

Определение интервала между поверками комплектов термопреобразователей

С. В. МАРИНКО, И. Г. БОЙКО

Главный научный метрологический центр Минобороны РФ, Мытищи, Россия,
e-mail: marinko66@mail.ru

Проанализировано увеличение интервала между поверками средств измерений температуры при их комплексном применении.

Ключевые слова: межповерочный интервал, термопреобразователь.

The analysis of the increase in the interval between verifications of measuring instruments of temperature at their complete application.

Key words: interval between verifications, thermoelement.

Определение обоснованного интервала между поверками средств измерений (СИ) — актуальная задача. Для ее решения разработано много различных методов, их число увеличивается по мере изменения парка СИ. В статье рассмотрен частный случай такого изменения, когда не создается принципиально новый измерительный прибор, а один первичный измерительный преобразователь утвержденного типа в комплекте с другим аналогичным применяются для измерений разности одноименных величин.

Методы поверки, обусловленные разными способами применения приборов, будут отличаться длительностями межповерочного интервала (МПИ). Рассмотрим, насколько изменится МПИ комплекта по сравнению с МПИ отдельного СИ. Для этой цели воспользуемся методикой расчета, приведенной в [1]. Различия МПИ частично служат для варьирования числа точек при поверке в диапазоне измерений.

Исходный массив статистических данных получен для частотных кварцевых термопреобразователей ТЧК 012. Согласно описанию их технические характеристики имеют различия в двух возможных областях применения:

комплекты для измерений разности температур имеют предел основной допускаемой погрешности $\pm(0,1+0,005\Delta T)$ °С. Принципы комплектации пар термометров предполагают их строгую упорядоченность с учетом комплектной поверки. Такую систему условно назовем изолированной;

термометры, применяемые для абсолютных измерений температуры имеют предел основной допускаемой погрешности $\pm(0,15+0,001T)$ °С. Такую систему условно назовем открытой.

Для изолированной системы разработана соответствующая методика поверки, учитывающая особенность измерений разности температур с помощью комплекта термопреобразователей. Данная особенность связана, в первую очередь, с тем, что предел основной погрешности таких измерений в изолированной системе может снижаться на 60 % по сравнению с аналогичным показателем при измерениях разности температур отдельными термометрами в открытой системе. Это послужило основой для корректировки МПИ, составлявшего 1 год. Расчет проведен с использованием статистических данных, полученных на этапе эксплуатации, и осуществлен в три этапа: оценка параметров динамики изменения метрологических характеристик (МХ) от-

дельного СИ; вычисление параметров динамики изменения МХ комплекта и расчет МПИ с учетом этих параметров.

В качестве исходных данных использованы значения основной погрешности ТЧК 012 в точках 0 и 160 °С по результатам первичной поверки; результаты определения основной погрешности в тех же точках после эксплуатации СИ в течение полугода (t_1). При этом СИ считается годным для дальнейшей эксплуатации без проведения калибровки (определения новой градуировочной характеристики), если:

основная погрешность каждого входящего в комплект СИ в температурных точках 0 и 160 °С не выходит за допустимые границы соответственно $x_{\max 1} = \pm 0,15$ °С, $x_{\max 2} = \pm 0,31$ °С;

погрешность измерений разности температур $\Delta T = 0$ °С при указанных температурах не выходит за допустимые границы $x_{\max 3} = 0,1$ °С;

погрешность измерений разности температур $\Delta T = 160$ °С при задаваемых температурах 0 °С для первого СИ, входящего в комплект, и 160 °С для второго СИ не выходит за допустимые границы $x_{\max 4} = \pm 0,35$ °С [1].

Допустимые границы погрешностей соответствуют техническим характеристикам комплекта класса 1. Длительность МПИ выбирают так, чтобы обеспечить нахождение контролируемых МХ в допустимых пределах с требуемой вероятностью $P_{\text{тр}}$. Уровень метрологической надежности определяется в зависимости от условий эксплуатации. Примем $P_{\text{тр}} = 0,9$.

Расчет интервала между поверками. Первый этап. Найдем зависимость математического ожидания нестабильности МХ отдельного СИ, входящего в комплект, за время t . Поскольку имеются результаты только двух последовательных поверок, то в качестве модели изменения математического ожидания используем выражение

$$m(t) = m_0 + m(t_1),$$

где $m_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{j0}$; $m(t_1) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{j1}$; x_{j0} , x_{j1} — значения МХ j -го СИ

соответственно в моменты времени t_0 , t_1 ; t_0 — момент проведения первичной поверки.

Значение m_1 представим как

$$m_1 = (m(t_1) - m_0)/t_1.$$

Далее по результатам двух проверок определим зависимость среднего квадратического отклонения (СКО) нестабильности МХ отдельного СИ, входящего в комплект, за время t . В качестве модели изменения СКО МХ СИ примем функцию

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{rt}.$$

Такой выбор обусловлен тем, что среди функций, обоснованно применяемых различными исследователями для моделирования изменения СКО МХ СИ, данная характеризует наиболее быстрый рост СКО в зависимости от t . Значения σ_0 , $\sigma(t_1)$ определим по формулам

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{j0} - m_0)^2}; \quad \sigma(t_1) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{j1} - m(t_1))^2},$$

тогда $r = t_1^{-1} \ln(\sigma(t_1)/\sigma_0)$.

Далее получим зависимость коэффициента асимметрии распределения нестабильности МХ отдельного СИ от t , используя линейную модель его изменения в виде

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t.$$

Значения γ_0 , $\gamma(t_1)$ найдем по формулам

$$\gamma_0 = \frac{1}{\sigma_0^3 N} \sum_{j=1}^N (x_{j0} - m_0)^3; \quad \gamma(t_1) = \frac{1}{\sigma^3(t_1) N} \sum_{j=1}^N (x_{j1} - m(t_1))^3,$$

откуда $\gamma_1 = (\gamma(t_1) - \gamma_0)/t_1$.

Определим зависимость корреляционного момента между рассматриваемыми МХ отдельного СИ за время t на основе модели

$$K(t) = k_0(t) \sigma_1(t) \sigma_2(t),$$

где $k_0(t)$ — зависимость коэффициента корреляции МХ отдельного СИ, $k_0(t) = k_0 + k_1 t$;

$$k_0 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{j01} - m_{01})(x_{j02} - m_{02});$$

x_{j01} , x_{j02} — значения МХ j -го СИ при первичной проверке в температурных точках 0, 160 °С, соответственно; m_{01} , m_{02} — математические ожидания МХ в тех же точках.

Для расчета k_1 используем соотношение

$$k(t_1) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{j11} - m_{11})(x_{j12} - m_{12}),$$

где x_{j11} , x_{j12} — значения МХ j -го СИ после периодической проверки в первой и второй температурных точках, соответственно; m_{11} , m_{12} — математические ожидания МХ в тех же точках. Тогда $k_1 = (k(t_1) - k_0)/t_1$.

В результате расчетов получены следующие значения параметров процесса дрейфа основной погрешности СИ.

Для точки 0 °С: $m_{01} = 0,0067$ °С; $m_{11} = 0,0072$ °С; $\sigma_{01} = 0,0306$ °С; $r_1 = 0,102$ год⁻¹; $\gamma_{01} = 0,0012$; $\gamma_{11} = 0,0097$.

Для точки 160 °С: $m_{02} = -0,0225$ °С; $m_{12} = -0,0159$ °С; $\sigma_{02} = 0,08$ °С; $r_2 = 0,1938$ год⁻¹; $\gamma_{02} = 0,0001$; $\gamma_{12} = -0,0016$; $k_0 = 0,498$; $k_1 = 0,0012$.

Из приведенных данных следует, что коэффициент асимметрии распределения нестабильности МХ отдельного СИ, входящего в комплект, очень мал и им можно пренебречь. Основными параметрами случайного процесса изменения погрешностей этого СИ являются модели математического ожидания и СКО в двух рассматриваемых температурных точках и математическая модель корреляционного момента этих МХ.

Второй этап. Определим параметры случайного процесса изменения МХ комплекта СИ на основе принятых моделей.

При проверке находим значения семи МХ комплекта СИ: y_1 , y_2 — основные погрешности первого СИ в первой и второй температурных точках;

y_3 , y_4 — основные погрешности второго СИ в тех же точках;

$y_1 - y_3$, $y_2 - y_4$ — погрешности измерений разности температур в первой и второй температурных точках;

$y_2 - y_3$ — погрешность измерения разности температур при $\Delta t = 160$ °С.

Случайный вектор МХ комплекта представим в виде

$$Y^T = [y_2 \ y_2 - y_3 \ y_3 \ y_1 - y_3 \ y_1 \ y_2 - y_4 \ y_4].$$

Параметрами случайного процесса изменения МХ комплекта являются $M(t)$, $K^K(t)$ — вектор математических ожиданий и ковариационная матрица МХ комплекта. На основе ранее полученных моделей вектор математических ожиданий примет вид

$$M(t) = [m_1(t) \ m_2(t) \ m_3(t) \ m_4(t) \ m_5(t) \ m_6(t) \ m_7(t)].$$

$$\text{Введем обозначения } D_1(t) = (\sigma_{01} e^{rt})^2; \quad D_2(t) = (\sigma_{02} e^{rt})^2.$$

Ковариационную матрицу МХ комплекта на основе параметров процесса изменения МХ отдельного СИ представим как

$$K^K(t) = \begin{bmatrix} D_2(t) & D_2(t) & 0 & K(t) & K(t) & D_2(t) & 0 \\ D_2(t) & D_2(t)+D_1(t) & D_1(t) & K(t)+D_1(t) & K(t) & K(t)+D_1(t) & K(t) \\ 0 & D_1(t) & D_1(t) & D_1(t) & 0 & K(t) & K(t) \\ K(t) & K(t)+D_1(t) & D_1(t) & 2D_1(t) & D_1(t) & 2K(t) & K(t) \\ K(t) & K(t) & 0 & D_1(t) & D_1(t) & K(t) & 0 \\ D_2(t) & K(t)+D_1(t) & K(t) & 2K(t) & K(t) & 2D_2(t) & D_2(t) \\ 0 & K(t) & K(t) & K(t) & 0 & D_2(t) & D_2(t) \end{bmatrix}.$$

Третий этап. Полученные выражения позволяют установить зависимость вероятности отсутствия метрологических отказов от продолжительности МПИ в следующем виде [2]:

$$P_{\text{МПИ}}(t) = \int_S \dots \int \frac{\exp[-(Y-M(t))^T (K^K(t))^{-1} (Y-M(t))/2]}{\sqrt{(2\pi)^7 \det(K^K(t))}} \prod_{i=1}^7 dy_i,$$

где S — область допустимых значений МХ комплекта, приведенная в исходных данных расчета-обоснования.

Расчет по данному выражению осуществляют методом численного интегрирования с использованием формулы полной вероятности, при этом учитываются наиболее значимые корреляционные связи.

Выбираем $t_1 = 12$ мес, что соответствует МПИ, установленному для данного типа СИ. После выполнения интегри-

рования получаем $P_{\text{МПИ}}(t_1) = 0,956$, сравниваем его с требуемым уровнем метрологической надежности $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}}$. Так как $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}} < P_{\text{МПИ}}$, то увеличиваем значение t_1 на 6 мес, т. е. $t_2 = t_1 + 6$ мес, и проводим аналогичные вычисления. Получаем $P_{\text{МПИ}}(t_2) = 0,9327$ и сравниваем его с требуемым уровнем метрологической надежности $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}}$. Так как $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}} < P_{\text{МПИ}}(t_2)$, то увеличиваем значение t_2 на 6 мес, т. е. $t_3 = t_2 + 6$ мес, и проводим аналогичные вычисления. Находим $P_{\text{МПИ}}(t_3) = 0,906$ и сравниваем его с $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}}$. Так как $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}} < P_{\text{МПИ}}(t_3)$, то увеличиваем значение t_3 на 6 мес, $t_4 = t_3 + 6$ мес и проводим аналогичные вычисления. Получаем $P_{\text{МПИ}}(t_4) = 0,861$, сравниваем его с $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}}$. Так как $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}} > P_{\text{МПИ}}(t_4)$, то вычисления прекращаются. Таким образом, при продолжительности МПИ 2,5 года вероятность отсутствия метрологических отказов данного СИ в конце МПИ ниже требуемого уровня. Поэтому его продолжительность, обеспечивающую вероятность отсутствия метрологических отказов, перед проведением поверки $P_{\text{МПИ}}^{\text{ТР}}$, принимаем $t_{\text{МПИ}} = t_3 = 2$ года.

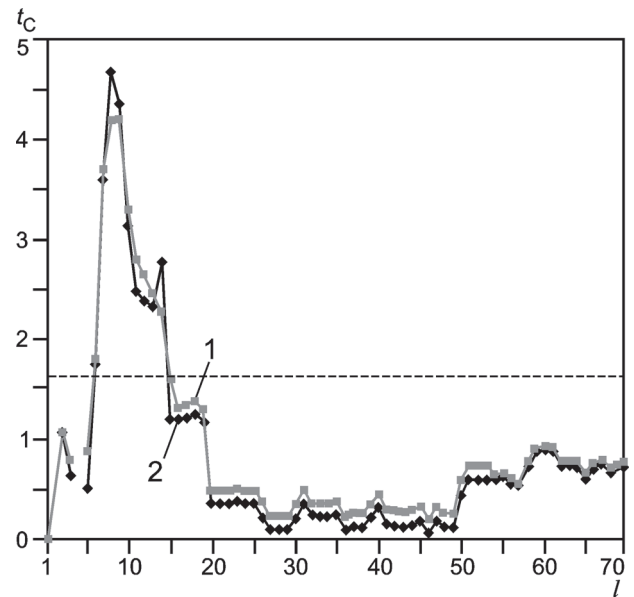
Используемый в методике алгоритм поверки можно назвать адаптивным: методы поверки адаптируются к текущему техническому состоянию термопреобразователей. При рассчитанном выше и фиксированном МПИ алгоритм поверки условно разделим на три методики.

Методика № 1 заключается в контроле МХ термопреобразователей при 0 °С. Если они находятся в допуске, то коэффициенты номинальной статической характеристики каждого термопреобразователя не меняются. Поверка на этом заканчивается, а комплект допускается к применению (для измерений разности температуры) до следующей периодической поверки. Если МХ выходят за установленные допуски, то реализуется вторая методика поверки.

Методика № 2 заключается в определении МХ термопреобразователей при 0 и 100 °С. На основе полученных результатов измерений корректируются градуировочные коэффициенты F_0 , A_1 номинальной статической характеристики, а коэффициенты A_2 , A_3 остаются без изменений. Также контролируется погрешность измерений разности температуры. Если полученные значения МХ находятся в допуске, то поверка заканчивается. Если они выходят за установленные допуски, то реализуется третья процедура поверки. Следует отметить, что методику № 2 можно применять не более одного раза в течение МПИ следующих друг за другом поверок.

Методика № 3 заключается в определении МХ термопреобразователей при 0; 50; 100; 160 °С. На основе полученных результатов измерений определяют коэффициенты F_0 , A_1 , A_2 , A_3 номинальной статической характеристики. Также контролируют погрешность измерений разности температуры. Такая методика соответствует первичной поверке. Если полученные значения МХ находятся в соответствующих допусках, то поверка заканчивается с положительными результатами, а если они выходят за установленные допуски, то термопреобразователи бракуются.

Применение каждой последующей методики позволяет использовать результаты измерений, полученные по предыдущей методике.



Корреляция погрешностей комплектов термопреобразователей при 0 и 160 °С — соответственно кривые 1, 2; t_c — коэффициент Стьюдента, l — количество СИ в комплекте

При анализе погрешностей кварцевых термопреобразователей на основе применения эмпирического коэффициента корреляции q и коэффициента Стьюдента $t_c = 1,6$ была выявлена некоррелированность погрешностей с учетом 16 и более СИ [2]:

$$t_c = \frac{q \sqrt{l-4}}{\sqrt{1-q^2}}, \quad q = \frac{l}{l-1} \frac{\sum_{i=2}^l e_i e_{i-1}}{\sum_{i=1}^l e_i^2},$$

где l — количество СИ в комплекте.

Результаты исследований при предельных значениях рабочего диапазона представлены на рисунке. Аналогичные результаты были получены по прошествии установленного МПИ, т. е. через 1 год.

Таким образом, при использовании кварцевых термопреобразователей для измерений разности температуры предел основной погрешности комплекта термопреобразователей на 60 % ниже, чем аналогичный показатель при измерениях разности температуры отдельными термометрами. Это свойство комплекта термометров использовано при корректировке МПИ. Расчеты показали, что при сохранении требуемого уровня метрологической надежности периодичность поверки можно увеличить в 2 раза, а число точек измерений варьировать от 1 до 3.

Л и т е р а т у р а

1. **МИ 2187—92.** Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
2. **Тойберт П.** Оценка результатов измерений / Пер. с нем., под ред. Е. И. Сычева. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Дата принятия 08.08.2014 г.