . Расширение диапазона измеряемых температур обеспечивается как за счет повышения точности, так и за счет исключения нелинейной составляющей погрешности. Предложенное техническое решение может быть использовано в научных исследованиях, при измерениях температур труднодоступных объектов.

1. *Приемники* оптического излучения: Справочник. – М.: Радиосвязь, 1987. – 296 с.
2. *А. с. № 1584530* А1, кл. G01J5/22 (СССР) Радиометр / О.С. Михайлов, О.В. Мишагин, Р.Д. Мухамедяров, В.Н. Коптев // Бюл. Изобр. – 10.12.95 – №34.
3. *А. с. № 1803747* А1, кл. G01J5/60 (СССР) Устройство для бесконтактного измерения температуры / В.Л. Моисеев, В.Я. Секаре // Бюл. изобр. – 23.03.93. – №11.
4. *Патент* Украины №18417 С1, кл. G01J5/12. Способ определения радиационной температуры и устройство для его реализации / Г.В. Юрчик, Ю.О. Скрипник, К.О. Глушценко // Бюл. изобр. – 25.12.97. – № 6.
5. *Поскачей А.А., Чубаров Е.П.* Оптико-электронные системы измерения температуры. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.

Получено 15.06.2003