

Метод коррекции погрешности измерений температуры из-за приобретенной неоднородности электродов термопар

СУ ЦЗЮНЬ¹, О. В. КОЧАН², Н. М. ВАСИЛЬКИВ³, Р. В. КОЧАН²

¹ Школа компьютерных наук, Хубейский технологический университет, Хубей, Китай, School of Computer Science, Hubei University of Technology, e-mail: sjhosix@gmail.com

² Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина, e-mail: orestvk@gmail.com

³ Научно-исследовательский институт интеллектуальных компьютерных систем Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина

Разработан метод коррекции рассматриваемой погрешности. Исследованы погрешности метода и ограничения его применения.

Ключевые слова: термопара, приобретенная термоэлектрическая неоднородность.

The method of correction of the error due to inhomogeneity of thermocouples electrodes acquired during prolonged operation is developed. The errors of proposed method as well as the restrictions of its application are considered.

Key words: thermocouple, acquired thermoelectric inhomogeneity.

В [1] показано, что игнорирование погрешности из-за приобретенной в течение длительной эксплуатации термоэлектрической неоднородности электродов термоэлектрических преобразователей (ТЭП) может привести к значительным погрешностям измерений температуры, а в [2] намечены пути уменьшения влияния этой погрешности на результат измерений.

Известен метод коррекции погрешности ТЭП [3], вызванной приобретенной неоднородностью электродов, путем перерасчета погрешности, определенной в одном профиле температурного поля (в частности, поля поверочной печи), в погрешность в ином профиле температурного поля (в частности, поля эксплуатации). Этот метод базируется на виртуальном разбиении каждого электрода ТЭП на участки, в пределах которых изменением характера деградационных процессов в термоэлектроде можно пренебречь. Для каждого такого участка строят математическую модель дрейфа функции преобразования (ФП) в соответствии с его температурой эксплуатации. Базой для построения модели служат результаты исследования зависимости деградационных изменений ФП однотипных ТЭП в аналогичных условиях эксплуатации от времени и профиля температурного поля при разных температурах. Например, для ТЭП типа хромель-алюмель результаты таких исследований приведены в [4].

Однако описанному в [3] методу присущи существенные погрешности из-за неизбежных отличий условий эксплуатации данного ТЭП и исследованных однотипных (на базе которых построены модели) и индивидуальных особенностей его дрейфа. В [5] сделана попытка повысить точность метода [3] путем периодического уточнения моделей погрешности участков электродов по данным лабораторных поверок ТЭП. Но в результате поверки получаем суммарную погрешность ТЭП, которую следует адекватно распределить между отдельными участками. Однако научно обоснованный критерий такого распределения не известен, а неправильное распределение может увеличить погрешность вместо ее уменьшения.

Цель данной статьи — усовершенствование предложенного в [2] метода коррекции погрешности измерений температуры из-за приобретенной неоднородности электродов ТЭП, обеспечивающего повышение точности коррекции путем построения индивидуальных математических моделей погрешности участков электродов по результатам лабораторных поверок.

Основная идея предложенного в [2, 6] метода коррекции заключается в следующем. Если отклонение прогнозируемой погрешности ТЭП (суммы погрешностей всех участков) от действительной погрешности (полученной по результатам поверки) распределить между участками правильно (в соответствии с истинным критерием) и далее вести ее коррекцию с помощью уточненных моделей погрешности участков, то погрешность ТЭП в разных профилях температурного поля значительно уменьшится по сравнению с погрешностью коррекции до уточнения моделей. Снижение погрешности можно проконтролировать путем поверки преобразователей в разных профилях температурного поля.

Результаты поверки ТЭП в разных профилях температурного поля могут служить для выбора правильного критерия распределения суммарной погрешности между участками. При этом возможны два метода определения доли отклонения прогнозируемой погрешности от действительной на каждом участке. Один из них заключается в том, что после каждой поверки находят индивидуальные поправки для каждого участка ТЭП, а в течение его дальнейшей эксплуатации для прогнозирования поправок на этих участках используют общую модель с учетом полученных ранее индивидуальных поправок. В другом методе предполагается, что после нескольких поверок на основе правильных распределений суммарной погрешности между участками строят индивидуальные модели прогнозирования дрейфа ФП каждого участка. Для этого целесообразно использовать метод, предложенный в [7]; при этом будут сочетаться высокие точности прогнозирования погрешности из-за неоднородности термоэлектродов и временного дрейфа. Следовательно, с помощью

этих моделей можно корректировать как временной дрейф ФП ТЭП, так и погрешность из-за приобретенной неоднородности термоэлектродов.

Исходя из основной идеи предложенного метода можно сформулировать новые (дополнительные) процедуры эксплуатации и поверки, необходимые для его реализации:

постоянный контроль (как во время поверки, так и в течение эксплуатации) профиля температурного поля вдоль электродов термопары, погрешность которой корректируют; возможность изменения указанного профиля температурного поля вдоль электродов во время поверки ТЭП таким образом, чтобы получить достаточный набор профилей для последующей обработки данных;

обработка результатов поверки в соответствии с методикой, позволяющей распределить полученные при поверке значения суммарной погрешности ТЭП между отдельными участками;

использование во время эксплуатации уточненных индивидуальных моделей дрейфа ФП всех участков.

Первые две процедуры реализуют известными методами. Третью процедуру, если количество профилей температурного поля соответствует количеству участков, можно реализовать путем решения системы линейных уравнений. Каждое уравнение должно представлять сумму погрешностей

$\Delta E_i^M, i=\overline{1,n}$ прогнозируемых с помощью модели дрейфа ФП участков из-за неоднородности ТЭП и неизвестных (искомых) погрешностей прогнозирования $\Delta \Delta E_i^M$, приравненных к погрешности $\Delta E_j^{пов}$, полученной в результате поверки в $j=\overline{1,m}$, где $m=n$, профилях температурного поля:

$$\sum_{i=1}^n \Delta E_i^M + \sum_{i=1}^n \Delta \Delta E_i^M = \Delta E_j^{пов}. \quad (1)$$

Решение системы (1) позволит адекватно распределить прогнозируемую погрешность между участками и уточнить

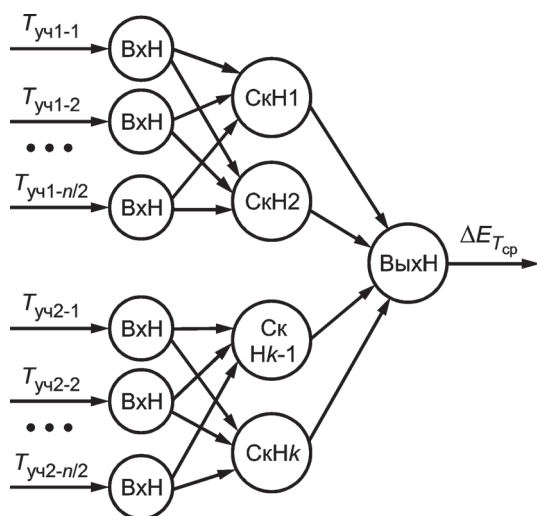


Рис. 1. Структура нейронной сети:

$T_{уч}$ — температура участка термоэлектрода; ВхН, ВыхН — входной и выходной нейроны; СкН — нейрон скрытого слоя

математическую модель их дрейфа, но при этом возникает противоречие. Для более полного учета индивидуальных особенностей дрейфа ТЭП при разных условиях (температурах), т. е. для повышения точности прогнозирования, целесообразно увеличивать число n , поскольку условием разбиения является критерий пренебрежимо малых отличий характера дрейфа ФП в пределах каждого участка. Однако при увеличении n пропорционально повышается трудоемкость поверки — число поверок m и соответственно профилей температурного поля поверки, которое должно быть равно n .

В [6] предложено разрешить это противоречие путем использования обобщающих свойств нейронных сетей, в частности трехслойного персептрона [8]. Структура сети, примененной для распределения прогнозируемой погрешности дрейфа ФП ТЭП, представлена на рис. 1. Она содержит набор входных нейронов ВхН (выполняют функции распределения), набор нейронов скрытого слоя СкН (с сигмоидной функцией активации) и линейный выходной нейрон ВыхН. Количество входных нейронов соответствует числу n . Количество нейронов скрытого слоя k меньше половины числа профилей температурного поля поверки, т. е. $k < m/2$, иначе НС превратится в ассоциативную память (потеряет обобщающие свойства [8]).

При обучении нейронной сети на ВхН подается текущий профиль температурного поля поверки (температуры всех участков электродов), а выходной сигнал, поступающий с ВыхН, сравнивается с результатом поверки $\Delta E_j^{пов}$, соответствующим этому профилю температурного поля. В итоге обучения сеть обобщает полученные результаты поверки и при поступлении на входы ВхН нового набора температур участков (в которых поверка не проводилась) прогнозирует поправку, соответствующую этому профилю температурного поля.

Экспериментальные исследования погрешности предложенного метода не позволяют выявить его свойства из-за ограниченного числа реализаций дрейфа ФП. Для этой цели целесообразно применить имитационное моделирование, воспользовавшись данными о дрейфе термопары хромель-алюмель в воздушной среде в течение 1000 ч при 800 °С [4]. Согласно модели, приведенной в [1], с учетом полученных поправочных коэффициентов дрейф хромелевого электрода можно описать функцией

$$\Delta E_{xp}^{1000} = 2,11 \cdot 0,035 \times \sqrt{t_9} \left(-4,6 \cdot 10^{-7} t_d^3 + 0,275 \cdot 10^{-3} t_d^2 + 0,213 t_d \right), \quad (2)$$

а алюмелевого — функцией

$$\Delta E_{ал}^{1000} = 1,39 \cdot 0,035 \times \sqrt{t_9} \left(-4 \cdot 10^{-9} t_d^4 + 0,71 \cdot 10^{-5} t_d^3 - 0,38 \cdot 10^{-2} t_d^2 + 0,715 t_d \right), \quad (3)$$

где ΔE_{xp}^{1000} , $\Delta E_{ал}^{1000}$ выражаются в микровольтах; t_9 , t_d — температуры постоянной эксплуатации и диапазона участка электрода. Погрешность аппроксимации не превышает 0,5 °С.

Для оценки погрешности метода оба термоэлектрода разделены на 24 участка одинаковой длины (как в [1]), при этом сделаны аналогичные допущения:

температура свободных концов, при которой эксплуатируются участки 1—8, равна 0 °С;

температура рабочего конца, при которой эксплуатируются участки 17—24, равна 800 °С;

температурное поле вдоль участков 9—16 равномерно изменяется от 0 до 800 °С, $\Delta t = t_{i-1} = 100$ °С, т. е. на каждый участок приходится изменение температуры 100 °С;

в пределах каждого участка погрешность из-за его собственной неоднородности не проявляется;

в качестве температуры эксплуатации $t_{э}$ принимаем среднее арифметическое значение температур начала и конца i -го участка до изменения профиля температурного поля;

в качестве температуры t_i диапазона, в который i -й участок попал в результате изменения профиля температурного поля, принимаем среднее арифметическое значение температур начала и конца участка;

погрешность начального разброса ФП отсутствует (она уже скорректирована).

Погрешность из-за приобретенной в процессе эксплуатации неоднородности термоэлектродов будет равна изменению генерируемой термопарой термо-ЭДС (ТЭДС), возникающей при изменении профиля температурного поля, когда участки с температурами $t_{эi}$ оказываются при температуре t_i . Причиной изменения ТЭДС является зависимость скорости и характера деградационных процессов в термоэлектродах от температуры эксплуатации [1, 2, 4].

Для исследования возможностей нейронной сети при реализации предложенного метода коррекции погрешности из-за приобретенной неоднородности термоэлектродов необходимо определить зависимость его неисключенной погрешности от количества поверок в разных профилях температурного поля (эффективность метода будет определять скорость нарастания прогнозируемой погрешности корректирующего воздействия при уменьшении количества поверок). При таком исследовании необходимо учитывать также индивидуальный характер дрейфа ФП участков термоэлектродов. Предлагается имитировать индивидуальные особенности дрейфа каждого участка отклонением скорости их дрейфа (путем случайного изменения начального коэффициента в зависимостях (2), (3)) и введением неравномерности дрейфа (путем суммирования значений, полученных по (2), (3), и синусоидальной зависимости, амплитуда и период которой меняются случайным образом в некоторых пределах).

Неисключенную погрешность метода исследовали при выполнении следующих операций.

1. Выбор отклонения скорости дрейфа ФП и его неравномерности для каждого участка.

2. Задание очередного профиля температурного поля параллельным его переносом на число шагов, кратных половине участка, причем перенос идет в сторону как рабочего конца, так и свободных концов (всего 28 профилей).

3. Расчет температур $t_{эi}$ и t_i каждого участка.

4. Вычисление по (2), (3) значений дрейфа ФП каждого участка для каждого профиля температурного поля.

5. Суммирование полученных при выполнении п. 4 значений погрешности участков (нахождение погрешностей ТЭП из-за приобретенной неоднородности для каждого профиля температурного поля).

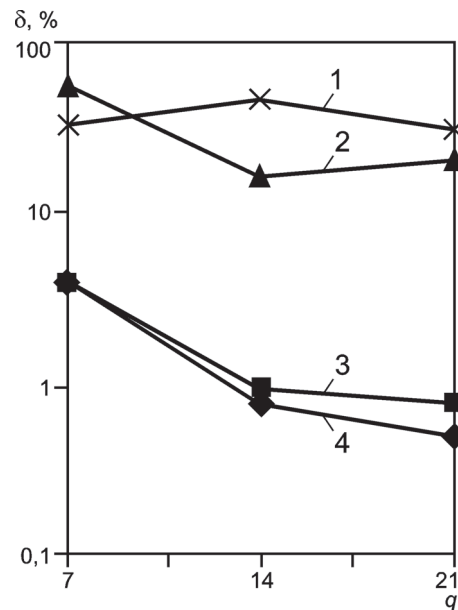


Рис. 2. Зависимости максимальной (1, 2) и средней (3, 4) прогнозируемых погрешностей δ от количества поверок q и отклонений на ± 10 и ± 20 % (соответственно кривые 2, 4 и 1, 3) скорости дрейфа ФП участков термоэлектродов ТЭП

6. Обучение нейронной сети на заданной обучающей выборке — количестве значений погрешностей ТЭП в разных профилях температурного поля, полученных при выполнении п. 5 (максимальное число векторов обучения соответствует заданному при выполнении п. 2 суммарному числу 28 полей поверки, при исследовании метода оно снижается до 21, 14 и 7).

7. Вычисление выходных значений нейронной сети для тестовой выборки (всегда соответствует суммарному числу 28 полей поверки).

8. Расчет неисключенной погрешности метода — разницы между полученными при выполнении п. 5 значениями погрешностей из-за приобретенной неоднородности ТЭП для каждого профиля температурного поля и соответствующими прогнозируемыми при выполнении п. 7 значениями этих погрешностей.

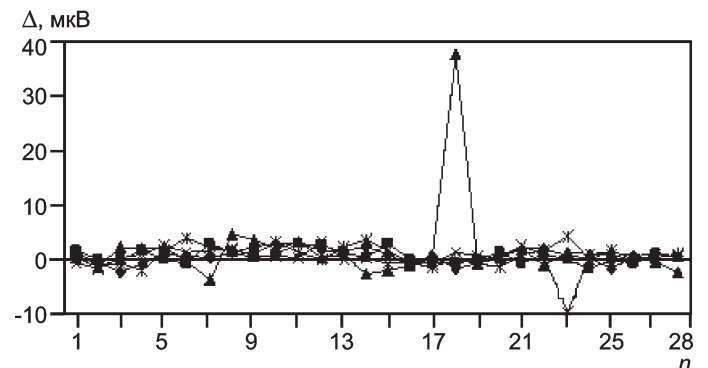


Рис. 3. Примеры прогнозирования результатов поверки в 28 профилях температурного поля по результатам поверки в 7 профилях при отклонении на ± 20 % скорости дрейфа функции преобразования участков термоэлектродов ТЭП:

▲ — неисключенная погрешность; n — номер поверки

В связи с тем, что процесс обучения сети проводится с использованием генераторов случайных чисел, каждую погрешность исследовали при десятикратном последовательном запуске программы, реализующей представленную выше методику. При расчете неисключенной погрешности метода обязательно использовали все полученные результаты.

Исследования проведены с применением трехслойного персептрона следующей структуры: число входных распределительных нейронов 24, нейронов скрытого слоя 3; функция активации нейронов скрытого слоя — сигмоида; один нейрон выходного слоя; линейная функция активации нейронов выходного слоя; обучение методом Левенберга—Маркуарта; максимальное число эпох обучения 4000 (максимальное время обучения 4 мин).

Количество результатов проверок в обучающей выборке всегда уменьшали исключением каждого четвертого, второго и трех из четырех. При этом тестовая выборка всегда оставалась неизменной. Это означает, что при обучении на сокращенной выборке тестовая выборка обеспечивает исследование погрешности воспроизведения результатов невыполненных проверок.

По приведенной выше методике получены зависимости средней и максимальной неисключенной погрешности предложенного метода (прогнозируемой погрешности результатов проверок, которые реально не проводились) от числа проверок (действительно проведенных) и отклонений скорости дрейфа ФП участков ТЭП (рис. 2). Имитировали отклонения скорости дрейфа на ± 10 и ± 20 %. Как следует из рис. 2, средняя прогнозируемая погрешность сравнительно мала, она повышается с уменьшением количества действительных проверок и почти не зависит от отклонений скорости дрейфа относительно заданных моделей, построенных по результатам экспериментов [4]. Однако, как показали исследования, при дальнейшем увеличении отклонения скорости дрейфа погрешность прогноза резко возрастает и метод становится неэффективным.

Из рис. 2 также следует, что максимальная прогнозируемая погрешность более чем на порядок превышает сред-

нюю: максимальная погрешность имеет вид редких выбросов (пиков), что отражено в примере из пяти результатов прогноза (рис. 3). Следует отметить, что выбросы происходят не систематически, а примерно в 20 % случаев. Поэтому при реальном использовании предложенного метода после обучения нейронной сети целесообразно контролировать максимальную абсолютную погрешность и повторить обучение при наличии выбросов.

При отклонении скорости дрейфа ФП участков ТЭП на ± 20 % закон распределения неисключенной прогнозируемой погрешности можно считать близким к нормальному в случае относительно больших маловероятных выбросов. Среднее квадратическое отклонение составляет ± 6 мкВ или $\pm 0,15$ °С, погрешность метода равна ± 10 мкВ или $\pm 0,25$ °С для доверительной вероятности $P = 0,9$ и ± 18 мкВ или $\pm 0,45$ °С для $P = 0,95$ [9].

На рис. 4 приведены результаты исследования зависимости средней и максимальной неисключенной погрешностей метода от неравномерности дрейфа ФП участков ТЭП. Имитировали неравномерность дрейфа ± 5 , ± 10 и ± 15 %. Как следует из рис. 4, средняя прогнозируемая погрешность сравнительно мала и слабо зависит от числа действительных проверок. При дальнейшем увеличении неравномерности дрейфа прогнозируемая погрешность резко возрастает, метод становится неэффективным. Аналогично, как и при исследовании отклонений скорости дрейфа, максимальная прогнозируемая погрешность более чем на порядок превышает среднюю из-за редких выбросов, которые можно устранить в результате повторного обучения сети.

Закон распределения неисключенной прогнозируемой погрешности при ± 15 %-й неравномерности дрейфа также можно считать близким к нормальному, но имеется, как и прежде, много маловероятных отклонений небольшой амплитуды, а также пик в области погрешности 8 мкВ. Среднее квадратическое отклонение составляет $\pm 6,5$ мкВ или $\pm 0,17$ °С, погрешность метода равна ± 12 мкВ или $\pm 0,3$ °С для $P = 0,9$ и $\pm 19,5$ мкВ или $\pm 0,5$ °С для $P = 0,95$.

Выводы. Предложенный метод коррекции погрешности неоднородности электродов ТЭП, приобретенной в процессе длительной эксплуатации, позволяет существенно повысить точность измерений температуры. Основными ограничениями метода являются индивидуальные особенности дрейфа различных участков термоэлектродов. Одна из причин отклонений — изменение характера дрейфа функций преобразования участков ТЭП при переходе к другой температуре эксплуатации. Таким образом, предложенный метод целесообразно применять, когда изменения профиля температурного поля вдоль термоэлектродов имеют вид сравнительно коротких импульсов, за время действия которых характер дрейфа не успевает измениться. Еще одно ограничение метода связано с возникновением выбросов прогнозируемой погрешности. Их редкое появление скорее всего обусловлено тем, что для прогнозирования результатов проверки была применена простая нейронная сеть — трехслойный персептрон. Возможно, в случае сети более сложной структуры (рекуррентных или использующих радиально-базисные функции) выбросов не будет. Следует отметить, что в статье изучены лишь неисключенные прогнозируемые погрешности, возникающие при уменьшении числа проверок с помощью нейронной сети.

Статья написана при поддержке Фонда Естественных Наук китайской провинции Хубэй (2014CFB605), Фонда Науки провинции Ухань и технологического Бюро (2015030809020370).

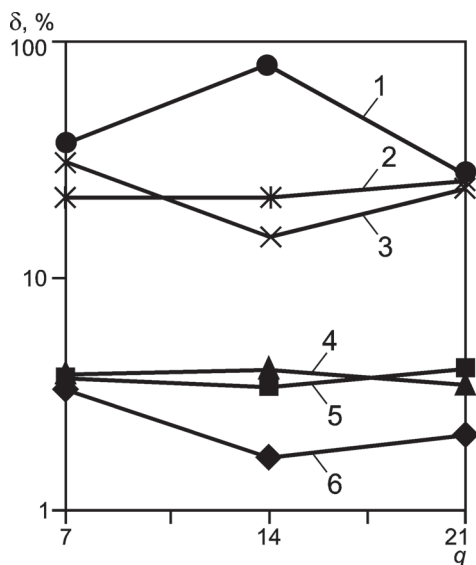


Рис. 4. Зависимости максимальной (1—3) и средней (4—6) прогнозируемых погрешностей от количества проверок q и неравномерности 5; 10; 15 % дрейфа функции преобразования участков термоэлектродов ТЭП, соответственно кривые 3, 6; 2, 5; 1, 4

Л и т е р а т у р а

1. **Су Цзюнь, Кочан О. В.** Механизм возникновения приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар и его влияние на результат измерения температуры // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 38—42.

2. **Су Цзюнь, Кочан О. В., Йоцов В. С.** Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 54—55.

3. **Мильченко В. Ю.** Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 1984.

4. **Рогельберг Л. М., Пигидина Н. А., Покровская Э. Н.** Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюминия при нагреве на воздухе при 800 °С продолжительностью до 10000 ч // Исследование сплавов для термопар. Т. III: Труды института Гипроцветметобработка. М.: Металлургия, 1969.

5. **Чырка М. И.** Повышение точности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями в неравномерных тепловых полях: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Львов, 1997.

6. **Пат. 92192 Украины.** Способ коррекции погрешности неоднородности термопар / Н. М. Василькив, О. В. Кочан, В. В. Кочан // Бюл. 2009. № 21.

7. **Sachenko A., Kochan V., Turchenko V.** Instrumentation for Gathering Data // Instrum. and Measur. Mag. 2003. V. 6. N. 3. P. 34—40.

8. **Kroese B.** An introduction to Neural Networks. Amsterdam: University of Amsterdam, 1996.

9. **De Coursey W. J.** Statistics and Probability for Engineering Applications With Microsoft Excel. Woburn (GB): Elsevier Sci., 2003.

Дата принятия 07.03.2014 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.729

Комплект модулей термоэлектрических преобразователей высшей точности для сравнения переменного и постоянного напряжений

**М. Л. ГУРЕВИЧ, А. В. ГОРШКОВ, О. А. КУДРЯВЦЕВ, А. В. КУРАКИН,
П. Н. РУСЕЙКИН, А. В. ЧЕРЕМОХИН**

Нижегородский научно-исследовательский институт «Кварц» им. А. П. Горшкова,
Н. Новгород, Россия, e-mail: gurevitch@inbox.ru

Приведены технические характеристики, особенности схемно-конструктивного построения и применения нового комплекта модулей термоэлектрических преобразователей напряжения ПНТЭ-36, используемых в качестве эталонов сравнения высшей точности при поверке калибраторов и вольтметров переменного напряжения в диапазоне уровней сигналов 0,001—1000 В при частотах 10—10⁶ Гц.

Ключевые слова: эталоны постоянного и переменного напряжений, термопреобразователь, термокомпаратор, вольтметр, калибратор.

The technical characteristics, the features of scheme-construction design and application of new AC-DC standards ПНТЭ-36, containing the electronic measurement units, thermal converters, and used as high precision standards during calibrators and AC-voltmeters verification in the range of voltage signal levels 0,001—1000 V and frequency range 10—10⁶ Hz are presented.

Key words: DC and AC voltage standards, thermal converter, thermal comparator, voltmeter, calibrator.

Термоэлектрические преобразователи, выполненные конструктивно в малогабаритных блоках (модулях), защищенных электрическим и тепловым экранами, широко применяются в метрологической практике в качестве эталонов сравнения

(термокомпараторов) переменного и постоянного напряжений при поверке прецизионных средств измерений (СИ) переменных напряжений, включая вольтметры и калибраторы [1].