

Методика настройки и калибровки имитатора солнечного излучения при измерении параметров многопереходных тонкоплёночных фотоэлектрических модулей

С. А. БОГОМОЛОВА¹, Ю. Е. ЛУКАШОВ², М. З. ШВАРЦ³

¹ Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия, e-mail: s_bogomolova@mail.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: luksh103@vniims.ru

³ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия, e-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Рассмотрена методика настройки и рассчитана неопределённость калибровки солнечного имитатора, построенного на основе комбинированного двухканального источника излучения. Настройка проведена по энергетической освещённости и её спектральной плотности с использованием двух эталонных фотоэлектрических модулей.

Ключевые слова: имитатор солнечного излучения, многопереходный тонкоплёночный фотоэлектрический модуль, калибровка.

The article considers an adjustment procedure of solar simulator based on a combined two-channel source of radiation by parameters energy irradiance and spectral density of energy irradiance with use of two reference photoelectric modules. The calculation of uncertainty of solar simulator calibration by irradiance with taking into account the irradiance spectral density correction is carried out.

Key words: solar radiation simulator, multitransition thin film photoelectric module, calibration.

Развитие фотоэнергетики связано с разработкой новых и совершенствованием уже освоенных в производстве технологий и конструкций тонкоплёночных многопереходных фотоэлектрических модулей (ФЭМ), обеспечивающих достаточно высокую (более 13 %) эффективность преобразования солнечного излучения при невысокой стоимости как самих модулей, так и вырабатываемой ими электроэнергии [1—5].

Выходную электрическую мощность и коэффициент полезного действия ФЭМ определяют, измеряя вольт-амперную характеристику (ВАХ) при стандартных условиях [6], создаваемых на имитаторах солнечного излучения (ИСИ): энергетическая освещённость (ЭО) (1000 ± 5) Вт/м² при стандартной спектральной плотности энергетической освещённости (СПЭО) — AM1.5 [7]; температура 25 °С. Также по ВАХ рассчитывают её коэффициент заполнения — FF , силу тока короткого замыкания $I_{к.з.}$, напряжение холостого хода $U_{х.х.}$.

Отклонения от стандартизованных значений ЭО и СПЭО, воспроизводимых в рабочей области имитатора утверждённого класса, вносят существенный вклад в неопределённость измерений фотоэлектрических параметров ФЭМ [8, 9]. Эти отклонения зависят от методики калибровки ИСИ и используемых эталонных устройств. В данной работе рассмотрена методика настройки ЭО и СПЭО импульсного имитатора, предназначенного для контроля выходных фотоэлектрических параметров полноразмерных (1,3×1,1 м) тонкоплёночных ФЭМ на основе аморфного (а-Si) и микрокристаллического (μс-Si) кремния в условиях экспериментального производства, и проведена оценка неопределённости калибровки имитатора по ЭО с учётом корректировки СПЭО.

Конструктивные особенности ИСИ. Рассматриваемая модель имитатора PVS1114i фирмы NISSHINBO Mechatronics

Inc. (Япония) предназначена для измерений нагрузочных ВАХ и определения нормируемых выходных фотоэлектрических параметров полноразмерных ФЭМ. Энергетическая освещённость в рабочей области имитатора формируется комбинированным источником излучения, состоящим из 36 линейных галогеновых и двух ксеноновых импульсных ламп. С помощью системы управления работой источников излучения сначала включают галогеновые лампы, затем импульсные, формируя световой импульс длительностью плоской части 50 мс (вариации ЭО составляют не более ± 1 %). На рис. 1 представлен результат формирования СПЭО комбинированным источником излучения, а также ксеноновыми лампами, работающими в коротковолновой (синей) области спектра $\lambda = 300 \dots 700$ нм, и галогеновыми лампами — длинноволновой (красной) области спектра $\lambda = 550 \dots 1100$ нм. Освещённости могут варьироваться изменением напряжения на лампах. Вклад в ЭО от галогеновых ламп устанавливается в процентах в соответствии с данными электронной системы контроля осветителей. Указанная модель имитатора обеспечивает воспроизведение параметров светового потока излучения по классу АВА в соответствии с [8] и имеет технические характеристики, приведенные в [9].

Методики настройки ИСИ. При измерении ВАХ многопереходных а-Si/μс-Si ФЭМ необходимо настраивать как ЭО, так и СПЭО в рабочей области имитатора, так как субэлемент а-Si имеет максимальную фоточувствительность в синем, а субэлемент μс-Si — в красном диапазонах спектра (рис. 2).

Настройку СПЭО следует осуществлять так, чтобы отношение фототоков субэлементов под излучением имитатора

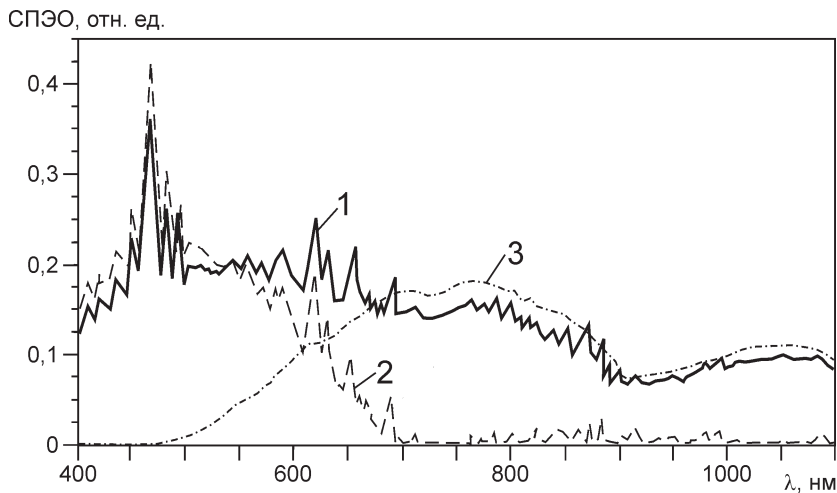


Рис. 1. Спектральная плотность энергетической освещённости в рабочей области имитатора для комбинированного (1), ксенонового (2) и галогенового (3) источников излучений

соответствовало отношению этих значений при стандартном солнечном спектре [10]:

$$I_{\text{им}}^a / I_{\text{им}}^{\text{мс}} = I_{\text{ст}}^a / I_{\text{ст}}^{\text{мс}},$$

причём входящие в приведённую формулу значения токов короткого замыкания определяют из выражения

$$I_{\text{им(ст)}}^a(\text{мс}) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_{\text{им(ст)}}(\lambda) SR_{a(\text{мс})}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $E_{\text{им(ст)}}(\lambda)$ — зависимость СПЭО ИСИ (или стандартного солнечного спектра) от длины волны; $SR_{a(\text{мс})}(\lambda)$ — спектральная зависимость фоточувствительности a-Si (или мс-Si) субэлементов.

В соответствии с (1) фототоки рассчитывают, используя результаты измерений спектральных зависимостей фоточувствительности субэлементов, что для полноразмерных ФЭМ можно выполнить только на специализированном оборудовании [11].

Известно, что чувствительным индикатором рассогласования по фототокам между субэлементами является коэффициент FF , который достигает своего минимума при равен-

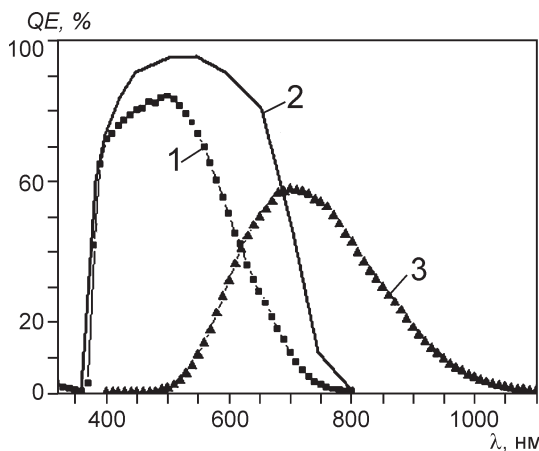


Рис. 2. Зависимость внешнего квантового выхода фотоответа QE от длины волны λ для однопереходного (2) a-Si ФЭМ и субэлементов a-Si (1) и мс-Si (3) многопереходного ФЭМ

стве фототоков, генерируемых a-Si и мс-Si субэлементами [12—14]. Имея в распоряжении двухпереходный эталонный ФЭМ с известной ВАХ, её можно воспроизвести с достаточной степенью точности путём изменения синие-красного отношения в СПЭО [15] при постоянной ЭО в рабочей области имитатора. Постоянство ЭО достаточно контролировать по току однопереходного эталонного ФЭМ, например, на основе a-Si, для которого зависимость внешнего квантового выхода фотоответа от длины волны $QE(\lambda)$ приведена на рис. 2 (линия 2).

Далее рассмотрим методику настройки и калибровки имитатора для измерений двухпереходных ФЭМ, предполагающую использование двух эталонных ФЭМ: однопереходный модуль для настройки и калибровки ЭО и двухпереходный для корректировки СПЭО. Также получим оценку неопределённости результатов измерений при калибровке ИСИ по ЭО. Очевидным преимуществом методики является относительная простота, так как отсутствует необходимость в результатах измерений спектральной фоточувствительности ФЭМ и детальной оценки СПЭО имитатора [10, 11].

Методика настройки СПЭО в рабочей области ИСИ. Настройку оптимального синие-красного отношения излучения имитатора осуществляют методом прямых измерений эталонного многопереходного фотоприемника при заданных соотношениях интенсивностей излучения от галогенового и ксенонового источников в суммарном потоке света. В качестве эталонного фотоприёмника используют полноразмерный многопереходный ФЭМ, структура которого соответствует исследуемому модулю (a-Si/мс-Si) и может быть выполнена в одной из конфигураций: токи субэлементов согласованы; имеется ограничение по току верхнего или нижнего субэлементов. В исходной конфигурации исследуемые на экспериментальной линии a-Si/мс-Si ФЭМ имеют ограничение по силе фототока, генерируемого нижним мс-Si субэлементом, поэтому целесообразно иметь эталонный модуль в аналогичной токовой конфигурации. Более высокий фототок a-Si субэлемента (по сравнению мс-Si) необходим для компенсации негативного эффекта фотоиндуцированной деградации, приводящего к снижению фототока субэлемента в процессе эксплуатации ФЭМ [15].

При настройке СПЭО находят такое соотношение интенсивностей излучения галогеновых и ксеноновых ламп, когда регистрируемые значения фотоэлектрических параметров эталонного a-Si/мс-Si ФЭМ оказываются в пределах доверительных интервалов, установленных для этих параметров в сертификате калибровки. Калибровку эталонного полноразмерного модуля выполняют на ИСИ класса ААА [8], для которого прослеживаемость значения СПЭО обеспечивается через эталонную лампу [16], чьи калибровочные и измерительные возможности подтверждены при международных сличениях. В сертификате калибровки при коэффициенте охвата $k=2$ и доверительной вероятности $P=95\%$ установлены следующие расширенные неопределённости: $u(I_{\text{к.з}}) = \pm 2,5\%$, $u(U_{\text{х.х}}) = \pm 1,0\%$, максимальной мощности $u(P_{\text{max}}) = \pm 3,0\%$, $u(FF) = \pm 4,0\%$. По результатам измерений ВАХ были построены зависимости значений фотоэлектрических параметров от доли излучения f_r , формируемого галогеновыми лампами, в суммарном световом потоке (рис. 3). Фотоэлектрические

кий параметр в каждой точке вычисляли как среднее арифметическое из десяти результатов измерений. Оптимальную долю излучения от галогенового источника определяли из условия одновременного нахождения результатов измерений $I_{к.з.}$, $U_{х.х.}$, FF , P_{max} в пределах заданных доверительных интервалов, показанных на рис. 3 пунктирными линиями. В рассматриваемом примере указанному условию соответствует значение $f_r = (71 \pm 0,5) \%$.

В процессе настройки СПЭО при изменении интенсивности излучения ксеноновых и галогеновых ламп проверяют стабильность значения ЭО в интервале $(1000 \pm 5) \text{ Вт/м}^2$ по $I_{к.з.}$ эталонного a-Si ФЭМ.

Методика настройки и калибровки ИСИ по ЭО, неопределённость результатов калибровки. Указанную настройку и калибровку осуществляют прямыми измерениями $I_{к.з.}$ эталонного фотоприёмника. При этом устанавливают соотношение между средним арифметическим значением десяти результатов измерений для эталонного фотоприёмника

$(I_{к.з.}^{изм})$, полученных на ИСИ, и его действительным значени-

ем $(I_{к.з.}^{эт})$, приведённым в сертификате калибровки. В качестве эталонных можно использовать полноразмерные ФЭМ или их фрагменты (мини-ФЭМ) на основе кристаллического (с-Si) или аморфного кремния. Мини-ФЭМ, фотоактивная площадь которых составляет около $0,01 \text{ м}^2$, обеспечивают прослеживаемость результатов измерений в соответствии с государственной поверочной схемой для средств измерений ЭО [17]. Однако их применение повышает трудоёмкость процедуры калибровки: сначала в рабочей зоне имитатора, предназначенного для измерений полноразмерных модулей, выявляют характер неравномерности распределения освещённости, рассчитывают среднюю эффективную освещённость [18], определяют область для размещения мини-ФЭМ и лишь затем выполняют настройку ЭО по фототоку калиброванного мини-ФЭМ. В свою очередь, неравномерность распределения освещённости в рабочей области ИСИ может внести существенный вклад в неопределённость результатов измерений фототока при калибровке. Для уменьшения степени влияния этой неравномерности рекомендовано использовать фотоприёмники, конструктивно соответствующие исследуемым модулям [18]. В данной работе для настройки ЭО применяли эталонный полноразмерный a-Si ФЭМ, откалиброванный на ИСИ класса AAA [8]. Прослеживаемость результатов к международной единице ЭО обеспечивается через указанную выше эталонную лампу [16].

Для оценки токовой чувствительности эталонного полноразмерного ФЭМ к неравномерности распределения ЭО по сравнению с током мини-ФЭМ предложено использовать коэффициент площади, определяемый как отношение их площадей $s = 0,01/1,40 = 0,007$.

Критерием корректной настройки освещённости в рабочей области имитатора является $I_{к.з.}$ эталонного ФЭМ, а точность его оценки характеризует неопределённость результата калибровки ИСИ по ЭО. Результат измерения указанного тока определяют из выражения

$$I_{к.з.}^{изм} = I_{к.з.}^{эт} + \delta I_{доп} + \alpha \delta T + s \delta I_{NU} + \delta I_D + \delta I_{к.з.}^{эт},$$

где $\delta I_{к.з.}^{эт}$ — сходимостъ результатов измерений $I_{к.з.}$ эталонного мини-ФЭМ; $\delta I_{доп}$ — допустимое отклонение результата

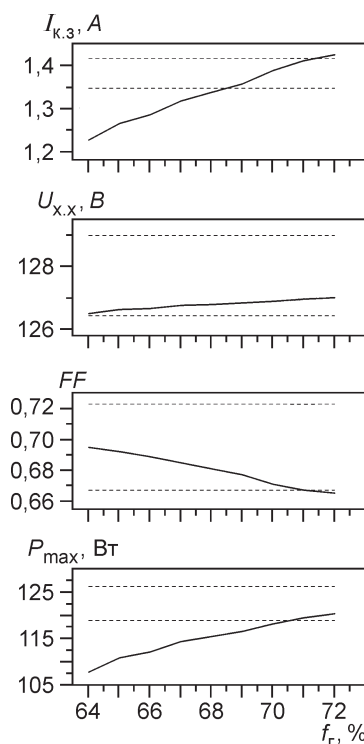


Рис. 3. Зависимости значений фотоэлектрических параметров эталонного a-Si/μс-Si ФЭМ от доли излучения f_r галогенового источника; пунктирные линии — границы доверительного интервала

измерения $I_{к.з.}$, обусловленное погрешностью устройства; α — температурный коэффициент $I_{к.з.}$; δT — допустимое изменение температуры в течение измерений; δI_{NU} — отклонение результатов измерений $I_{к.з.}$, связанное с неравномерностью распределения ЭО в рабочей области имитатора (оценивают с помощью мини-ФЭМ); δI_D — изменение $I_{к.з.}$ из-за нестабильности параметров эталонного мини-ФЭМ.

В сертификате калибровки эталонного ФЭМ указывают действительное значение тока короткого замыкания и расширенную неопределённость: $I_{к.з.}^{эт} = (1,313 \pm 0,033) \text{ А}$. Результат калибровки имитатора по ЭО определяют как среднее арифметическое значение десяти результатов измерений, поэтому их сходимостъ оценивают по стандартной неопределённости типа A [19].

В процессе измерений на ИСИ значение $I_{к.з.}$ находят по падению напряжения на стандартном калиброванном прецизионном резисторе, включённом в последовательную цепь с модулем и системой электронной нагрузки. В технической документации на устройство для измерения ВАХ указывают расширенную неопределённость $U(\delta I_{доп}) = \pm 0,2 \%$.

Неравномерность распределения ЭО в рабочей области имитатора PVS1114i оценивают по формуле

$$NU = 100 (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}),$$

где I_{max} , I_{min} — максимальный и минимальный результаты измерений $I_{к.з.}$, полученные при перемещении мини-ФЭМ (площадь $0,01 \text{ м}^2$) в пределах границ рабочей области ИСИ; по экспериментальным данным расчётное значение расширенной неопределённости составляет $U(\delta I_{NU}) = \pm 2,8 \%$.

Нестабильность параметров эталонного ФЭМ также является источником неопределённости результата измерений $I_{к.з.}$. Допустимый разброс результатов измерений фотоэлектрических параметров фотоприёмников на основе a-Si

Бюджет неопределённостей результата калибровки ИСИ по ЭО

Величина	Оценка величины	Стандартная неопределённость, %	Закон распределения/количество отсчётов	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную неопределённость, %
$I_{к.3}^{ЭТ}$	1,313 А	1,250	Гаусса	1,0	1,250
$\delta I_{доп}$	0 А	0,077	Гаусса ($k=2,586$ при $P=99\%$)	1,0	0,077
δI_{NU}		1,732	Равномерный	0,007	0,012
$\delta I_{к.3}^{ЭТ}$		0,030	$N = 10$	1,0	0,030
δI_D		0,110	Равномерный	1,0	0,110
δT	0 °C	0,576	Равномерный	0,06 %/°C	0,035

в пределах межповерочного интервала, связанный с нестабильностью полупроводниковой структуры, составляет около $u(\delta I_D) = \pm 0,19\%$.

Чувствительность фототока к изменению температуры модуля характеризуют температурным коэффициентом, который для фотоприёмников на основе аморфного кремния составляет $\alpha = 0,06\%/^{\circ}\text{C}$ [2]. Во время измерений фототока допустимый контролируемый диапазон изменения температуры равен $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Бюджет неопределённостей результата калибровки ИСИ приведен в таблице.

При расчёте суммарной стандартной неопределённости результата калибровки ИСИ по ЭО $u(I_{к.3}^{изм}) = 1,26$ было принято допущение, что составляющие являются некоррелированными величинами. Суммарная расширенная неопределённость составила $U(I_{к.3}^{изм}) = ku(I_{к.3}^{изм}) = 2 \cdot 1,26 = \pm 2,52\%$.

Заключение. Представленная методика калибровки ИСИ по ЭО с учетом корректной настройки по СПЭО основана на прямых измерениях параметров двух эталонных полноразмерных ФЭМ. В формирование бюджета неопределённости калибровки основной вклад вносит неопределённость действительного значения $I_{к.3}$ эталонного ФЭМ. Полученное значение суммарной расширенной неопределённости калибровки ИСИ по ЭО свидетельствует о том, что точность настройки последнего в рабочей области имитатора оказывает существенное влияние на неопределённость $I_{к.3}$ при измерении исследуемого многопереходного ФЭМ [9]. Простота реализации рассмотренной процедуры настройки и калибровки позволяет применять имитатор в условиях масштабного производства тонкоплёночных фотоэлектрических модулей.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-29-00178).

Л и т е р а т у р а

1. **Poortmans J., Arkhipov V.** Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

2. **Jahn U., Schweiger M., Herrmann W.** Comparison of different thin-film technologies — performance characteristics obtained from laboratory and field tests // Photovoltaic Solar Energy: Proc. 25th Europ. Conf. Valencia (Spain), 2010. P. 3769—3773.

3. **Wolden C. A., Kurtin J., Baxter J. B., Repins I., Shaheen S. E., Torvik J. T., Rockett A. A., Fthenakis V. M., Aydil E. S.** Photovoltaic manufacturing: Present status, future prospects, and research needs // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. V. 29. N. 3. P. 030801—16.

4. **Hegedus S.** Review of photovoltaic module energy yield (kWh/kW): comparison of crystalline Si and thin film technologies // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. 2013. V. 2. N. 2. P. 218—233.

5. **Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D.** Solar cell efficiency tables (version 45) // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2015. V. 23. P. 1—9.

6. **ГОСТ Р 51594—2000.** Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения.

7. **ГОСТ Р МЭК 60904-3—2013.** ГСИ. Приборы фотоэлектрические. Ч. 3. Принципы измерения характеристик фотоэлектрических приборов с учётом стандартной спектральной плотности энергетической освещённости наземного солнечного излучения.

8. **IEC 60904-9:2007.** Photovoltaic devices. Pt. 9: Solar simulator performance requirements.

9. **Богомолова С. А., Лукашов Ю. Е., Шварц М. З.** Оценка расширенной неопределённости результата измерения тока короткого замыкания тонкоплёночных фотоэлектрических модулей // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 7—12.

10. **Guidelines** for PV power measurement in industry / Ed. N. Taylor. Brussel (Belgium): Publ. Office Europ. Union, 2010.

11. **Pravettoni M., Komlan A., Galleano R., Mullejjans H., Dunlop E. D.** An alternative method for spectral response measurements of large-area thin-film photovoltaic modules // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2012. V. 20. P. 416—422.

12. **Adelhelm R., Berger D.** Requirements for a large area solar simulator regarding the measurement of MJ solar cells // Photovoltaic Energy Conversion: Proc. 3rd World Conf. Osaka (Japan), 2003. P. 821—824.

13. McMahon W. E., Emery K. E., Friedman D. J., Ottoson L., Young M. S., Ward J. S., Kramer C. M., Duda A., Kurtz S. Fill factor as a probe of current-matching for GaInP₂/GaAs tandem cells in a concentrator system during outdoor operation // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2008. V. 16. P. 213—224.

14. Rumyantsev V. D., Andreev V. M., Larionov V. R., Malevskiy D. A., Shvarts M. Z. Indoor characterization of multijunction concentrator cells under flash illumination with variable spectrum // Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen: Proc. 4th Int. Conf. El Escorial (Spain), 2007. P. 277—280.

15. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985.

16. Staebler D. L., Wronski C. R. Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 31. P. 292—294.

17. IEC 60904-4:2009. Photovoltaic devices: Pt. 4. Procedures for establishing the traceability of the calibration of photovoltaic reference devices.

18. ГОСТ 8.195—2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм.

19. ГОСТ Р МЭК 60904-1—2013. Приборы фотоэлектрические. Ч. 1. Измерение вольт-амперных характеристик.

20. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement: Pt. 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement.

Дата принятия 09.11.2015 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Предлагаем вниманию читателей продолжение подборки статей по материалам 5-й Всероссийской и стран-участниц KOOMET конференции по проблемам термометрии «Температура—2015», состоявшейся в апреле 2015 г. в С.-Петербурге. Начало подборки см. журнал «Измерительная техника» № 12, 2015 г.

53.088

Уменьшение неопределённости температурной шкалы посредством учёта корреляции между сопротивлениями при калибровке и измерениях

Р. ПАЛЕНЧАР¹, С. ДЮРИШ¹, З. ДЮРИШОВА^{1, 2}, В. БРОКЕШ¹, П. ПАВЛАСЕК^{1, 2}

¹ Институт автоматики, измерений и прикладной информатики, Словацкий технический университет, Братислава, Словакия, e-mail: stanislav.duris@stuba.sk

² Словацкий метрологический институт, Братислава, Словакия

Рассмотрена возможность уменьшения неопределённости температурной шкалы посредством учёта корреляции между сопротивлениями при калибровке термометров сопротивления и измерении температуры. Показано, что если сопротивления имеют одинаковую погрешность, то она не влияет на неопределённость температурной шкалы МТШ-90. Приведены уравнения расчета неопределённости температурной шкалы, в которых учтены данные корреляции. Уравнения получены в результате моделирования влияния корреляций на неопределённость температурной шкалы.

Ключевые слова: температурная шкала, температурный датчик сопротивления, корреляция.

The possibility of reduction of temperature scale realization uncertainty by means of taking into account the correlation between resistors during resistance thermometers calibration and at temperature measurement is considered. It is shown that if all resistors during calibration and measurement have the same error, it does not affect the uncertainty of ITS-90 temperature scale. The equations for temperature scale uncertainty calibration with taking into account the correlation between the resistors, obtained as a result of modeling, are presented.

Key words: temperature scale, temperature resistance sensor, uncertainty, correlation.

Стремление уменьшить неопределённость измерений температуры посредством термометров сопротивления (ТС), калиброванных в реперных точках (РТ), требует изучения влияния корреляции между сопротивлениями при калибровке ТС и измерении температуры.

Повышение точности измерений температуры путем уменьшения неопределённости температурной шкалы с помощью ТС, калиброванных в РТ, осуществляется различными способами. В [1—5] рассмотрены подходы к исследованию неопределённости, базирующиеся на ортогональных ин-