

В. Л. Козлов, С. И. Чубаров

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСКОНТАКТНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

Введение

В случаях, когда использование контактных термодатчиков для контроля тепловых режимов нецелесообразно или принципиально невозможно, измерение температуры осуществляется бесконтактным способом по тепловому излучению методами оптической пирометрии. При

этом регистрируется интенсивность излучения участка поверхности, ограниченного полем визирования прибора, и определяется температура этого участка. Бесконтактные методы измерения температуры, в отличие от контактных способов, не оказывают влияния на контролируемый процесс, обладают высокой технологичностью, производительностью и малым временем измерений.

Еще в начале 60-х годов XX века на кафедре электрофизики проводились исследования по разработке радиационных методов измерения температуры слабонагретых тел [1]. Использование таких методов и созданная на их основе аппаратура была предпочтительна и давала существенный экономический эффект при контроле тепловых режимов элементов полупроводниковой радиоэлектроники [2], дефектоскопии промышленных изделий [3–5], анализе теплофизического состояния движущихся деталей [6], диагностике узлов и блоков машин на основании анализа их тепловых полей (сканирующий пирометр) [7] и решении других промышленных задач. В настоящее время на кафедре продолжают исследования по разработке методов построения и повышения точностных характеристик портативных бесконтактных термометров, а также созданию на их основе измерительной пирометрической аппаратуры для решения различных технологических задач, а также для использования в биологии и медицине.

1. Методы улучшения параметров инфракрасных детекторов излучения

Датчики инфракрасного (ИК) излучения предназначены для обнаружения фотосигналов, измерения их параметров и извлечения необходимой информации при использовании в различных измерительных и диагностических системах. При этом параметры приемников излучения в значительной степени определяют функциональные возможности и точностные характеристики измерительных систем. Разработаны методы улучшения параметров детекторов излучения, работающих в средней ИК-области спектра 3...14 мкм, таких как пороговая чувствительность, точность измерения, время измерения, динамический диапазон [8–14].

Первый метод [8] основан на использовании динамического режима питания ИК-детектора (например, фоторезистора, болометра). Наиболее целесообразно использовать такой режим питания в системах, где приемник излучения включается в плечо балансного моста, подключенного к входам дифференциального усилителя. Динамический режим питания балансного моста позволяет получить переменный электрический сигнал

U_s , пропорциональный интенсивности ИК-излучения, попадающего на детектор, аналогичный сигналу, полученному при использовании внешнего механического модулятора излучения. Амплитуда выходного сигнала при использовании динамического питания будет в два раза выше, чем при внешней механической модуляции.

Значительное улучшение отношения сигнала U_s к шуму U_n достигается при использовании синхронного детектирования на частоте динамического смещения с последующим когерентным накоплением и интегрированием [9]. В системе происходит когерентное накопление сигнала, при этом шумы складываются в противофазе, что обеспечивает повышение чувствительности и точности измерений, исключение шумов и наводок предварительных усилительных устройств. Время измерения определяется частотой динамического питания детектора, находящейся в пределах сотни герц – десятки килогерц. Точность таких систем ограничивается погрешностями, обусловленными разбалансировкой моста в процессе измерения температуры. Если вследствие каких либо причин происходит разбаланс измерительного моста, то в выходном сигнале приемника излучения появляется ошибка ΔU . Для измерения и учета величины ΔU используется раздельное динамическое питание каждого из плеч балансного моста. Однако не всегда имеется возможность обеспечить раздельное динамическое питание каждого из плеч балансного моста, например при гибридно-интегральном исполнении моста. Для измерения величины ΔU в этом случае используется интегрирующий конденсатор, подключенный к выходу опорного плеча. При этом сначала используется низкая частота f_1 динамического питания моста, удовлетворяющая условию $f_1 \ll 1/RC$, а затем частота динамического питания увеличивается до уровня $f_2 > 1/RC$.

Метод динамического питания использовался при построении детектора теплового излучения на базе болометра в спектральном диапазоне 3–14 мкм для системы бесконтактного измерения температуры [10]. Использование такого метода регистрации теплового излучения обеспечило разрешение по температуре 0,05 °С. Необходимо также отметить возможность использования метода при разработке и создании высокочувствительных прецизионных систем регистрации ИК-излучения и миниатюрных бесконтактных измерителей температуры в гибридно-интегральном исполнении.

Повышение точности регистрации интенсивности ИК-излучения и расширение динамического диапазона измеряемых сигналов обеспечива-

ется использованием дополнительного канала обработки информационного сигнала со сдвинутой на $\pi/2$ фазой сигнала когерентного накопления [11]. В обоих каналах используется корреляционная обработка сигналов на основе синхронного детектирования с интегрированием. Первый канал обеспечивает измерение интенсивности излучения. Второй канал используется для компенсации нелинейности характеристики приемника, что обеспечивает повышение точности измерений в широком диапазоне входных сигналов.

Созданные в настоящее время бесконтактные измерители температуры обладают ограниченным диапазоном измерений, определяемым полосой приемника излучения. В большинстве случаев увеличение диапазона измеряемых температур связано с расширением полосы пропускания приемника. Были проведены исследования работы низкотемпературного пирометра в области высоких температур, при которых максимум спектра излучения измеряемого объекта находится за пределами полосы пропускания приемника излучения [12]. Для расширения динамического диапазона работы термометра в сторону более высоких температур получена экспериментальная зависимость выходного сигнала приемника излучения от температуры абсолютно черного тела. Произведен компьютерный расчет нормированного выходного сигнала приемника излучения в соответствии с формулой Планка. В результате анализа экспериментальных данных и результатов математического моделирования показана возможность эффективной работы низкотемпературного пирометра в области высоких температур до 2000 °С, при которых максимум спектра излучения измеряемого объекта находится за пределами полосы пропускания приемника излучения.

Для практического использования результатов исследований с помощью компьютерной обработки была проведена линейная аппроксимация зависимости выходного сигнала приемника излучения от температуры объекта [13]. Линейная аппроксимация заключается в определении участков характеристики, на которых отклонение реальной кривой от линейной не превышает заданной величины. Установлено, что при работе пирометра в области низких температур от -30 до +100 °С для линеаризации характеристики с погрешностью $\delta = 0,1$ °С необходимо 10 линейных участков. Причем при использовании прибора в медицине в диапазоне от +32 до +43 °С отклонение характеристики от линейности не превышает 0,1 °С. В диапазоне температур от -30 до +2000 °С для линейной аппроксимации с погрешностью $\delta = 1\% \pm 1$ °С необходимо учитывать всего 11 линейных участков.

2. Методы бесконтактных измерений температуры и коэффициента излучения объекта

Бесконтактные методы измерения температуры обеспечивают достаточно высокую точность в случае, если точно известно значение коэффициента излучения объекта, зависящего от температуры и времени. Если коэффициент излучения не известен, то требуется использование дополнительных методов и средств для его определения. Для этих целей обычно используются два спектральных измерительных канала, причем температура определяется из отношения сигналов в измерительных каналах. Такие системы обеспечивают высокую точность измерений только в случае, если коэффициенты излучения объекта одинаковы в обоих спектральных диапазонах. Если коэффициенты излучения не одинаковы, то система будет давать значительную погрешность измерений. Наряду с использованием двух спектральных каналов, для измерения коэффициента излучения предлагается повышать температуру объекта (10–30 °С), что обеспечивает более высокую точность измерений. Однако при этом возрастает время измерений и нагрев измеряемого объекта не всегда возможно практически осуществить, особенно при бесконтактных измерениях температуры движущихся объектов, объектов, появляющихся на короткое время в поле зрения, объектов находящихся в труднодоступных местах и под высоким напряжением.

В связи с этим разработан метод бесконтактного измерения температуры и коэффициента излучения объекта [14], обеспечивающий высокую точность измерений в широком температурном диапазоне даже в случае, если коэффициент излучения изменяется в зависимости от температуры и спектрального диапазона. Величина энергии „нечерного“ тела E_{Σ} в спектральном диапазоне λ_1 – λ_2 , излучаемой поверхностью тела, находящегося при температуре T с излучательной способностью $\epsilon(\lambda, T)$, определяется следующим соотношением:

$$E_{\Sigma} = \epsilon(\lambda, T) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_{\lambda T}(\lambda, T) d\lambda, \quad (1)$$

где $b_{\lambda T}$ – спектральное распределение плотности энергии излучения объекта, определяемое формулой Планка.

Выражение (1) по известному значению выходного сигнала приемника излучения E_{Σ} позволяет вычислить температуру объекта при известном значении $\epsilon(\lambda, T)$. Так как в большинстве случаев неизвестно значение излучательной способности $\epsilon(\lambda, T)$, то для однозначного измерения тем-

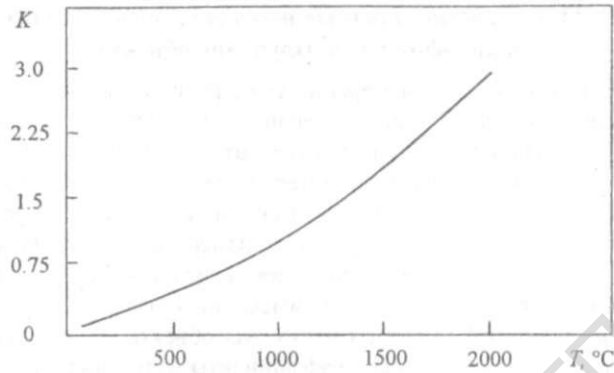


Рис. 1. Зависимость отношения E_1/E_2 от температуры объекта T для спектральных диапазонов измерительных каналов $\lambda_1 = 2.5$ мкм, $\lambda_2 = 12.8$ мкм, $\lambda_3 = 0.9$ мкм, $\lambda_4 = 4.8$ мкм

пературы и излучательной способности необходимо использование двух измерительных каналов со спектральными диапазонами $\lambda_1 - \lambda_2$ и $\lambda_3 - \lambda_4$.

Оба измерительных канала калибруются по "абсолютно черному телу" (АЧТ), коэффициент излучения которого $\varepsilon(\lambda, T) = 1$. Если $\varepsilon_1(\lambda, T) = \varepsilon_2(\lambda, T) = 1$, то по величине сигналов в спектральных диапазонах E_1 или E_2 однозначно определяется истинная температура объекта T . Если $\varepsilon_1(\lambda, T) = \varepsilon_2(\lambda, T) \neq 1$, то оба канала будут показывать неверные, но одинаковые значения температуры объекта, т. е. $T_1 = T_2 \neq T$. В этом случае измерение истинной температуры осуществляется из отношения амплитуд сигналов на выходах каналов E_1/E_2 . На рис. 1 представлена зависимость отношения E_1/E_2 от температуры объекта T для системы, где в первом спектральном канале в качестве приемников излучения использовался полупроводниковый болометр со спектральным диапазоном от $\lambda_1 = 2.5$ мкм до $\lambda_2 = 12.8$ мкм, а во втором – фоторезистор PbSe со спектральным диапазоном от $\lambda_3 = 0.9$ мкм до $\lambda_4 = 4.8$ мкм.

По величине измеренных температур T_1 и T_2 в обоих спектральных диапазонах можно судить о равенстве (или неравенстве) коэффициентов излучения $\varepsilon_1(\lambda, T)$, $\varepsilon_2(\lambda, T)$ в спектральных диапазонах. Если коэффициенты излучения в спектральных каналах не равны: $\varepsilon_1(\lambda, T) \neq \varepsilon_2(\lambda, T)$, то измеренные значения температуры на выходах спектральных каналов также не будут равны $T_1 \neq T_2$. В этом случае отношение коэффициентов излучения в спектральных диапазонах вычисляется по следующему алгоритму:

$$\varepsilon_1/\varepsilon_2 = E_1/E_1'(T_2) \text{ или } \varepsilon_1/\varepsilon_2 = E_2'(T_1)/E_2, \quad (2)$$

где $E_1'(T_2)$ – сигнал на выходе первого канала при температуре АЧТ T_2 , $E_2'(T_1)$ – сигнал на выходе второго канала при температуре АЧТ T_1 .

Затем с учетом полученного отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ измерение истинной температуры T осуществляется из отношения амплитуд сигналов на выходах каналов E_1/E_2 с использованием зависимости, представленной на рис. 1. Коэффициенты излучения в спектральных диапазонах определяются следующим образом:

$$\varepsilon_1 = E_1(T_1)/E_1'(T), \quad \varepsilon_2 = E_2(T_2)/E_2'(T), \quad (3)$$

где T – вычисленная истинная температура объекта.

Разработаны также методы построения систем бесконтактного измерения температуры, обеспечивающие повышение быстродействия и точности измерений [8], повышение стабильности и точности при долговременном температурном контроле различных технологических процессов [10], компенсацию нелинейности преобразования сигнала и расширение динамического диапазона измеряемых температур [11, 12]. Во всех системах используется корреляционная обработка информационного сигнала на основе согласованной фильтрации и когерентного накопления с интегрированием, обеспечивающая улучшение отношения сигнал/шум в $10^2 \dots 10^3$ раз.

3. Портативный бесконтактный термометр с расширенными функциональными возможностями

Функциональная схема разработанного бесконтактного термометра представлена на рис. 2. Излучение от объекта 1 собирается германиевой линзой 2, и попадает на приемник излучения 3, в качестве которого используется пироэлектрический приемник МГ-30 или полупроводниковый болометр БП-2. Для уменьшения погрешностей, вызываемых плохим соотношением сигнал/шум на приемнике, при определении потока излучения используется синхронное детектирование с последующим интегрированием.

Повышение отношения сигнал/шум на выходе синхронного детектора основано на совпадении фазы сигнала с фазой детектора. Импульсы синхронизации, необходимые для синхродетектора, формируются при вращении обтюлятора 4, находящегося перед входным отверстием оптической системы и приводящимся во вращение электродвигателем 5, с помощью светодиода $СД$ и фотодиода $ФД$, а также компаратора 13. При этом на приемник излучения 3 поступают разные оптические потоки: для открытого входного отверстия оптической системы – от измеряемого

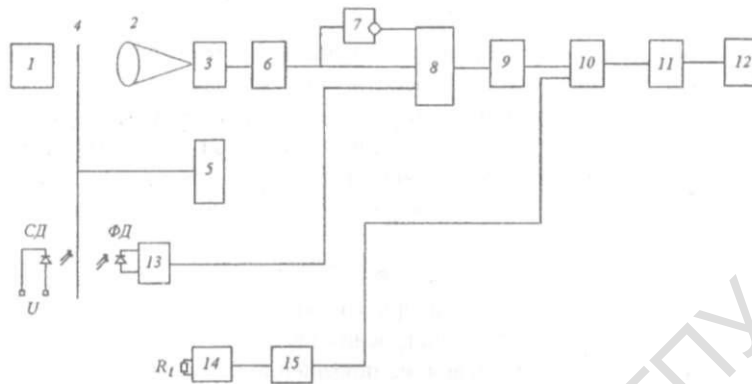


Рис. 2. Функциональная схема бесконтактного термометра

объекта, для закрытого – от равновесного излучения внутренней полости обтюратора и входной оптической системы. Образующийся на выходе приемника 3 переменный сигнал усиливается усилителем 6 и поступает на двухполупериодный детектор, включающий инвертор 7, коммутатор 8 и следящий интегратор 9. На выходе синхродетектора, таким образом, формируется сигнал, характеризующий разность температур измеряемого объекта и внутренней полости приемной системы, который далее поступает на вход сумматора 10.

Температура внутренней полости пирометра контролируется терморезистором R_t , включенным в одно из плеч балансного моста 14. Сигнал разбаланса усиливается усилителем 15 и поступает на другой вход сумматора 10, где используется в качестве отсчетного уровня для определения истинной температуры измеряемого объекта. С выхода сумматора 10 сигнал поступает на плату быстрого аналого-цифрового преобразователя 11 и затем происходит микропроцессорная обработка информационного сигнала в блоке 12.

Функциональные возможности прибора: обеспечивается получение текущего значения температуры, среднего значения температуры за время измерения, максимального, минимального значения температуры, дисперсии, а также хранение в памяти 1024 измеренных значений температуры. В режиме сканирования выводится графическая информация о тепловом поле объекта вдоль линии наблюдения.

Характеристики и функциональные возможности термометра:

диапазон измеряемых температур, °С	-30...+2000
спектральный диапазон приемника, мкм	2.5...12
разрешение при измерении температуры, °С	0.1
погрешность измерений, °С	1% $T_{изм} \pm 1$
диапазон регулировки коэффициента излучения	0.1...1.0
время измерений, с	0.1 – 1
диаметр приемной оптики, мм	5
диапазон рабочих расстояний, м	0.05 – 3
напряжение питания, В	± 5
режимы работы:	
– режим измерения температуры объекта;	
– режим сканирования теплового поля.	

4. Бесконтактный медицинский термометр

Бесконтактный измеритель температуры поверхности тела у новорожденных детей разработан в рамках республиканской программы "Здоровье матери и ребенка". Термометр имеет следующие технические характеристики:

диапазон измеряемых температур, °С	+20...+45
спектральный диапазон приемника, мкм	3...14
разрешение при измерении температуры, °С	0.1
погрешность измерений, °С	
– в диапазоне +20...+45 °С	± 1 °С
– в диапазоне +34...+42 °С	± 0.1 °С
время измерений, с	1
диаметр приемной оптики, мм	5
диапазон рабочих расстояний, м	0.05 – 0.15
диапазон рабочих температур, °С	22 \pm 3

Для компенсации влияния температуры окружающей среды в измерительную головку введена балансная схема компенсации температурного дрейфа, учитывающая изменение температуры внутренней полости термометра, приемника и окружающей среды.

Нами разработаны и внедрены ряд бесконтактных термометров для решения конкретных технических задач: анализа температуры поверхности при изготовлении сварных швов (в институте сварки АНБ), анализа температуры движущихся узлов (в Могилевском машиностроительном институте), для контроля температуры при изготовлении полимерных материалов (в Белорусском Технологическом Университете), оценки

качества теплоизоляции (в ООО "Теплохиммонтажзащита" г. Гродно), контроля тепловых полей арматуры железобетонных конструкций при термической обработке (в УО "Полоцкий государственный университет"), контроля термического упрочнения колесных пар (в Брестском локомотивном депо) и др.

Литература

1. Радиационные измерения температур слабонагретых тел / Под ред. В. Г. Вафиади и М. М. Мирошникова. Мн.: Изд. БГУ им. В. И. Ленина, 1969. 195 с.
2. *Леонов И. Г., Пикублик В. Г., Федотенко А. В.* Радиационный метод исследования тепловых режимов элементов полупроводниковой радиоэлектроники // ИФЖ. 1968. Т. XIV, № 2. С. 334–337.
3. *Леонов И. Г., Могилевич А. В.* Дефектоскопия тонких проволок методом радиационной пирометрии. // Исследование по физике металлов и неразрушающим методам контроля. Мн.: «Наука и техника», 1968.
4. Дефектоскопия тонкостенных трубок методом радиационной пирометрии / И. Г. Леонов, Л. Ф. Корзун, Б. Ю. Ханох, Р. Н. Иванова // Исследование по физике металлов и неразрушающим методам контроля. Мн.: «Наука и техника», 1968.
5. *Леонов И. Г.* К вопросу о дефектоскопии тонких проволок // Дефектоскопия. 1968. № 2. С. 64–67.
6. *Вафиади В. Г.* Фотоэлектрическая автоматика и фотометрия в инфракрасных лучах // Вестник БГУ им. В. И. Ленина. Сер. 1. 1969. № 1. С. 50–54.
7. *Вафиади В. Г.* Фотоэлектрическая автоматика. Мн.: Вышэйшая школа, 1966. 139 с.
8. Патент РБ № 3142 G01j5/00. Устройство для бесконтактного измерения температуры поверхности. Козлов В. Л., Чубаров С. И. 1999.
9. *Kozlov V. L., Rydnets D. N.* Infrared sensor for contactless thermal measurements // VI Konferencja Naukowa COE 2000 (13–16 czerwca 2000, Gliwice). Gliwice, 2000. P. 278–282.
10. *Козлов В. Л.* Улучшение характеристик датчиков инфракрасного излучения // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Сб. материалов XII науч.-техн. конф. М.: МГИЭМ, 2000. С. 87–88.
11. Патент РБ № 3134 G01j5/00. Устройство для бесконтактного измерения температуры. Козлов В. Л., Чубаров С. И. 1999.
12. *Козлов В. Л., Руднец Д. Н.* О расширении диапазона измерений низкотемпературного радиационного пирометра // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Сб. материалов XII науч.-техн. конф. М.: МГИЭМ, 2001. С. 64–65.
13. *Козлов В. Л., Руднец Д. Н.* Методы повышения точностных характеристик инфракрасных детекторов излучения // Лазерная и оптико-электронная техника. Вып. 6. Мн.: БГУ, 2001. С. 101–104.
14. *Kozlov V. L.* Method of contactless temperature and emissivity measurements / Metrologia u progmu trzeciego milenium: Materiały krajowy kongres metrologii (24–27 czerwca 2001 r, Warszawa). Т. I. Warszawa, 2001. P. 119–122.