

# ПРОВЕРКА СООТВЕТСТВИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТРЕБОВАНИЯМ ПРОГРАММНОЙ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

VERIFICATION OF COMPLIANCE  
OF THE METROLOGICAL  
CHARACTERISTICS OF THE TEMPERATURE  
MEASURING CHANNEL BASED  
ON THE THERMOELECTRIC CONVERTER  
WITH THE REQUIREMENTS  
OF THE PROGRAM TESTING TECHNIQUE

**V. Kurakin**  
**D. Pototsky**  
**A. Godnev**

*Summary.* The lack of clearly formulated and detailed theoretical methods for checking the compliance of temperature measuring channels based on thermoelectric converters with the requirements of software testing procedures is the main problem on the way to improving the metrological characteristics of such measuring channels. This paper presents a theoretical calculation of the metrological characteristics of a temperature measuring channel based on a thermoelectric converter, on the basis of which it was concluded that the studied temperature measuring channel complies with the requirements of a software test procedure.

*Keywords:* measuring channel, temperature, thermoelectric converter, software technique, tests, measurements, verification, metrological characteristics, thermocouple.

**Куракин Владимир Андреевич**  
Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана  
fromkurakin@mail.ru

**Потоцкий Даниил Эдуардович**  
Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана

**Годнев Александр Геннадьевич**  
Доктор технических наук, профессор,  
Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана

*Аннотация.* Отсутствие четко сформулированных и подробно описанных теоретических методов проверки соответствия измерительных каналов температуры на основе термоэлектрических преобразователей требованиям программных методик проведения испытаний является главной проблемой на пути улучшения метрологических характеристик таких измерительных каналов. В настоящей работе представлен теоретический расчет метрологических характеристик измерительного канала температуры на основе термоэлектрического преобразователя, на основании которого был сделан вывод о соответствии исследованного измерительного канала температуры требованиям программной методики проведения испытаний.

*Ключевые слова:* измерительный канал, температура, термоэлектрический преобразователь, программная методика, испытания, измерения, проверка, метрологические характеристики, термопара.

## Введение

В настоящее время информационно-измерительные системы (ИИС) несомненно играют важнейшую роль в развитии промышленности и научных исследованиях. Одним из наиболее важных параметров, требующих измерения и контроля, является температура. Контроль этого параметра может стать ключевым фактором для обеспечения безопасности и эффективности работы различных технологических систем и оборудования. В связи с этим возникает необходимость разработки новых и усовершенствования уже имеющихся эффективных измерительных каналов (ИК) температуры на основе термоэлектрических преобразователей, которые обеспечат высокую степень точности и надежности измерений.

Главной проблемой на пути улучшения метрологических характеристик уже спроектированных и введенных в эксплуатацию ИК температуры на основе термоэлектрических преобразователей является отсутствие четко и последовательно сформулированных и подробно описанных теоретических методов проверки этих ИК на соответствие требованиям программных методик (ПМ) проведения испытаний. Дело в том, что проверка любого ИК на соответствие требованиям ПМ проведения испытаний неразрывно связана с темой расчета погрешностей, которая до сих пор вызывает множество споров и дискуссий среди математиков, метрологов и специалистов в области обработки данных в информационно-измерительных системах (ИИС). Более того, разработка новых и изучение уже имеющихся теоретических методов обработки данных в ИИС существенно тормозится необ-

ходимостью владения довольно серьезным математическим аппаратом, недоступным большинству инженеров и метрологов, работающих на производстве.

В связи с вышеизложенными трудностями на абсолютном большинстве предприятий пользуются лишь экспериментальными методами проверки ИК температуры на основе термоэлектрических преобразователей на соответствие требованиям ПМ проведения испытаний. Однако без должного теоретического подтверждения полученных экспериментальных данных не может быть и речи о достижении необходимых уровней точности и надежности измерений температуры. Поэтому в настоящее время особую актуальность имеет именно необходимость теоретической проверки ИК температуры на соответствие требованиям ПМ проведения испытаний.

Основной целью настоящей работы как раз и являлась теоретическая проверка соответствия метрологических характеристик ИК температуры на основе термоэлектрического преобразователя требованиям ПМ проведения испытаний. Исследование проводилось студентами МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ФКП НИЦ РКП г. Пересвет на базе предприятия при консультации Годнева А.Г., доктора технических наук и профессора кафедры К2 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Стоит отметить, что никакой информации о проведении подобных исследований и расчетов где-либо ранее обнаружено не было. Объектом исследования являлись метрологические характеристики компонентов ИК температуры на основе термоэлектрического преобразователя, предметом исследования — погрешности ИК температуры на основе хромель-копелевой термопары.

В процессе работы были решены следующие задачи:

- изучить устройство и принцип работы ИК температуры на основе термоэлектрического преобразователя в составе ИИС В2;
- собрать априорные данные об основных метрологических характеристиках компонентов ИК температуры на основе термоэлектрического преобразователя;
- определить теоретически, соответствует ли используемый в ИИС В2 ИК температуры на основе хромель-копелевой термопары требованиям ПМ проведения испытаний.

Система информационно-измерительная стенда В2

ИИС В2 — стендовая ИИС, предназначенная для приема, обработки, отображения и хранения измерительной информации о физических параметрах испытуемых двигателей и технологических систем стенда В2.

Конструктивно ИИС В2 реализована по принципу магистрально-модульной архитектуры. Этот принцип

предполагает разделение ИИС на функциональные модули, которые соединяются через центральный канал связи системы — магистраль, обеспечивающую передачу данных между модулями.

ИИС В2 представляет собой комплекс функционально объединенных технических средств [4]:

- средств первичного измерительного преобразования;
  - кабельных перемычек;
  - стационарных кабельных линий, соединяющих между собой шкафы датчиков (ШД) и блоки коммутации (БК);
  - измерительно-вычислительного комплекса медленно меняющихся параметров (ИВК ММП);
  - измерительно-вычислительного комплекса быстро меняющихся параметров (ИВК БМП).
- В ИК температуры ИИС В2 используются следующие термоэлектрические преобразователи:
- термопары хромель-алюмелевые типа «К» (ТХА), класса допуска 1;
  - термопары хромель-копелевые типа «L» (ТХК), класса допуска 2;
  - термопары вольфрам-рениевые типов «А-1», «А-2», «А-3» (ТВР), классов допуска 2.

В настоящей работе в качестве демонстрации расчетов производилась теоретическая проверка на соответствие требованиям ПМ проведения испытаний именно ИК температуры на основе хромель-копелевой термопары типа «L», класса допуска 2. Однако аналогичные расчеты справедливы и для любого другого ИК температуры на основе любого другого термоэлектрического преобразователя.

Для подключения термоэлектрических преобразователей служат кабельные перемычки на вход каналов ИВК и стационарные кабельные линии, соединяющие между собой ШД и БК.

Температура является медленно меняющимся параметром, поэтому все расчеты и исследования в настоящей работе строились вокруг ИВК ММП ИИС В2.

ИВК ММП ИИС В2 состоит из [4]:

- основного оборудования ИВК ММП;
- сервера единого времени (СЕВ);
- средств организации локальной вычислительной сети (ЛВС) ИВК ММП;
- комплекса функционально-программного обеспечения.

Функционально ИИС В2 состоит из нескольких ИК. Одним из таких каналов является исследованный в настоящей работе ИК температуры на основе хромель-копелевой термопары.

**ИК температуры на основе термоэлектрических преобразователей**

ИК напряжения постоянного тока, соответствующего значениям температуры, измеряемой термоэлектрическим преобразователем (ТХК, ТХА, ТВР), предназначен для приема, регистрации и обработки электрических измерительных сигналов от термопар. Измерения выполняются с компенсацией температуры «холодного спая». Первым измерительным сигналом является аналоговый сигнал напряжения от термопары в мВ, а вторым — значение температуры «холодного спая».

Аналоговый электрический измерительный сигнал, полученный от первичного термоэлектрического преобразователя, поступает в ИК в ШД, далее передается по стационарной кабельной сети на БК и распределяется по аппаратно-программному комплексу (АПК) ИВК ММП. Затем сигнал проходит через барьер безопасности типа РИФ-П 1196DIN и поступает в устройство согласования сигнала (УСС) типа LE-75U. Внутри УСС аналоговый измерительный сигнал дублируется и передается на основной и дублирующий модули аналого-цифровых преобразователей (АЦП) типа LTR-27 с субмодулями типа Н-27Т для оцифровки. Модули АЦП установлены в крейтах.

Для измерения температуры компенсации «холодного спая» термопары используется термометр сопротивления (ТС) типа ДТС4, класса допуска «В» [4]. ТС подключен к ИК в ШД для подключения первичного термоэлектрического преобразователя. Аналоговый элек-

трический измерительный сигнал передается от ШД, расположенного в отсеке стенда В2, на БК, где распределяется по АПК ИВК ММП и передается к барьеру безопасности типа РИФ-П 1196DIN. Затем сигнал поступает на плату УСС типа LE-75U, где раздваивается и передается на основной и дублирующий модули АЦП типа LTR-27 с субмодулями типа Н-27Т для оцифровки. Абсолютная погрешность измерения температуры компенсации «холодного спая» термопары  $\Delta_{xc} = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  [4];

После этого измерительные сигналы в цифровом виде передаются для регистрации в персональный компьютер (ПК) сбора данных, где сохраняются. Сохраненные сигналы передаются на автоматизированные рабочие места (АРМ) регистрации и обработки ММП и АРМ оператора через локальную кабельную сеть (ЛКС). На АРМ регистрации и обработки ММП выполняется пересчет измерительных сигналов в заданные единицы.

Температура, измеренная термопарой с учетом температурной компенсации, вычисляется на АРМ регистрации и обработки ММП. Питание стоек, где установлены компоненты ИК, осуществляется от сети 220 В через источники бесперебойного питания.

Структурная схема ИК температуры от термоэлектрических преобразователей ИВК ММП представлена на (рис. 1).

ШД используется для подключения термопар к разъемам стационарной кабельной сети, через которую аналоговый электрический измерительный сигнал переда-

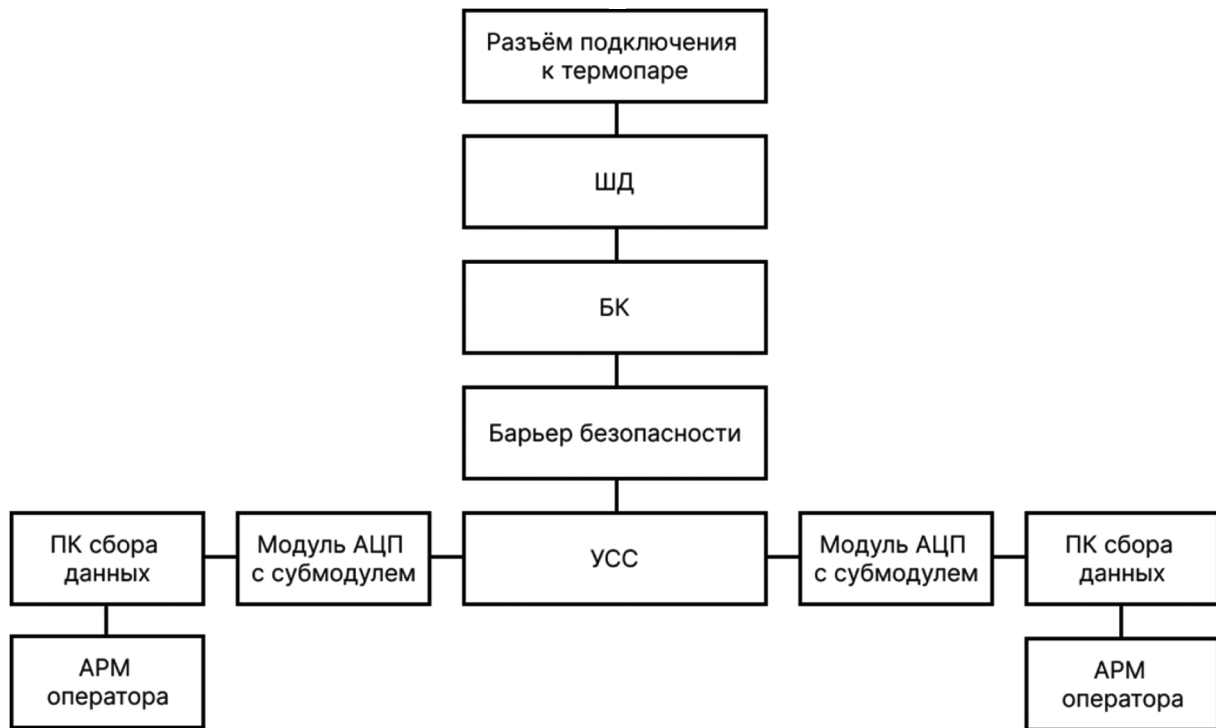


Рис. 1. Структурная схема ИК температуры от термоэлектрических преобразователей ИВК ММП

ется в БК. Внутри ШД устанавливается ТС для измерения температуры «холодного спая» термопары.

БК выполняет функцию распределения аналоговых электрических измерительных сигналов по АПК ИВК ММП. БК состоит из клеммных рядов, установленных в специальных шкафах. В БК проложены промаркированные кабели стационарной кабельной сети, которые используются для подключения компонентов ИК, расположенных в измерительных стойках, через разъемы и кабельную сеть. Предельная допускаемая основная приведенная погрешность БК составляет 0,05 %, согласно паспорту.

Барьер безопасности типа РИФ-П 1196DIN является взрывозащищенным оборудованием с уровнем защиты Exia. Предельная допускаемая основная приведенная погрешность барьера безопасности также составляет 0,05%, согласно паспорту.

УСС типа LE-75U используется для разделения входного аналогового измерительного сигнала и его передачи на два модуля АЦП. Это необходимо для дублирования электрических измерительных сигналов и выполнения требований по обеспечению должного уровня надежности измерений. УСС типа LE-75U имеет предельную допускаемую основную приведенную погрешность 0,1 %, согласно паспорту.

Модуль АЦП типа LTR-27 содержит измерительные каналы, предназначенные для измерения милливольтных электрических измерительных сигналов от термопар. В модуле определено число и тип гальванически изолированных измерительных каналов, и они имеют асимметричный милливольтный диапазон измерений от –25 мВ до 75 мВ [4]. Предельная допускаемая основная приведенная погрешность модуля АЦП типа LTR-27 с submodule типа H-27T составляет 0,05 %, согласно паспорту. Модуль предназначен для прямого подключения и измерения электрических измерительных сигналов от термопар.

Измерительные сигналы в цифровом виде от основного и дублирующего модулей АЦП типа LTR-27 передаются на ПК сбора данных основной и дублирующий соответственно, где сохраняются. Синхронизация сигналов осуществляется в крейте по сигналам от СЕВ.

С ПК сбора данных основного и дублирующего цифровые измерительные сигналы передаются по ЛВС на АРМ регистрации и обработки данных ИВК ММП и АРМ оператора ИВК ММП. Обработка зарегистрированных измерительных сигналов включает в себя:

Расчет измерительного сигнала температуры  $U_t$  в мВ с учетом компенсации температуры «холодного спая»

термопары  $T_{xc}$  ( $U_{tk}$ ) в комплексе функционально-программного обеспечения «ACTest Cloud» [4]. Для автоматизации расчетов измерительных сигналов в процессе проведения испытаний в ПО добавлена функция, которая используется для коррекции температуры нерабочего спая термопары:  $U+CALCH\_TempToVoltage(T_{xc}, Type)$  [4], где:

- $T_{xc}$  — температура «холодного спая» термопары;
- $Type$  — тип применяемой термопары;
- $U$  — сигнал от рабочего спая термопары.

Расчет выполняется по следующему алгоритму:

Измерительный сигнал  $R_t$  в Ом от ТС температурной компенсации термопары пересчитывается в °С по [2] [4]. Для полученного значения температуры  $T_{xc}$  в °С выполняется пересчет в значение  $U_{tk}$  в мВ по [1] и [5] для соответствующего типа термопары (такого же, как тип термопары, измеряющей температуру испытуемого изделия) [4].

Затем выполняется расчет измеренного сигнала  $U_t$  в мВ с учетом температурной компенсации по формуле [4]:

$$U_t = U_T + U_{tk} \quad (1)$$

где  $U_t$  — сигнал напряжения, измеренный от термопары с учетом температурной компенсации;

$U_{tk}$  — сигнал от ТС температурной компенсации, пересчитанный в мВ для применяемого типа термопары;

$U_T$  — сигнал напряжения, измеренный от рабочего спая термопары.

Полученное значение сигнала  $U_t$  в мВ пересчитывается в значение температуры в °С по [9] и представляется в визуализаторе.

Дальнейшую обработку данных проводят в объеме, предусмотренном ПМ проведения испытаний.

В ИК температуры предусмотрена градуировка электрических измерительных сигналов в единицы измеряемой величины. Градуировка выполняется расчетным путем, по [1] или по таблицам, указанным изготовителями.

Комплексный компонент измерительной системы (ККИС) ИВК ММП измерения электрических измерительных сигналов от термопар выполняет измерение сигнала от первичного термоэлектрического преобразователя в приведенных ниже диапазонах, что соответствует [1] и [5]:

- от –9,488 мВ до 66,466 мВ, что соответствует значениям температуры от –200 °С до 800 °С для термо-

пар типа «L» (ТХК), класса допуска 2, с предельной допускаемой абсолютной погрешностью измерений  $\Delta = \pm 2,5$  °С или предельной допускаемой основной приведенной погрешностью измерений  $\gamma = \pm 0,75$  % в зависимости от того, какое из значений больше;

- от –6,404 мВ до 52,410 мВ, что соответствует значениям температуры от –250 °С до 1300 °С для термопар типа «К» (ТХА), класса допуска 1, с предельной допускаемой абсолютной погрешностью измерений  $\Delta = \pm 1,5$  °С и предельной допускаемой основной приведенной погрешностью измерений  $\gamma = \pm 0,4$  % в зависимости от того, какое из значений больше;
- от 16,128 мВ до 33,64 мВ, что соответствует значениям температуры от 1000 °С до 2500 °С для термопар типа «А-1» (ТВР), класса допуска 2, с предельной допускаемой основной приведенной погрешностью измерений  $\gamma = \pm 0,5$  %;
- от 16,289 мВ до 27,232 мВ, что соответствует значениям температуры от 1000 °С до 1800 °С для термопар типа «А-2» (ТВР), класса допуска 2, с предельной допускаемой основной приведенной погрешностью измерений  $\gamma = \pm 0,5$  %;
- от 15,980 мВ до 26,773 мВ, что соответствует значениям температуры от 1000 °С до 1800 °С для термопар типа «А-3» (ТВР), класса допуска 2, с предельной допускаемой основной приведенной погрешностью измерений  $\gamma = \pm 0,5$  %.

Все значения погрешностей первичных термоэлектрических преобразователей приведены в соответствии с их паспортными данными.

#### Проверка соответствия ИК температуры на основе хромель-копелевой термопары требованиям ПМ проведения испытаний

ПМ проведения испытаний: необходимо было измерять температуру от 400 °С до 600 °С с предельной допускаемой суммарной основной приведенной погрешностью измерений не хуже  $\pm 2,5$  %.

Имелись:

1. термоэлектрический преобразователь типа «L» (ТХК), класса допуска 2, с диапазоном измерений от –200 °С до 800 °С и выходом по напряжению от –9,488 мВ до 66,466 мВ, согласно [1] и [5], и предельной допустимой основной приведенной погрешностью измерений  $\pm 0,75$  % от измеряемой температуры, согласно паспорту;
2. ККИС ИВК ММП с асимметричным диапазоном измерений от –25 мВ до 75 мВ:
  - БК для распределения электрических измерительных сигналов по АПК ИВК ММП (предельная допустимая основная приведенная погрешность

$\gamma_{БК}$ , вносимая БК, составляет  $\pm 0,05$  % от измеряемой температуры, согласно паспорту);

- барьер безопасности типа РИФ-П 1196DIN для обеспечения искробезопасности измерительных цепей ИК (предельная допустимая основная приведенная погрешность  $\gamma_{РИФ}$ , вносимая барьером безопасности, составляет  $\pm 0,05$  % от измеряемой температуры, согласно паспорту);
  - УСС типа LE-75U предназначенное для раздвоения входного аналогового сигнала (предельная допустимая основная приведенная погрешность  $\gamma_{УСС}$ , вносимая УСС, составляет  $\pm 0,1$  % от измеряемой температуры, согласно паспорту);
  - модуль АЦП типа LTR 27 с submodule типа Н-27Т для оцифровки аналоговых измерительных сигналов (предельная допустимая основная приведенная погрешность  $\gamma_{АЦП}$ , вносимая submodule, составляет  $\pm 0,05$  % от измеряемой температуры, согласно паспорту);
3. абсолютная погрешность измерения температуры компенсации «холодного спая» термопары  $\Delta_{хс} = \pm 0,2$  °С;
  4. доверительная вероятность  $P = 0,95$ .

Задача: требовалось теоретически определить, соответствует ли сформированный из имевшихся элементов ИК температуры требованиям ПМ проведения испытаний.

При проведении расчетов было учтено условие, что вклад случайной составляющей погрешности исследованного ИК температуры в его суммарную погрешность приблизительно в 10 раз уступает вкладу систематической составляющей погрешности. Этот факт связан, прежде всего, с тем, что исследованный ИК состоит из достаточно большого числа последовательно подключенных компонентов, погрешность каждого из которых постоянно вносит свой систематический вклад в суммарную погрешность всего ИК температуры. В связи с этим при проведении представленных ниже расчетов случайная составляющая погрешности ИК температуры считалась пренебрежимо малой по сравнению с ее систематической составляющей.

Суммарная погрешность измерения параметра рассчитывалась по погрешностям компонентов ИК параметра (первичного преобразователя, ККИС ИВК ММП измерения электрического измерительного сигнала).

Так как диапазоны измерений термоэлектрического преобразователя и ККИС ИВК ММП не совпадают, то в соответствии с [3], суммарная погрешность исследуемого ИК температуры рассчитывалась следующим образом:

- 1) Суммарная основная приведенная погрешность ККИС ИВК ММП составила:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{ККИС}} &= \gamma_{\text{БК}} + \gamma_{\text{РИФ}} + \gamma_{\text{УСС}} + \gamma_{\text{АЦП}} = \\ &= 0,05 + 0,05 + 0,05 + 0,1 = 0,25\%, \end{aligned} \quad (2)$$

2) Абсолютная погрешность датчика температуры:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{датч}} &= \frac{|X_{\text{в}} - X_{\text{н}}| \cdot \gamma_{\text{датч}}}{100\%} = \\ &= \frac{|600 - 400| \cdot 0,75\%}{100\%} = 1,5^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (3)$$

3) Суммарная абсолютная погрешность ККИС ИВК ММП:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{ККИС}} &= \frac{|X_{\text{в}} - X_{\text{н}}| \cdot \gamma_{\text{ККИС}}}{100\%} = \\ &= \frac{|75 - (-25)| \cdot 0,25\%}{100\%} = 0,25 \text{ мВ} \end{aligned} \quad (4)$$

4) Пересчет  $\Delta_{\text{ККИС}}$  из единиц измерения электрического сигнала с датчика температуры (мВ) в единицы измерения измеряемой физической величины ( $^{\circ}\text{C}$ ) производился по полиномам, аппроксимирующим зависимость значений температур рабочих концов термопары от значений ее ТЭДС при температуре свободных концов  $0^{\circ}\text{C}$ , согласно [1] и [5]:

$$\Delta_{\text{ККИС}} = \sum_{i=0}^9 C_i E^i = 3,9^{\circ}\text{C}, \quad (5)$$

$$E = 0,25 \text{ мВ}, \quad (6)$$

5) Суммарная абсолютная погрешность исследуемого ИК рассчитывалась по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{ИК}} &= k * \sqrt{\Delta_{\text{датч}}^2 + \Delta_{\text{ККИС}}^2 + \Delta_{\text{хс}}^2} = \\ &= 1,1 * \sqrt{1,5^2 + 3,9^2 + 0,2^2} = 4,6^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициент  $k = 1,1$  в связи с заданной доверительной вероятностью  $P = 0,95$ , согласно [3].

6) Пересчет суммарной абсолютной погрешности ИК температуры в приведенную к диапазону измерений параметра:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{ИКПАР}} &= \frac{\Delta_{\text{ИК}}}{|X_{\text{в.пар}} - X_{\text{н.пар}}|} \cdot 100\% = \\ &= \frac{4,6}{600 - 400} \cdot 100\% = 2,3\% \end{aligned} \quad (8)$$

Вывод: сформированный из имевшихся элементов ИК температуры соответствует требованиям ПМ проведения испытаний.

### Заключение

В процессе теоретической проверки ИК температуры на основе термоэлектрического преобразователя на соответствие требованиям ПМ проведения испытаний были изучены устройство и принцип работы ИК температуры на основе термоэлектрического преобразователя в составе ИИС В2, собраны априорные данные об основных метрологических характеристиках компонентов ИК температуры на основе термоэлектрического преобразователя, проведены теоретические расчеты погрешностей ИК температуры на основе хромель-копелевой термопары.

Проведенные расчеты теоретически подтвердили, что используемый в ИИС В2 ИК температуры на основе хромель-копелевой термопары соответствует требованиям ПМ проведения испытаний, обеспечивая высокую точность измерений температуры.

Представленные расчеты были впервые проведены на ФКП НИЦ РКП именно студентами МГТУ им. Н.Э. Баумана. Расчеты позволяют теоретически оценить экспериментально установленное соответствие или несоответствие ИК температуры требованиям ПМ проведения испытаний. Причем абсолютно не имеет значения, какой термоэлектрический преобразователь будет лежать в основе ИК температуры, какова будет ПМ проведения испытаний, и из каких компонентов будет состоять ИК температуры. Это становится особенно актуально, если учесть то, что на многих предприятиях, как оказывается, до сих пор пользуются лишь экспериментальными методами оценки погрешностей ИК без какой-либо теоретической проверки полученных результатов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 8.585-2001 «Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования».
2. ГОСТ 6651-2009 «Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний».
3. ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».
4. Перцовский, М.И. «Система информационно-измерительная стенда В2. Руководство по эксплуатации». 25/ПР/11/0844/7-2 ИИС.РЭ: 000 «Лаборатория автоматизированных систем (АС)». — 118–121 с.
5. Рогельберг, И.Л. «Сплавы для термопар». 1983 — 55–64 с.

© Куракин Владимир Андреевич (fromkurakin@mail.ru); Потоцкий Даниил Эдуардович; Годнев Александр Геннадьевич

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»