

# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

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

г. Киев

*Abstract. Kondratov V.T., Zarnicina A.A., Serduk N.M. Optical-electronic methods of redundant measurements of temperature. In operation the essence of optical-electronic methods of redundant measurements of temperature of heated ph is considered. Is developed and the classification of these methods is circumscribed. The operation is of interest for the experts in the field of noncontact methods of measurement of temperature of heated bodies and objects.*

**Постановка проблемы и ее актуальность.** Оптико-электронные методы измерения температуры, называемые также пирометрическими методами, — это методы бесконтактного измерения температуры нагретых тел по их энергетическим и спектральным характеристикам в одном или нескольких диапазонах длин волн. Необходимость бесконтактного измерения температуры возникает тогда, когда требуется измерять высокие температуры (сотни и тысячи градусов) в жестких условиях протекания технологических процессов [1]. Оптико-электронные методы измерения температуры нагретых тел широко используются при бесконтактных измерениях температуры быстропротекающих процессов нагрева или охлаждения веществ, материалов или изделий, при измерении температуры удаленных, труднодоступных или движущихся объектов, когда непосредственный контакт сенсора температуры с контролируемым объектом или средой недопустим.

Третье тысячелетие ознаменовалось созданием теории (ТИИ) и методов (МИИ) избыточных измерений физических величин (ФВ) с автоматической коррекцией случайных и систематических составляющих погрешности результата измерений при нелинейной и нестабильной функции преобразования (ФП) сенсора или измерительного преобразователя. Эта теория является самостоятельным направлением в общей теории измерений и получила широкое развитие при решении разных прикладных измерительных задач [2], поскольку обес-

печивает повышение точности измерений, сопоставимой с точностью рабочих мер.

**Постановка задачи исследования.** Одной из прикладных ветвей теории и методов избыточных измерений являются оптико-электронные (ОЭ) МИИ температуры. Накопленный опыт разработки ОЭ МИИ температуры обусловил необходимость анализа и обобщения существующих сведений и получения упорядоченной совокупности знаний об этих методах. Это обусловлено тем, что известная классификация оптико-электронных методов измерения температуры, по-нашему мнению, является весьма общей и в полной мере не отражает сущность МИИ.

**Цель исследования.** Целью настоящей работы является решение задачи получения системы знаний об ОЭ МИИ температуры в виде совокупности определений, разработки и описания укрупненной классификации этих методов.

**Основной материал и результаты исследования.** ОЭ МИИ температуры — это методы, основанные на выполнении конечной совокупности прямых измерений контролируемой ФВ и нескольких корректирующих величин (энергетической яркости или интенсивности излучения нагретого тела). Последние связаны с контролируемой ФВ по известному закону при неизменных и дискретно измененных нормированных значениях функции преобразования (ФП) приемника излучения. Действительные значения температуры определяются согласно уравнению избыточных измерений [2, 3].

Уравнения избыточных измерений получают в результате решения, в общем случае, систем нелинейных уравнений величин, которые фактически является математическими моделями ОЭ МИИ и могут быть записаны следующим образом.

– Для энергетических методов:

$$\left. \begin{aligned} y_{i1} &= f(T_R, \varepsilon_T, S_{\varepsilon1}, S_{i1}), \\ y_{i2} &= f(T_R + \Delta T_R, \varepsilon_T, S_{\varepsilon1}, S_{i1}), \\ y_{i3} &= f(T_R - \Delta T_R, \varepsilon_T, S_{\varepsilon1}, S_{i1}), \\ y_{i4} &= f(T_R, \varepsilon_T, k_{\varepsilon2} S_{\varepsilon1}, S_{i1}), \\ y_{i5} &= f(\Delta T_R, \varepsilon_T, S_{\varepsilon1}, S_{i1}), \\ y_{i6} &= f(k_{\varepsilon1} \Delta T_R, \varepsilon_T, S_{\varepsilon1}, S_{i1}), \end{aligned} \right\},$$

где  $y_{н1}, y_{н2}, \dots, y_{н6}$  — выходные величины приемника излучения,  $k_{л1}$  и  $k_{л2}$  — соответственно первый и второй коэффициенты, называемые в ТИИ коэффициентами локальной линеаризации (КЛЛ) [1, 2];  $\Delta T_R$  — нормированное по значению приращение радиационной температуры;  $\varepsilon_T$  — коэффициент излучения, не зависящий от длины волны.

– Для спектральных методов:

$$\left. \begin{aligned} y'_{i1} &= f(T_L, \varepsilon_{\lambda,T}, S_{\varepsilon 2}, S_{i2}), \\ y'_{i2} &= f(T_L + \Delta T_L, \varepsilon_{\lambda,T}, S_{\varepsilon 2}, S_{i2}), \\ y'_{i3} &= f(T_L - \Delta T_L, \varepsilon_{\lambda,T}, S_{\varepsilon 2}, S_{i2}), \\ y'_{i4} &= f(T_L, \varepsilon_{\lambda,T}, k'_{\varepsilon 2} S_{\varepsilon 2}, S_{i2}), \\ y'_{i5} &= f(\Delta T_L, \varepsilon_{\lambda,T}, S_{\varepsilon 2}, S_{i2}), \\ y'_{i6} &= f(k'_{\varepsilon 1} \Delta T_L, \varepsilon_{\lambda,T}, S_{\varepsilon 2}, S_{i2}), \end{aligned} \right\}$$

где  $y'_{н1}, y'_{н2}, \dots, y'_{н6}$  — выходные величины приемника излучения;  $k'_{л1}$  и  $k'_{л2}$  — соответственно первый и второй КЛЛ;  $\Delta T_L$  — нормированное по значению приращение спектральной температуры;  $\varepsilon_{\lambda,T}$  — спектральный коэффициент излучения;

– Для энергетических методов в общем виде:

$$T_i = \Delta T_R k S_R,$$

где  $k$  — некоторая константа, значение которой с высокой точностью вычисляется по заданным значениям КЛЛ  $k_{л1}, k_{л2}$  и коэффициента пропорциональности  $n_1$  ( $k = \{f_{л}(n_1, k_{л1}, k_{л2})\} = \text{const}$ );  $S_R$  — крутизна общей функции преобразования цифрового измерительного прибора (ЦИП), реализующего ОЭ МИИ температуры ( $\{S_R\} = \{f_{пр}(y_{н1}, y_{н2}, y_{н3}, y_{н4}, y_{н5}, y_{н6})\}$ );  $n_1$  — некоторое число, характеризующее чувствительность МИИ независимо от значений КЛЛ  $k_{л1}$  и  $k_{л2}$  и результатов измерений основной и корректирующих величин (обычно  $n_1 = 1, 2, 4$ ).

Для спектральных методов уравнение избыточных измерений температуры имеет вид

$$T_i = \Delta T_L k' S_L,$$

где  $k'$  — некоторая константа, значение которой с высокой точностью вычисляется по заданным значениям коэффициентов локальной линеаризации  $k'_{л1}, k'_{л2}$  и коэффициента пропорциональности  $n_2$  ( $k' = \{f_{л}(n_2, k'_{л1}, k'_{л2})\} = \text{const}$ );  $S_L$  —

крутизна общей функции преобразования ЦИП ( $\{S_L\} = \{f_{\text{пр}}(y'_{n1}, y'_{n2}, y'_{n3}, y'_{n4}, y'_{n5}, y'_{n6})\}$ );  $n_2$  — число, характеризующее чувствительность МИИ, как и в энергетических методах.

ОЭ МИИ температуры, в зависимости от измеряемых характеристик излучения (абсолютных значений энергетической яркости или интенсивности теплового потока излучения, или его спектрального распределения), делятся на две большие группы, — энергетические и спектральные методы, независимо от характера и используемой модели излучения [1, 2] (рис. 1).

В основу энергетических методов измерения температуры положена зависимость полной энергетической яркости исследуемого объекта (ИО) от его температуры. Передача энергии теплового излучения ИО осуществляется электромагнитными волнами в широком или узком диапазоне частот.

Поэтому оптико-электронные методы измерения температуры отличаются между собой по ширине полосы пропускания излучения ИО, в зависимости от того, измеряется суммарная (по всему спектру частот) или частичная (на ограниченном участке диапазона частот) энергетическая яркость ИО.

В основу спектральных методов измерения температуры положен закон Планка, который определяет зависимость спектрального распределения энергетической яркости ИО от абсолютной температуры  $T_x$  и описывается уравнением величин [1, 2]

$$B_{\text{п}}(\lambda, T_x) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (C_2/e^{\lambda T} - 1)^{-1},$$

где  $C_1$  — первая постоянная излучения ( $C_1 = 0,037413 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>2</sup>);  $C_2$  — вторая постоянная излучения ( $C_2 = 0,014388$  м·К);  $\lambda$  — длина волны, м;  $T_x$  — абсолютная температура, К.

Как частные случаи закона Планка известны закон Вина и закон Релея-Джинса [1, 2]. Закон Вина справедлив при малых значениях длин волн и температур, т.е. при  $\{\lambda\} \{T_x\} < 2 \cdot 10^{-3}$  м·К (видимая и ультрафиолетовая область спектра). В этом случае формулу Планка можно заменить формулой Вина, которую запишем в виде уравнения величин

$$B_{\text{в}}(\lambda, T_x) = (C_1/\pi) \cdot \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda \cdot T_x).$$

При больших значениях длин волн, т.е. при  $\{\lambda\} \cdot \{T_x\} \gg 0,2 \text{ м}\cdot\text{К}$ ), и измерениях средних и малых значений температур используют уравнение величин Релея-Джинса

$$B_p(\lambda, T_x) = (C_1 / C_2) \cdot \lambda^{-4} \cdot T_x .$$

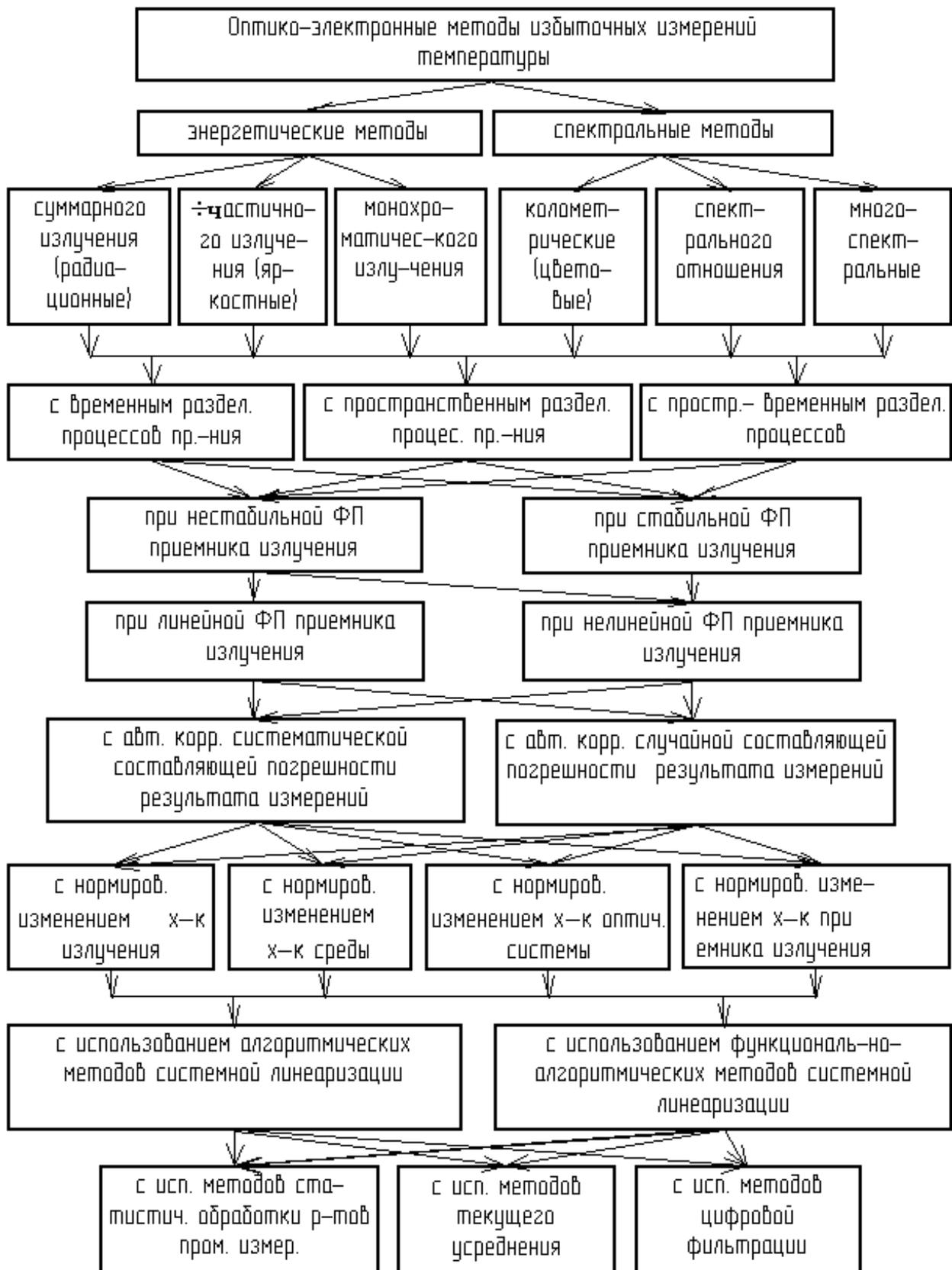


Рисунок 1 — Классификация оптоэлектронных методов избыточных измерений температуры

Энергетические методы определения температуры ИО по спектральному диапазону энергии теплового излучения делятся на оптико-электронные методы измерения температуры по суммарному (полному) излучению ИО (СИЗ-методы) или радиационные методы, на оптикоэлектронные методы измерения температуры по частичному (или избирательному на одном или нескольких участках спектра) излучению (ЧИЗ-методы) или яркостные методы, а также на монохроматические методы измерения температуры по монохроматическому излучению ИО (МИЗ-методы измерения температуры) (рис. 1).

СИЗ-методы основанные на использовании зависимости от температуры полной энергетической яркости с воспринимающей поверхностью ИО в широком спектральном диапазоне длин волн ( $\{\Delta\lambda\} \rightarrow \infty$ ).

ЧИЗ-методы (яркостные) основаны на измерении частичного излучения или неполной энергетической яркости ИО в одном или нескольких ограниченных спектральных диапазонах и сравнении ее с известной яркостью черного тела (ЧТ) или иного образцового излучателя. Температура ЧТ, при которой его яркость в узкой области спектра равна яркости ИО в той же области спектра при температуре  $T_x$ , называется яркостной температурой [2].

МИЗ-методы основаны на определении температуры ИО по результатам измерения энергетической яркости или интенсивности теплового потока излучения на фиксированной длине волны, например,  $\lambda=0,667$  мкм или  $\lambda = 1$  мкм.

Спектральные оптико-электронные методы измерения температуры по способу сравнения цветов делятся на колориметрические методы (КОЛ-методы), методы спектрального отношения (СОТ-методы) и многоспектральные методы (МОС-методы) [2].

КОЛ-методы основаны на уравнивании цвета ИО с цветом, полученным за счет использования разных (аддитивных или субтрактивных) способов синтеза цветов с последующим определением температуры по градуировочным шкалам, пересчетным таблицам или графикам.

СОТ-методы — на принципе измерения отношения энергетической яркости или интенсивностей двух потоков излучения с разными спектральными составами. Этот метод предполагает автоматическое спектрофотометрическое уравнивание цветов с использованием, например фотоприемника.

МОС-методы — на измерении спектральных характеристик излучения ИО на  $m$  заданных спектральных участках с последующим определением отношения пар потоков и расчетом цветности и температуры ИО по соответствующим уравнениям измерений.

Известно, что измерительные процессы протекают в пространстве и во времени. Поэтому, ОЭ МИИ температуры по данному признаку делятся на методы с одновременным, с пространственным и с пространственно-временным преобразованием энергетической яркости или интенсивности потока излучения. ОЭ МИИ температуры с временным разделением процесса преобразования интенсивности теплового потока называются также многократными методами. Они представляют собой методы избыточных измерений однородных ФВ с временным разделением каналов при одном или нескольких нормированных значениях их характеристик.

ОЭ МИИ температуры с пространственным разделением процесса преобразования интенсивности теплового потока называются также многоканальными методами. Многоканальные методы — это методы измерений однородных ФВ (в частности, например, интенсивности потока излучения) с пространственным разделением каналов. ОЭ МИИ температуры с пространственно-временным разделением процесса преобразования называются также комбинированными методами.

Существенный вклад в погрешность результата измерения температуры вносит нелинейность функции преобразования (ФП) приемника излучения, а также временная и температурная нестабильность ее параметров.

По признаку стабильности параметров приемника излучения, различают методы измерений при стабильной и при нестабильной ФП. По характеру ФП ОЭ МИИ делятся на методы измерений при линейной и нелинейной ФП.

ОЭ МИИ температуры по способу получения информативной избыточности делятся на методы, в которых получение избыточности достигается путем нормированного изменения характеристик излучения, передаваемой среды, оптической системы и/или приемника излучения (рис. 1.). Нормированное изменение характеристик излучения может быть осуществлено за счет нормированного изменения полосы пропускания светофильтров, спектральной и/или световой характеристики приемника излучения, путем поляризации излучения под

воздействием электрических или магнитных полей, путем использования дополнительного источника излучения с известными характеристиками и т.д.

В зависимости от решаемой метрологической задачи различают ОЭ МИИ с автоматической коррекцией систематической составляющей погрешности результата измерений и ОЭ МИИ с автоматической коррекцией всех (систематической и случайной) составляющих погрешности результата измерений.

По способу системной линеаризации общей функции преобразования ЦИП ОЭ МИИ температуры ИО делятся на методы, в основу которых положены алгоритмические и функционально-алгоритмические способы линеаризации (см. рисунок) [2, 3]. Вторая группа методов отличается от первой тем, что предполагает дополнительное функциональное преобразование входных и выходных величин приемника излучения с использованием формул замены величин [2, 3].

При реализации ОЭ МИИ с автоматической коррекцией случайной или случайной и систематических составляющих погрешности окончательного результата измерений возникает необходимость в использовании тех или иных методов усреднения результатов промежуточных измерений.

В этой связи, по используемому способу усреднения, различают ОЭ МИИ с использованием классических методов статистической обработки результатов измерений, с использованием методов текущего усреднения и методов цифровой фильтрации (см. рисунок).

Использование классического метода усреднения обеспечивает уменьшение значения дисперсии среднего значения результата измерений в  $\sqrt{n}$ , где  $n$  — количество результатов измерений [3]. В случаях воздействия стационарной случайной помехи целесообразно использовать метода текущего (шаг за шагом) усреднения результатов промежуточных измерений. Дисперсия среднего значения убывает с ростом числа измерений как  $n^{-1}$ . Методы цифровой фильтрации используются преимущественно в случаях воздействия нестационарной случайной помехи.

Такова классификация всего многообразия ОЭ МИИ температуры.

## **Выводы.**

1. В целом, достигнута цель научно-исследовательской работы, т.е. получена необходимая и достаточная совокупность знаний об ОЭ МИИ температуры. Приведены определения основных групп методов. Разработана и описана

классификация ОЭ МИИ температуры по ряду известных и новых классификационных признаков.

2. Приведенная классификация оптикоэлектронных методов определения температуры на сегодняшний день является наиболее полной. В ней дополнительно использованы новые классификационные признаки, которые, в конечном счете, определяют вид уравнений избыточных измерений температуры оптико-электронными методами.

3. Полученные знания обогатили ТИИ и стали основой для дальнейшего развития и совершенствования высокоточных ОЭ МИИ.

### *Литература*

1. Поскачей А.А., Чубарев Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 248 с.
2. Кондратов В.Т. “Основы теории автоматической коррекции систематических погрешностей измерения физических величин при нестабильной и нелинейной функции преобразования датчика”, Дис. ... докт. техн. наук, Киев, 2001. Т. 1, 501 с.
3. Кондратов В.Т. Классификация функционально-алгоритмических методов линеаризации функции преобразования средств измерений с нелинейными датчиками // Перспективні засоби обчислювальної техніки та інформатики. Зб. наук. пр. — К.: ІК НАН України, 1999. — С. 57–63.
4. Кондратов В.Т. “Избыточность: основные понятия и классификация”. Вимір. та обчисл. техніка в технол. процесах, № 1. — С. 18–22, Хмельницький, 1997.
5. Кондратов В.Т. Коррекция погрешностей измерения высоких температур термощумовым методом // Проблемы управления и информатики. — 1999. — № 5 — С. 138.

Сдано в редакцию: 11.03.2003г.

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Зори А.А.