

УДК: 536.521.2

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

В.К. Битюков[@], д.т.н., заведующий кафедрой, профессор

А.Н. Жуков, аспирант, ассистент

Д.С. Симачков, старший преподаватель

*Кафедра теоретической радиотехники и радиофизики,
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: bitukov@mirea.ru*

Представлена достаточно подробная библиография по методам бесконтактного определения температуры поверхности объектов. Отмечено, что проблеме пирометрии температур, не превышающих 700 К, посвящено чрезвычайно мало исследований, хотя их практическая потребность важна в радиоэлектронике, медицине, строительстве и других отраслях науки и техники. На рынке современного приборного обеспечения имеется большое число отечественных и импортных оптико-электронных систем (ОЭС), пригодных для этих целей. Однако, получаемые с помощью современных ОЭС результаты, как правило, требуют серьезного критического анализа, а иногда являются просто ошибочными. Чаще всего это связано с отсутствием учета или некорректным учетом спектральной зависимости характеристик ОЭС, оптико-физических параметров контролируемого объекта и окружающего его фона. Предложена процедура пирометрии объектов с помощью ОЭС (пирометры, тепловизоры), включающая планарное расположение в поле зрения ОЭС исследуемого объекта, нормальная спектральная излучательная способность поверхности которого известна, и эталонного излучателя, нормальная спектральная излучательная способность которого также известна, а его температура регулируется и измеряется. Для режима равенства полных тепловых потоков объекта и эталонного излучателя предложена математическая модель процесса, позволяющая определить искомое значение температуры поверхности объекта. Методом малых возмущений был выполнен метрологический анализ предложенного метода определения температуры объекта при использовании монохроматической ОЭС. Суть метода малых возмущений состоит в следующем. Вначале на основании выбранных значений параметров вычисляют по соответствующей формуле значение искомой величины. Затем изменяют значение только одного из используемых при расчете параметров на величину его погрешности и проводят новый расчет значения искомой величины. Отклонение полученного значения от исходного и характеризует влияние неточности знания варьируемого параметра на искомую величину. В табличной форме приведены результаты расчетов для длин волн, равных 0.50, 2.0, 5.0, 8.0, 14 и 50 мкм; температурах, равных 400, 700 и 1000 К; нормальных спектральных излучательных способностях объекта, равных 0.1, 0.5 и 0.9; температуре фона, равной 300 К; нормальной спектральной излучательной способности фона, равной 0.5,

и эталонного излучателя, равной 0.98. Показано, что комплексный анализ процесса определения температуры – основного информационного параметра как технологического процесса изготовления объектов, так и их теплового состояния на всех этапах жизненного цикла, должен предшествовать не только процессу измерения температуры поверхности объекта, но и процедуре выбора ОЭС для его реализации. Только в этом случае полученные результаты могут считаться достоверными с установленной реальной погрешностью измерений.

Ключевые слова: метод пирометрии, приборное обеспечение, бесконтактное определение температуры, поверхность объекта, метод малых возмущений, погрешность, монохроматическая оптико-электронная система, результаты расчетов, основной информационный параметр, достоверность результатов.

A METHOD OF CONTACTLESS MEASUREMENT OF SURFACE TEMPERATURE OF RADIO ELECTRONIC OBJECTS

V.K. Bityukov@,
A.N. Zhukov,
D.S. Simachkov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
@Corresponding author e-mail: bitukov@mirea.ru

There exists quite an extensive bibliography on the methods of contactless measurement of temperature of the surfaces of objects. However, very few works have been devoted to studying the pyrometry of temperatures not exceeding 700 K, though these are badly needed for practical application in radio electronics, medicine, construction and other fields of science and technology. The market of modern measuring devices has plenty of domestic and foreign-made optoelectronic systems (OESs) which can be used for these purposes. However, the results obtained with the help of modern OESs in most cases need to be thoroughly analysed, for sometimes they may appear to be wrong. Most often errors occur due to unaccounted or incorrect account of spectral dependence of OES characteristics, opticophysical parameters of the object under control and its background. A procedure for the pyrometry of objects (pyrometers, thermal imagers), using OESs, is proposed, which includes planar arrangement within the view of OES of the object under investigation, the normal spectral emissivity of the surface of which is known, and a reference transmitter, the normal spectral emissivity of which is also known, and its temperature is controlled and measured. A mathematical model of the process is suggested for the mode when full heat flows of the object and the reference transmitter are equal, allowing to define the target temperature value of the object surface. Applying the method of small perturbations, a metrological analysis is made of the proposed method for determining of the temperature of the object with the use of a monochromatic OES. The method of small perturbations can be described as follows: first, based on the selected values of the parameters, using the corresponding formula, calculation is made of the value of the sought quantity. Then, the value of only one of the parameters used in the calculation is changed for the value of its measurement error, and a new calculation is made of the target value. The deviation of the obtained value from the original value characterizes the impact of inaccurate knowledge of the variable parameter on the target value. The table gives the results of calculations of

wavelengths of 0.50, 2.0, 5.0, 8.0, 14 and 50 microns; of temperatures of 400, 700 and 1000 K; of normal spectral emissivity of the object of 0.1, 0.5 and 0.9; of the background temperature of 300 K; of normal spectral background emissivity of 0.5 and reference emitter of 0.98. It can be seen that a comprehensive analysis of the process of temperature measurement, the main information parameter of both the technological process of the manufacturing of objects and their thermal condition at all stages of the life-cycle, should precede both the measurement of the object surface temperature, and also the selection procedure of OES for its realization. Only obtained in this way the results can be considered reliable with the determined real measurement error. Keywords: test bench, integrated circuit chip, characteristics, algorithm, charge pump, control program, virtual panel.

Key words: pyrometry method, assurance of measuring devices, contactless measurement of temperature, object surface, method of small disturbances/perturbations, error, monochromatic optico-electronic systems, calculation results, basic information parameter, credibility of measurement results.

Введение

Температура T – важнейший информационный параметр, характеризующий технологический процесс изготовления объектов и их тепловое состояние на всех этапах его жизненного цикла [1, 2]. В свою очередь, основным параметром, характеризующим тепловое излучение объекта, помимо температуры T , величина которой на поверхности объектов радиоэлектроники, как правило, не превышает 450 K, является его нормальная спектральная излучательная способность ε_λ . Здесь и далее индекс « λ » указывает на спектральную зависимость соответствующего параметра, а λ – длина волны электромагнитного излучения. При этом температура окружающего объект фона изменяется от ~ 273 до ~ 400 K. Отсюда при измерениях температуры возможно возникновение ситуации, когда собственный поток излучения $\Phi_{\text{соб}}$ объекта и отраженный от объекта поток излучения $\Phi_{\text{отр}}$ окружающего его фона соизмеримы.

Вопросу бесконтактного определения температуры поверхности объектов уделяется большое внимание. В экспериментальной практике и промышленных технологиях нашли применение различные методы пирометрии, подробно изложенные в [3–20], но касающиеся, как правило, определения средних и высоких температур, то есть $T > 700$ K. Проблеме пирометрии при $T < 700$ K посвящено значительно меньшее число исследований [1, 2, 20–24], хотя практическая потребность в бесконтактном измерении температур названного уровня чрезвычайно важна в радиоэлектронике, медицине, строительстве и других наукоемких технологиях. Более того, на рынке приборного обеспечения бесконтактного определения температуры поверхности объектов имеется большое число отечественных и импортных оптико-электронных приборов, пирометрических и тепловизионных систем, пригодных для этих целей. Общая тенденция развития оптико-электронного приборостроения состоит в интеллектуализации оптико-электронных систем (ОЭС). Это позволяет уменьшить влияние человеческого фактора на получаемые результаты и, естественно улучшить их метрологические параметры. В то же время эти результаты зачастую требуют серьезного критического анализа, что чаще всего связано с отсутствием учета или некорректным учетом оптико-физических параметров контролируемого объекта и окружающего его фона.

Надо отметить, что в последние 40 лет активно и успешно развиваются методы спектральной пирометрии объектов при отсутствии априорных данных об их излучательной способности [3, 4].

Переход от качественного к количественному контролю, что эквивалентно переходу от поля излучения по поверхности объекта к полю температуры по его поверхности, связан с необходимостью решения, по крайней мере, четырех задач:

- 1) методическое обеспечение процедуры определения температуры поверхности объектов радиоэлектроники с соответствующим метрологическим анализом;
- 2) получение информации о спектральной нормальной излучательной способности ε_λ объекта и окружающего его фона во всем спектральном диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$ ОЭС;
- 3) учет влияния органических лаков, покрывающих поверхность многих объектов радиоэлектроники, частично прозрачных для теплового излучения, на погрешность определения температуры поверхности бесконтактным методом [5, 6];
- 4) измерение температур, соизмеримых с температурой фона, с учетом влияния теплового излучения фона на результаты экспериментов: например, в [25] отмечена типичная методическая погрешность пирометрии объекта, расположенного внутри печи и нагреваемого сгорающим внутри печи газом.

Решению первой задачи и посвящена данная работа.

Метод определения температуры поверхности объекта

Пусть в поле зрения оптико-электронной системы планарно установлены исследуемый объект, нормальная спектральная излучательная способность ε_λ поверхности которого известна, и эталонный излучатель (ЭИ), нормальная спектральная излучательная способность ε_0 которого известна, а его температура T_0 регулируется и измеряется [1]. Отметим, что объект и ЭИ размещены в специальной камере. Такая ситуация реализуется как в промышленных технологических процессах, например, при отжиге изделий в печах [16], так и в экспериментальной практике, в частности, при определении коэффициента теплопроводности [17]. Схема экспериментального стенда показана на рис. 1. ОЭС может находиться в двух фиксированных положениях, обеспечивающих регистрацию излучения по нормали к плоскости расположения объекта и эталонного излучателя. Внутренняя поверхность камеры имеет нормальную спектральную излучательную способность ε_ϕ и температуру T_ϕ . Установив требуемый режим работы объекта, при котором необходимо определить температуру T его поверхности, изменяют температуру T_0 ЭИ до достижения равенства полных тепловых потоков объекта Φ и эталонного излучателя Φ_0 , после этого измеряют температуры T_0 и T_ϕ . Затем по соответствующей формуле вычисляют искомое значение температуры поверхности объекта.

В качестве эталонного излучателя, как правило, используется модель абсолютно черного тела (АЧТ).

Полный тепловой поток Φ объекта равен сумме собственного $\Phi_{\text{соб}}$ и отраженного $\Phi_{\text{отр}}$ потоков, то есть:

$$\Phi = \Phi_{\text{соб}} + \Phi_{\text{отр}}. \quad (1)$$

Собственный тепловой поток объекта $\Phi_{\text{соб}}$, определяемый законом излучения Планка, формирует на выходе оптико-электронной системы электрический сигнал $U_{\text{соб}}$, равный

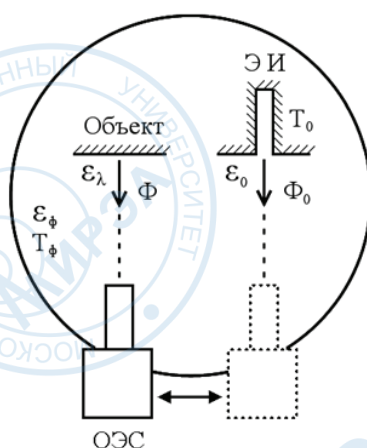


Рис. 1. Схема стенда для реализации метода определения температуры поверхности объектов радиоэлектроники по собственному инфракрасному излучению.

$$U_{cob} = k \cdot \Phi_{cob} = k \cdot f \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \cdot \frac{C_1 \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \cdot d\lambda, \quad (2)$$

где k – коэффициент усиления ОЭС;

f – конструктивный параметр ОЭС;

τ_{λ} – пропускание оптической системы ОЭС и среды, находящейся между объектом и ОЭС;

S_{λ} – вольт-ваттная чувствительность приемника излучения;

C_1 и C_2 – первая и вторая постоянные Планка.

Отраженный от объекта тепловой поток Φ_{omp} , определяемый спектральным коэффициентом отражения объекта, эффективной излучательной способностью ε_{ϕ} фона и его температурой T_{ϕ} , формирует на выходе ОЭС электрический сигнал U_{omp} , равный

$$U_{omp} = k \cdot \Phi_{omp} = k \cdot f \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\phi} \cdot (1 - \varepsilon_{\lambda}) \cdot \frac{C_1 \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\phi}}} - 1 \right)} \cdot d\lambda. \quad (3)$$

Тогда суммарный электрический сигнал U на выходе ОЭС в соответствии с (1)–(3) при регистрации полного потока излучения объекта равен

$$U = k \cdot f \cdot C_1 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\lambda}}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1} + \frac{\varepsilon_{\phi} \cdot (1 - \varepsilon_{\lambda})}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\phi}}} - 1} \right) \cdot d\lambda. \quad (4)$$

Аналогично уравнению (4) при регистрации полного теплового потока излучения эталонного излучателя, имеющего температуру T_0 , выражение для электрического сигнала U_0 на выходе ОЭС имеет вид

$$U_0 = k \cdot f \cdot C_1 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_0}} - 1} + \frac{\varepsilon_\phi \cdot (1 - \varepsilon_0)}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_\phi}} - 1} \right) \cdot d\lambda. \quad (5)$$

В соответствии с требованием предложенного метода выражения (4) и (5) должны быть равными. Это позволяет получить

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_0}} - 1} - \frac{\varepsilon_\lambda}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1} - \frac{\varepsilon_\phi \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_\lambda)}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_\phi}} - 1} \right) \cdot d\lambda = 0. \quad (6)$$

При практической реализации метода выполнение условия равенства выражений (4) и (5) удобно контролировать на экране видеоконтрольного устройства ОЭС в режиме с включенной изотермой. Полученное выражение (6) является уравнением предложенного метода и позволяет определить температуру T поверхности объекта. Аналитически решить уравнение (6) в общем виде не представляется возможным, так как оптико-физические свойства объекта, фона и эталонного излучателя имеют индивидуальный характер.

Уравнение метода определения температуры поверхности объекта при использовании монохроматической ОЭС

Для монохроматического излучения уравнение (6) приобретает следующий вид

$$\frac{\varepsilon_0}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_0}} - 1} - \frac{\varepsilon_\lambda}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T}} - 1} - \frac{\varepsilon_\phi \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_\lambda)}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_\phi}} - 1} = 0. \quad (7)$$

После соответствующих преобразований из уравнения (7) получают выражение для искомой температуры T объекта

$$T = \frac{C_2}{\lambda \cdot \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_\lambda}{\frac{\varepsilon_0}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_0}} - 1} - \frac{\varepsilon_\phi \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_\lambda)}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_\phi}} - 1}} \right)}. \quad (8)$$

Применение метода малых возмущений для метрологического анализа предложенного метода

Методом малых возмущений [26] выполнен метрологический анализ предложенного метода определения температуры объекта при использовании монохроматической ОЭС.

Суть метода малых возмущений достаточно проста. Вначале на основании выбранных значений параметров по соответствующей формуле вычисляют значение искомой величины, например, T . Затем изменяют значение только одного из используемых при расчете параметров, например, i -го, на величину его погрешности и проводят расчет значения искомой величины. Полученное значение T'_i характеризует влияние на T неточности

знания только i -го параметра. Величина $\delta T_i = \frac{(T'_i - T)}{T} \cdot 100\%$ является количественной мерой

влияния i -го параметра на погрешность определения T .

При анализе влияния $(i+1)$ -го параметра на погрешность определения T значение i -го параметра возвращалось к исходному, а изменялось значение только $(i+1)$ -го параметра на величину его погрешности. Далее проводили расчет значения искомой величины. Полученное значение T'_{i+1} характеризует влияние на T неточности знания только $i+1$ -го па-

раметра. Величина $\delta T_{i+1} = \frac{(T'_{i+1} - T)}{T} \cdot 100\%$ является количественной мерой влияния $i+1$ -го параметра на погрешность определения T .

Такую процедуру выполняли для всех параметров, определяющих метрологию анализируемого процесса.

Температура эталонного излучателя T_0 , в отличие от других перечисленных параметров, по условиям метода должна определяться экспериментально в условиях измерения температуры поверхности T объекта. По этой причине предварительно для метрологического анализа бесконтактного метода определения температуры объекта T по формуле (8) принимали, что она (температура объекта), как и другие параметры, известна, а неизвестной является только температура эталонного излучателя T_0 , которую и вычисляли.

Затем полученное значение T_0 использовали для определения T по уравнению (8) при сохранении неизменными значений остальных параметров.

При найденном значении температуры эталонного излучателя T_0 и выбранных остальных параметрах определяли T . Естественно, что значение T совпадало со значением температуры объекта, принятого при вычислении T_0 . Это совпадение является подтверждением правильности решения уравнения (8) относительно T и T_0 . Затем, изменяя значение лишь одного из параметров на величину его погрешности, вычисляли новое значение температуры объекта T'_i .

В табл. 1–3 приведены результаты расчетов. Они выполнены при следующих параметрах: $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ – вторая постоянная Планка; длинах волн λ , равных 0.50, 2.0, 5.0, 8.0, 14 и 50 мкм; температурах T , равных 400, 700 и 1000 К; нормальных спектральных излучательных способностях ϵ_λ объекта, равных 0.1, 0.5 и 0.9; температуре фона T_ϕ , равной 300 К; нормальной спектральной излучательной способности фона ϵ_ϕ равна 0.5; нормальная спектральная излучательная способность эталонного излучателя ϵ_0 равна 0.98.

Значения погрешности этих параметров выбраны следующие: относительные погрешности $\delta\varepsilon_\lambda=5\%$; $\delta T_0=0.1\%$; абсолютные погрешности равны $\Delta\varepsilon_0 = -0.05$; $\Delta\varepsilon_\phi = 0.1$; $\Delta T_\phi = 0.5$ К. При расчете δT_λ для $\lambda = 0.50$ мкм абсолютную погрешность $\Delta\lambda$ выбирали равной $\Delta\lambda=0.01$ мкм, а при $\lambda=2.0$ мкм – $\Delta\lambda=0.1$ мкм. Для остальных длин волн абсолютная погрешность их знания принята $\Delta\lambda=0.2$ мкм.

Таблица 1. Оценка погрешностей определения температуры поверхности объекта, связанных с неточностью знания экспериментально измеряемых параметров и используемых оптико-физических параметров (при монохроматическом излучении 0.50 и 2.0 мкм)

λ , мкм	T , К	ε_λ	T_0 , К	$\delta T_{\varepsilon_\lambda}$, % ($\delta\varepsilon_\lambda = 5\%$)	δT_{ε_0} , % ($\Delta\varepsilon_0 = -0.05$)	δT_{T_0} , % ($\delta T_0 = 0.1$)	$\delta T_{\varepsilon_\phi}$, % ($\Delta\varepsilon_\phi = 0.1$)	δT_{T_ϕ} , % ($\Delta T_\phi = 0.5$ К)	δT_λ , % ($\Delta\lambda = 0.01$ мкм $\Delta\lambda = 0.1$ мкм)	θ , %
0.50	1000	0.1	926.82	-0.17	-0.17	0.11	0	0	0.80	0.92
		0.5	977.49	-0.17	-0.17	0.10	0	0	0.23	0.39
		0.9	997.40	-0.17	-0.17	0.10	0	0	0.03	0.29
	700	0.1	663.34	-0.12	-0.12	0.11	0	0	0.56	0.65
		0.5	688.89	-0.12	-0.12	0.10	0	0	0.16	0.28
		0.9	698.73	-0.12	-0.12	0.10	0	0	0.02	0.22
	400	0.1	387.75	-0.07	-0.07	0.10	0	0	0.32	0.38
		0.5	396.35	-0.07	-0.07	0.10	0	0	0.09	0.18
		0.9	399.58	-0.07	-0.07	0.10	0	0	0.01	0.15
2.0	1000	0.1	760.03	-0.67	-0.70	0.13	0	0	3.25	3.78
		0.5	915.7	-0.67	-0.70	0.11	0	0	0.92	1.48
		0.9	989.7	-0.67	-0.70	0.10	0	0	0.10	1.08
	700	0.1	573.26	-0.47	-0.49	0.12	0	0	2.26	2.60
		0.5	657.60	-0.47	-0.49	0.11	0	0	0.65	1.04
		0.9	694.94	-0.47	-0.49	0.10	0	0	0.07	0.76
	400	0.1	355.32	-0.27	-0.28	0.11	0.01	0	1.25	1.44
		0.5	385.81	-0.27	-0.28	0.10	0	0	0.36	0.60
		0.9	398.34	-0.27	-0.28	0.10	0	0	0.04	0.44

Суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта при доверительной вероятности 0.95 рассчитывали по формуле [27]:

$$\theta = 1,1 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (\delta T_i)^2}, \% \quad (9)$$

где m – число варьируемых параметров.

Информация, приведенная в табл. 1–3 и содержащая результаты метрологического расчета параметров предложенного бесконтактного метода определения температуры поверхности объекта, позволяет сделать ряд выводов, которые необходимо учитывать при практической реализации метода.

Погрешности $\delta\varepsilon_\lambda$ и $\delta T_{\varepsilon_\lambda}$ имеют разные знаки, причем для рассмотренных длин волн пирометрии с ростом измеряемой температуры объекта значение $\delta T_{\varepsilon_\lambda}$ также возрастает и не зависит от значения ε_λ (при одном и том же значении $\delta\varepsilon_\lambda = 5\%$). Так, при $\lambda = 5.0$ мкм (эта длина волны используется в пирометрах для измерения температуры различных стекол) $\delta\varepsilon_\lambda = 5\%$ приводит к $\delta T_{\varepsilon_\lambda} = 1.6\%$ на уровне 1000 К и 0.6% – при $T=400$ К. Такое соотношение наблюдается для всех рассмотренных длин волн.

Таблица 2. Оценка погрешностей определения температуры поверхности объекта, связанных с неточностью знания экспериментально измеряемых параметров и используемых оптико-физических параметров (при монохроматическом излучении: 5.0 и 8.0 мкм)

λ , мкм	T, K	ε_λ	T_0 , K	$\delta T_{\varepsilon_\lambda}$, % ($\delta \varepsilon_\lambda = 5$)	δT_{ε_0} , % ($\Delta \varepsilon_0 = -0.05$)	δT_{T_0} , % ($\delta T_0 = 0.1$)	$\delta T_{\varepsilon_\phi}$, % ($\Delta \varepsilon_\phi = 0.1$)	δT_{T_ϕ} , % ($\Delta T_\phi = 0.5$ K)	δT_λ , % ($\Delta \lambda = 0.2$ мкм)	θ , %
5.0	1000	0.1	565.01	-1.58	-1.67	0.17	0.03	0	2.73	3.93
		0.5	819.33	-1.58	-1.67	0.12	0	0	0.74	2.66
		0.9	976.00	-1.58	-1.67	0.10	0	0	0.08	2.53
	700	0.1	453.13	-1.15	-1.21	0.15	0.09	0.01	2.06	2.93
		0.5	604.07	-1.15	-1.21	0.12	0.01	0	0.59	1.96
		0.9	687.69	-1.15	-1.21	0.10	0	0	0.07	1.85
	400	0.1	315.09	-0.64	-0.67	0.18	1.13	0.09	0.98	1.95
		0.5	368.24	-0.64	-0.67	0.11	0.12	0.01	0.30	1.09
		0.9	396.07	-0.64	-0.67	0.10	0.01	0	0.03	1.03
8.0	1000	0.1	466.21	-2.21	-2.36	0.19	0.51	0.03	1.94	4.19
		0.5	758.15	-2.21	-2.36	0.12	0.05	0	0.51	3.60
		0.9	966.43	-2.21	-2.36	0.10	0	0	0.05	3.56
	700	0.1	386.92	-1.70	-1.81	0.19	0.95	0.05	1.57	3.40
		0.5	565.44	-1.70	-1.81	0.12	0.10	0.01	0.44	2.78
		0.9	681.88	-1.70	-1.81	0.10	0.01	0	0.05	2.73
	400	0.1	295.57	-0.94	-1.00	0.26	4.50	0.21	0.91	5.28
		0.5	355.78	-0.94	-1.00	0.12	0.46	0.02	0.24	1.62
		0.9	394.24	-0.94	-1.00	0.10	0.04	0	0.03	1.51

Таблица 3. Оценка погрешностей определения температуры поверхности объекта, связанных с неточностью знания экспериментально измеряемых параметров и используемых оптико-физических параметров (при монохроматическом излучении: 14 и 50 мкм)

λ , мкм	T, K	ε_λ	T_0 , K	$\delta T_{\varepsilon_\lambda}$, % ($\delta \varepsilon_\lambda = 5$)	δT_{ε_0} , % ($\Delta \varepsilon_0 = -0.05$)	δT_{T_0} , % ($\delta T_0 = 0.1$)	$\delta T_{\varepsilon_\phi}$, % ($\Delta \varepsilon_\phi = 0.1$)	δT_{T_ϕ} , % ($\Delta T_\phi = 0.5$ K)	δT_λ , % ($\Delta \lambda = 0.2$ мкм)	θ , %
14	1000	0.1	381.50	-2.89	-3.12	0.23	3.29	0.10	0.99	6.02
		0.5	695.18	-2.89	-3.12	0.12	0.35	0.01	0.24	4.70
		0.9	956.09	-2.89	-3.12	0.10	0.03	0	0.02	4.68
	700	0.1	328.81	-2.37	-2.54	0.26	5.17	0.15	0.92	6.93
		0.5	522.19	-2.37	-2.54	0.13	0.55	0.02	0.23	3.88
		0.9	674.84	-2.37	-2.54	0.10	0.05	0	0.02	3.82
	400	0.1	272.70	-1.37	-1.47	0.38	13.69	0.38	0.84	15.26
		0.5	339.45	-1.37	-1.47	0.14	1.38	0.04	0.17	2.69
		0.9	391.64	-1.37	-1.47	0.10	0.11	0	0.02	2.22
50	1000	0.1	289.58	-3.71	-4.01	0.26	15.68	0.20	0.16	18.27
		0.5	620.97	-3.71	-4.01	0.12	1.69	0.02	0.02	6.30
		0.9	943.76	-3.71	-4.01	0.10	0.14	0	0	6.02
	700	0.1	256.00	-3.29	-3.56	0.32	22.63	0.29	0.20	25.46
		0.5	464.15	-3.29	-3.56	0.13	2.44	0.03	0.03	5.97
		0.9	665.10	-3.29	-3.56	0.10	0.20	0	0	5.34
	400	0.1	221.97	-2.29	-2.47	0.49	41.48	0.53	0.29	46.18
		0.5	305.79	-2.29	-2.47	0.14	4.39	0.06	0.04	6.09
		0.9	386.13	-2.29	-2.47	0.10	0.36	0	0	3.73

При использовании коротковолнового излучения основной вклад в суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта вносит неточность знания длины волны используемой оптико-электронной системы. Так, при $\lambda = 0.50$ мкм абсолютная погрешность знания длины волны $\Delta\lambda = 0.01$ мкм приводит к относительной погрешности определения температуры δT_λ , равной 0.03, 0.02 и 0.01% для $T = 1000, 700$ и 400 К, соответственно, для малоотражающих поверхностей и 0.80, 0.56 и 0.32% для указанных температур малоизлучающих поверхностей, соответственно. Причина этого факта обусловлена особенностью спектрального распределения излучаемой объектом энергии, то есть распределением Планка.

При использовании ОЭС, работающей в ближней и/или дальней инфракрасной области спектра (этот диапазон длин волн используется в большинстве тепловизионных систем), основной вклад в суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта вносят неточности знания ε_λ и ε_0 . Так, для $\lambda = 14.0$ мкм 5%-ная погрешность в знании ε_λ приводит к $\delta T_{\varepsilon_\lambda} = -2.9$ и -1.4% при $T = 1000$ и 400 К, соответственно. Для $\lambda = 14.0$ мкм абсолютная погрешность $\Delta\varepsilon_0 = -0.05$ приводит к $\delta T_{\varepsilon_0} = -3.1$ и -1.5% для $T = 1000$ и 400 К, соответственно.

Вполне ожидаема роль неточности знания излучательной способности фона $\Delta\varepsilon_\phi$ и его температуры ΔT_ϕ . Видно, что при использовании коротковолнового участка спектра излучения ($\lambda = 0.50$ мкм и $\lambda = 2.0$ мкм) погрешности знания излучательной способности фона и его температуры практически не влияют на суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта. Однако при использовании длинноволнового участка спектра излучения метрологическая ситуация кардинально изменяется. Например, при $\lambda = 50.0$ мкм и $T = 400$ К абсолютная погрешность $\Delta\varepsilon_\phi = 0.1$ приводит к относительной погрешности $\delta T_{\varepsilon_\phi} = 41, 4.4$ и 0.4% для $\varepsilon = 0.1, 0.5$ и 0.9 , соответственно. Погрешность знания температуры фона для рассматриваемых условий вносит лишь незначительный вклад в численное значение θ .

Таким образом, параметры поверхности исследуемого объекта пирометрии, окружающего его фона и используемой оптико-электронной системы по-разному влияют на метрологические параметры результатов измерений [28]. Предложенный подход позволяет определить реальную погрешность измерения температуры поверхности объекта, а, следовательно, приблизить метрологические параметры ОЭС, указываемые их производителями, и метрологические параметры результатов измерения, получаемые пользователями ОЭС.

Выводы

Предложена математическая модель метода определения температуры поверхности объекта – основного информационного параметра технологических процессов производства объектов и их теплового состояния на всех этапах жизненного цикла. Для монохроматических оптико-электронных систем методом малых возмущений выполнен метрологический анализ предложенного способа определения температуры поверхности объекта. Комплексный анализ пирометрии, подобный рассмотренному, должен предшествовать не только процессу измерения температуры поверхности объекта, но и процедуре выбора оптико-электронной системы для его реализации.

Литература:

1. Битюков В.К. Диагностирование радиоэлектронной аппаратуры по собственному инфракрасному излучению // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1991. № 2. С. 227–235.
2. Битюков В.К. Об одном способе учета излучения фона при бесконтактном тепловом контроле // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 1991. Т. 34. № 1. С. 90–96.
3. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.
4. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5–28.
5. Битюков В.К., Петров В.А. Бесконтактное измерение температуры диэлектриков и полупроводников. Ч. I // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 6. С. 403–418.
6. Битюков В.К., Петров В.А. Бесконтактное измерение температуры диэлектриков и полупроводников. Ч. II // Микроэлектроника. 2005. Т. 34. № 1. С. 3–20.
7. <http://temperatures.ru> (дата обращения 15.07.2016 г.).
8. Фрунзе А.В., Фрунзе А.А. Новые пирометры ТЕРМОКОНТ для измерения температуры металлов на основе фотодиодных приемников // Датчики и системы. 2014. № 3. С. 59–61.
9. Захаренко В.А., Кликушин Ю.Н., Пономарев Д.Б. Пирометры компенсационного типа // Метрология. 2014. № 4. С. 25–31.
10. Ходунков В.П., Походун А.И. Определение действительной температуры объекта при тепловизионных измерениях // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 42–46.
11. Мирошников М.М. Тепловидение – высшее достижение оптико-электронного приборостроения // Тепловидение: Межвузовский сборник научных трудов. М.: МИРЭА, 1992. С. 4–6.
12. Девятков Н.Д., Жуков А.Г. Разработки тепловизионной аппаратуры ГНПП «Исток» // Тепловидение: Межвузовский сборник научных трудов. М.: МИРЭА, 1992. С. 47–52.
13. Евтихийев Н.Н., Куртев Н.Д., Голубь Б.И., Смирнов А.В. Широкоспектральный тепловизор АТП-47С // Тепловидение: Межвузовский сборник научных трудов. М.: МИРЭА, 1994. С. 49–52.
14. Фрунзе А.А. О чем полезно знать при выборе пирометра // Фотоника. 2013. Т. 37. № 1. С. 110–118.
15. Ионов А.Б. Метрологические проблемы пирометрии: анализ и перспективы преодоления // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 42–45.
16. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. [и др.]. Температурные измерения: справочник / Отв. ред. О.А. Геращенко. Киев: Наукова думка, 1989. 704 с.
17. Битюков В.К., Петров В.А. Установка для измерения коэффициента теплопроводности твердых частично прозрачных для теплового излучения материалов // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4. № 1. С. 72–77.
18. Битюков В.К., Петров В.А. Методы и средства бесконтактного контроля теплового состояния изделий. М.: МИРЭА, 1999. 96 с.
19. Битюков В.К., Петров В.А. Контроль теплового состояния изделий радиоэлектроники из полупрозрачных материалов. М.: МИРЭА, 2000. 187 с.
20. Фрунзе А.В. О дальнейших путях развития пирометрии // Приборы. 2012. № 7(145). С. 54–59.

21. Фрунзе А.А., Фрунзе А.В. О погрешностях измерений температуры реальных объектов энергетическими пирометрами // Датчики и системы. 2014. № 3. С. 41–43.
22. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Исследование точности измерения температуры на основе анализа энергетического баланса на приемнике излучения ИК-прибора // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 48–52.
23. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Влияние погрешностей задания рабочих параметров на точность измерения температуры инфракрасными приборами // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 60–64.
24. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Прогнозы развития тепловизионной техники и твердотельной фотоэлектроники: как быстро они сбываются // Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: ОАО НПО «Орион», 2014. С. 27–29.
25. Фрунзе А.В. Об одной малоизвестной особенности пирометров спектрального отношения // Фотоника. 2013. Т. 39. № 3. С. 86–94.
26. Bityukov V.K., Petrov V.A., Stepanov S.V. Contactless Measurements of the Thermal Conductivity of Semitransparent Materials at High Temperatures // High Temperatures-High Pressures. 1980. V. 12. № 2. P. 229–236.
27. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.
28. Фрунзе А.В. Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора // Фотоника. 2012. Т. 33. № 3. С. 46–51.