

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ

Сыщенко А. Ф., Русальский Д. П.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Представлены характеристики оборудования производства ЗАО «БМЦ» для метрологического обеспечения температурных измерений: термостат низкотемпературный «Криостат», устройство термостатирующее измерительное «Термостат-А3», измеритель температуры эталонный «ИТЭ», комплекс измерительно-вычислительный «ИСТ-М16». Обсуждены проблемы нормативной документации, регламентирующей температурные измерения, и предложена новая формула, аппроксимирующая зависимость температуры от термоэдс для термопары типа М.

Введение

Для проведения поверки средств измерений температуры (термометров, термопар, приборов учета тепла и т.д.) необходимо обеспечить два условия – создать термостатированную среду с заданной температурой и иметь средства для измерения этой температуры. Анализ рынка Республики Беларусь показывает, что в настоящее время наиболее авторитетным отечественным производителем метрологического оборудования для температурных измерений является ЗАО «БМЦ», прецизионное оборудование которого позволяет решить обе эти проблемы [1].

Термостатирующее оборудование

Для создания термостатированной среды в ЗАО «БМЦ» создан ряд жидкостных термостатов, которые позволяют создавать термостатированную среду, измерять и поддерживать заданную температуру в рабочей зоне с нестабильностью не хуже $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от -90 до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Это термостат низкотемпературный «Криостат» и устройство термостатирующее измерительное «Термостат-А3», представленные на рисунке 1.



Рисунок 1 – Жидкостные термостаты, производимые ЗАО «БМЦ»: а – термостат низкотемпературный «Криостат», б – устройство термостатирующее измерительное «Термостат-А3»

Термостат «Криостат» имеет две модификации, позволяющие создавать термостатированную среду в диапазоне от $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Диапазон термостатирования устройства «Термостат-А3» – от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термостаты «Криостат» и «Термостат-А3» изготовлены из высококачественной комплектации, на высоком техническом уровне и имеют следующие особенности. В отличие от подавляющего большинства термостатов, производимых в мире, термостаты производства ЗАО «БМЦ» являются средствами измерения. Термостаты обеспечивают цифровую индикацию температуры рабочей жидкости и звуковую сигнализацию выхода на режим. Поддержание температуры в рабочей камере осуществляется автоматически с нестабильностью поддержания температуры в рабочей зоне не хуже $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ и погрешностью измерения температуры $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ для «Термостата-А3» и $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ для «Криостата».

Наличие интерфейса RS-232C позволяет производить обмен данными между термостатами и ПЭВМ, что позволяет использовать их в составе различных автоматизированных комплексов оборудования для решения каких-либо задач по поверке приборов. Кроме того, создаваемая «Криостатом» термостатированная среда обладает градиентом температур по горизонтали и вертикали не более $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$. «Термостат-А3» оснащен устройством подъема уровня рабочей жидкости, что позволяет успешно поверять различные датчики небольшой длины. Глубина погружения датчиков в «Термостата-А3» достигает 350 мм, что позволяет успешно поверять и большинство длинных датчиков. Для более стабильной работы при температурах рабочей среды вблизи комнатных «Термостата-А3» может быть дополнительно оснащен внешним источником холода. Рабочей средой «Криостата» является спирт либо другая низкотемпературная жидкость. Для «Термостата-А3» используются различные масла либо дистиллированная вода для работы при температурах не выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Габаритные размеры «Криостата» $620 \times 760 \times 1500$ мм и масса 120 кг, «Термостата-А3» – $350 \times 350 \times 800$ мм и 30 кг. Оба прибора занесены в Государственные реестры средств измерений РБ и РФ: «Криостат» – РБ № 03 10 1431 01, РФ № 23837-02; «Термостат-А3» – РБ № 03 10 1019 99, РФ № 23838-02.

Средства измерения температуры

Для точного измерения температуры среды ЗАО «БМЦ» производит измеритель температуры эталонный «ИТЭ» (рисунки 2).



Рисунок 2 – Измеритель температуры эталонный «ИТЭ»

Измеритель температуры эталонный «ИТЭ» предназначен для высокоточного измерения температуры среды в диапазоне от 193 К до 693 К (от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+420\text{ }^{\circ}\text{C}$). «ИТЭ» имеет два независимых канала измерения, к которым по четырехпроводной схеме подключаются высококлассные платиновые термометры сопротивления, находящиеся в среде, температуру которой необходимо измерить. «ИТЭ» производит высокоточное измерение сопротивления датчиков и преобразует измеренное значение сопротивления в значение температуры согласно правилам Международной температурной шкалы 1990 г. (МТШ-90) [2]. Погрешность измерения температуры прибора состоит из погрешности используемого датчика и погрешности измерительного блока. Погрешность измерительного блока «ИТЭ» мала – порядка $0,0015\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому основной вклад в общую погрешность прибора дает именно погрешность датчика. Общая погрешность «ИТЭ» составляет $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ при разрешающей способности $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$. Одно измерение температуры прибор осуществляет за 1,3 с. «ИТЭ» оборудован интерфейсом RS-232C, при помощи которого можно осуществлять обмен данными с ПЭВМ. Габаритные размеры прибора $320 \times 320 \times 120$ мм, масса – 3 кг. «ИТЭ» зарегистрирован в государственном реестре средств измерений РБ № 03 10 1911 03.

В таблице 1 представлены технические характеристики некоторых аналогов «ИТЭ», производимых в СНГ и мире. Видно, что в СНГ «ИТЭ» является лучшим измерителем температуры и находится на уровне лучших мировых аналогов.

Технические характеристики зарубежных аналогов «ИТЭ»

Основные технические характеристики	ТЕРМЭКС (РФ), ТЕРКОН [3]	Ametek (Дания), DTI-1000 [4]	Hart Scientific (США), Super Thermometer, model 1575 [5]	Isotech (Великобритания), TTI-22 [6]
Погрешность измерения температуры измерительным блоком, °С	±0,005	±0,005	±0,001	±0,001
Разрешающая способность, °С	0,001	0,001	0,0001	0,0001
Время одного измерения, с	0,4	2	2	0,72

«ИТЭ» является прецизионным средством измерения температуры. Однако в ряде случаев возникает необходимость в одновременном измерении температуры в нескольких точках пространства, например, при изучении температурных полей термостатов, климатических камер, камер тепла и холода при их аттестации. Особенно высокая точность при этом не очень важна. Для решения таких задач идеально подходит разработанный ЗАО «БМЦ» прибор – комплекс измерительно-вычислительный «ИСТ-М16» (рисунок 3). Основное назначение комплекса – это высокоточные измерения электрического сопротивления и эдс при поверке термопреобразователей сопротивления (ТС) и термопар (ТП). Основу комплекса составляют два 16-ти канальных блока для измерения сопротивления и напряжения. Кроме того, встроенный микроконтроллер позволяет преобразовать измеренные сопротивление ТС или эдс ТП в соответствующее значение температуры. Таким образом, измерительный блок комплекса в комплекте с ТС или ТП можно использовать как многоканальный измеритель температуры, с помощью которого можно одновременно измерять температуру среды в нескольких точках и изучать температурные поля в процессе поверки/аттестации приборов и оборудования или при научных исследованиях. Погрешность измерения сопротивления и напряжения «ИСТом» небольшая – ± 0,01 % и общая погрешность измерения температуры с комплекте с ТС и ТП, как и в случае «ИТЭ», также в основном определяется погрешностью и типом используемого датчика. При использовании в качестве датчиков платиновых ТС класса А прибор способен производить до шестнадцати

измерений температуры в различных точках пространства в диапазоне температур от – 200 °С до + 800 °С с погрешностью ± (0,07 + 0,0007·|t|) °С, где t – измеряемая температура, т.е. при измерении температуры порядка 20 °С погрешность прибора составляет около 0,08 °С.



а



б

Рисунок 3 – Измерительный блок комплекса измерительно-вычислительного «ИСТ-М16»: а – модуль для подключения термопреобразователей сопротивления; б – модуль для подключения термопар

Таким образом, оборудование производства ЗАО «БМЦ» позволяет решить основные метрологические проблемы при температурных измерениях. Поэтому в настоящее время эти приборы используются практически во всех центрах стандартизации и метрологии РБ, а также в метрологических лабораториях ряда ведущих промышленных предприятий.

Проблемы нормативной документации, регламентирующей температурные измерения

Как уже отмечалось выше, «ИСТ-М16» может использоваться в качестве многоканального измерителя температуры. В качестве первичных датчиков он может использовать ТС или ТП. Процедура измерения температуры, как и у большинства аналогичных приборов, происходит по следующей схеме. Первичный преобразователь (ТС или ТП), подключенный к измерительному блоку прибора, помещается в среду с искомой температурой. Измерительный блок производит измерение термочувствительного параметра первичного преобразователя (электрическое сопротивление ТС или термоэдс ТП) и выполняет пересчет его в температуру согласно действующей нормативной документации на конкретный первичный преобразователь. Казалось, в этой нехитрой процедуре самой сложной проблемой для разработчиков приборов измерения температуры является обеспечение как можно более точного измерения первичного параметра, и погрешность прибора должна в основном определяться именно этим. Однако, как показывает опыт, этап пересчета также таит в себе некоторые проблемы. При подготовке нормативных документов (ГОСТов и т.п.) их разработчики не всегда внимательно проверяют функциональные зависимости температуры от первичного параметра (например, от сопротивления или от термоэдс), в них иногда содержатся ошибки или опечатки. Также в этих документах часто приводятся как «формульные» зависимости, так и таблицы, которые должны быть эквивалентны этим формулам. Но зачастую они значительно отличаются, и не совсем понятно в этом случае, что имеет приоритет – таблицы или формулы. Разработчики приборов для пересчета температуры в подавляющем большинстве случаев используют формульные зависимости из ГОСТов, метрологи при поверке приборов или

при их испытаниях предпочитают использовать табличные зависимости из этих же ГОСТов. Часто из-за ошибок в них возникают проблемы поверки. От этого страдают именно разработчики, так как им приходится необоснованно «загрублять» свои приборы, для того чтобы учесть эти несоответствия. Таким образом, из-за ошибок в нормативных документах впоследствии страдают производители оборудования и, как следствие – республика в целом, т.к. недополучает высокоточное оборудование отечественного производства.

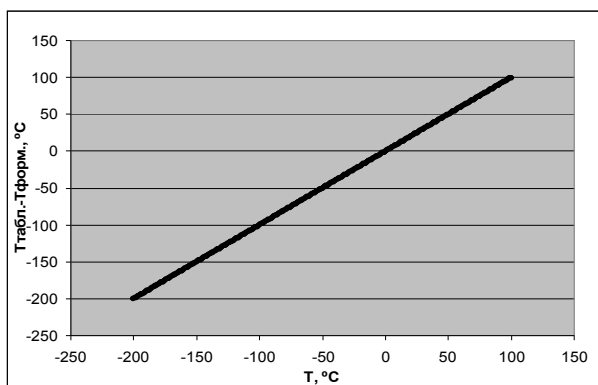
Одним из характерных примеров является ГОСТ 6651-94 «Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний», содержащий вышеуказанные недочеты и действовавший до недавнего времени. С 2011 года вместо этого ГОСТа вступил в действие новый стандарт СТБ ГОСТ Р 8.625-2010 «Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний», который учел недостатки и ошибки предыдущего ГОСТа. Однако, возникает масса проблем с поверкой большого парка находящихся в эксплуатации ТС, изготовленных в соответствии с отмененным ГОСТ 6651-94.

Температурные измерения с помощью ТП в настоящий момент регламентируются сравнительно новым СТБ ГОСТ Р 8.585-2004 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Термометры. Номинальные статические характеристики преобразования». Изучение этого документа показало, что в нем также присутствует ряд несоответствий. В частности, отличие значений температуры, указанных в таблице 13 для термометра типа М, и значений температуры, рассчитанных по полиному, аппроксимирующему обратную зависимость НСХ преобразования (температуры от ТЭДС) термометра типа М, превышает 200°C (рисунок 4а).

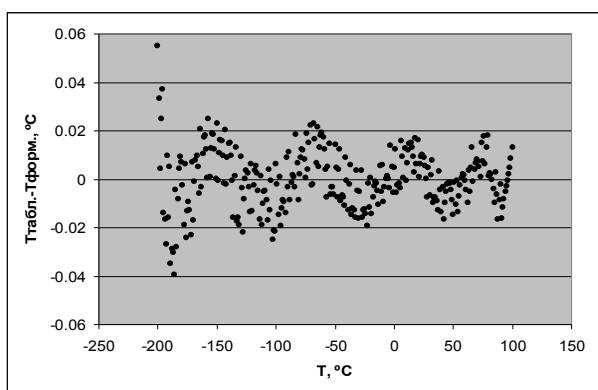
В связи с тем, что указанные отличия являются недопустимыми для расчетов температуры посредством полиномов, предлагается использовать следующую формулу для полинома, аппроксимирующего обратную зависимость НСХ преобразования (температуры от ТЭДС) для термометра типа М, полученную на основе табличных значений при помощи математических средств пакета OriginPro 7 (OriginLab Corporation):

Диапазон температуры	Полином по СТБ ГОСТ Р 8.585	Предлагаемый полином
от -200 °С до +100 °С	$t = \sum_{i=0}^3 C_i E^i$	$t = \sum_{i=0}^9 C_i E^i$
Диапазон ГЭДС: от -6,154 до 4,722 мВ	$C_0=0,4548090$	$C_0=0,00461919$
	$C_1=0,022657698$	$C_1=23,46533686$
	$C_2=-0,00000077935652$	$C_2=-0,65716087$
	$C_3=0,00000000011786931$	$C_3=0,04163421$
		$C_4=-0,00249278$
		$C_5=0,00172139$
		$C_6=-0,000186914828$
		$C_7=-0,0000717609993$
		$C_8=0,00000234484159$
		$C_9=0,00000164636686$

Отклонения предлагаемой формулы от табличных значений температуры лежит в пределах от -0,040 °С до +0,055 °С (рисунок 4б).



а



б

Рисунок 4 – Отличие табличной температуры и рассчитанной по формулам для термопары типа М: а – по ГОСТ 8.585; б – по предлагаемой формуле

Заключение

Проведен анализ отечественного оборудования производства ЗАО «БМЦ», предназначенного для метрологического обеспечения температурных измерений, которое позволяет решить обе задачи, возникающие при этом – создать стабильную термостатированную среду с заданной температурой и провести точное измерение этой температуры.

Характерной особенностью представленных термостатов является то, что они являются не только высокостабильными термостатирующими ваннами, но еще и средствами измерения температуры, что позволяет исключить необходимость использования дополнительного эталонного средства измерения температуры для их контроля.

Анализ технических характеристик измерителя температуры эталонного «ИТЭ» показывает, что на сегодняшний момент он является лучшим в СНГ и находится на уровне лучших мировых аналогов.

Обсуждена проблема важности внутренней непротиворечивости нормативной документации, регламентирующей температурные измерения, и влияние погрешностей и недочетов в ней на точность разрабатываемого оборудования. Проанализирован ГОСТ 8.585, и взамен неправильной аппроксимирующей зависимости температуры от термоэдс для термопары типа М предложена новая формула.

Список использованных источников

1. Официальный сайт компании ЗАО «БМЦ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bmc.by>. – Дата доступа : 25.04.2011.
2. *Preston-Thomas, H.* The international temperature scale of 1990 (ITS-90) / Н. Preston-Thomas // *Metrologia*. – 1990. – № 27. – Р. 3–10.
3. Официальный сайт компании ТЕРМЭКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://termexlab.ru>. – Дата доступа : 25.04.2011.
4. Официальный сайт компании АМТЕК. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jofra.com>. – Дата доступа : 25.04.2011.
5. Официальный сайт компании Fluke Calibration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hartscientific.com>. – Дата доступа : 25.04.2011.
6. Официальный сайт компании Isothermal Technology Ltd [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.isotech.co.uk>. – Дата доступа : 25.04.2011.

Syshchanka A. F., Rusalsky D. P.

Metrological provision of temperature measurements: status and problems

The specifications of equipment produced by CAS «BMC» for metrological provision of temperature measurements are presented: low temperature thermostat «Cryostat», thermostatic device «Thermostat-A3», reference thermometer «ITE», measuring-calculating complex «IST-M16». Some problems of normative documents regulating temperature measurements are discussed. New formula approximating temperature vs. thermoelectromotive for type M thermocouple is proposed.

Поступила в редакцию 29.03.2011.