

ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В статье рассмотрены особенности устройства современных тензорезисторных средств измерительной техники. Описаны причины возникновения температурных погрешностей и известные методы их компенсации. Предложен способ компенсации динамической составляющей температурной погрешности, возникающей вследствие изменения температуры окружающей среды во времени.

Ключевые слова: тензорезистор, температурная компенсация, постоянная времени, алгоритм

Введение. Тензорезисторные средства измерительной техники (СИТ) широко используются в настоящее время для измерения механических величин, таких как сила, масса, деформация, давление. Основными областями применения современных тензорезисторных СИТ являются

- коммерческие взвешивания грузов;
- статические, динамические и усталостные испытания различных конструкций;
- измерения внутренних напряжений деталей машин, механизмов и технологического оборудования;
- измерение массы и дозирование технологических компонентов в металлургической, химической, пищевой и других отраслях промышленности.

Характерной особенностью современных тензорезисторных СИТ является их высокий уровень автоматизации и интеллектуализации. Появление интеллектуальных СИТ обусловлено с одной стороны бурным развитием элементной базы микроэлектроники, а с другой – растущими требованиями к функциональным возможностям СИТ, надежности, метрологическим и технико-экономическим характеристикам. Основные принципы построения и особенности работы интеллектуальных СИТ изложены в работах [1, 2]. Ведущими мировыми производителями тензорезисторных СИТ являются фирмы AXIS, CAS, ENP, Jadever, OHAUS, Pfister, Sartorius, Schenck и др. Уровень основной приведенной погрешности современных тензорезисторных СИТ – (0,01...0,5) %.

Постановка задачи. В современных тензорезисторных СИТ широко используются различные методы температурной компенсации. Однако при возникновении динамической составляющей температурной погрешности, обусловленной изменением температуры окружающей среды, применение обычных методов компенсации дает значительную остаточную погрешность. Таким образом, возникает необходимость совершенствования существующих методов температурной компенсации.

Особенности устройства тензорезисторных СИТ. Современные тензорезисторные СИТ, как правило, построены по структурной схеме, изображенной на рис. 1.

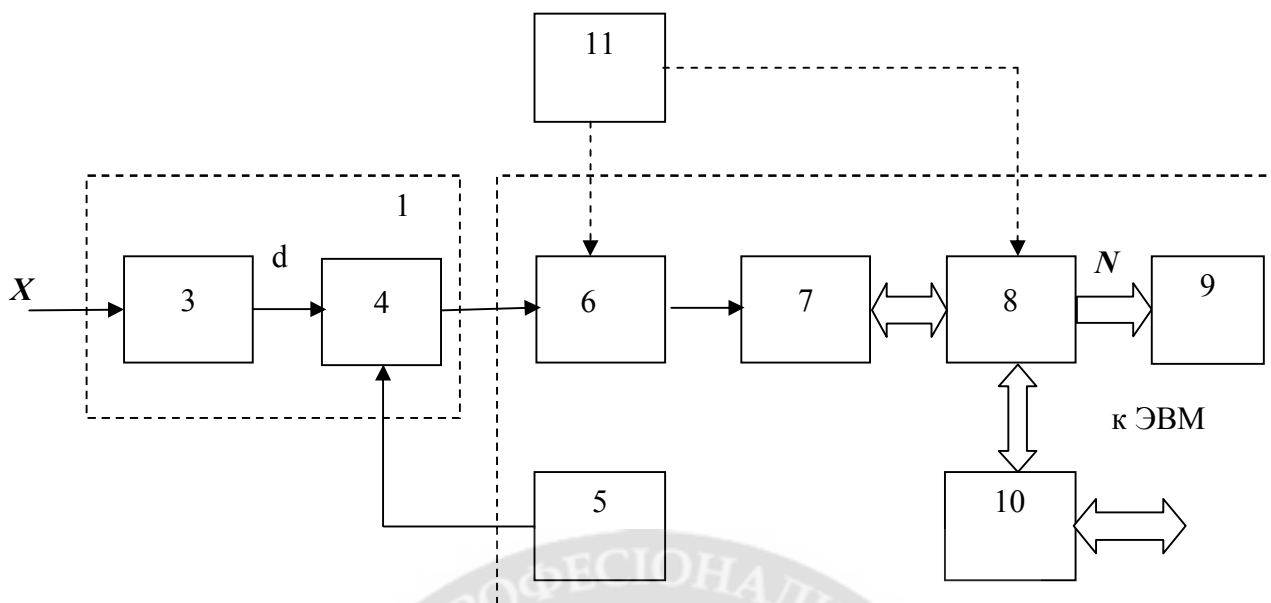


Рис. 1. Структурная схема тензорезисторного СИТ:

- 1 – тензорезисторный преобразователь (тензодатчик);
- 2 – блок измерения и обработки информации;
- 3 – чувствительный элемент;
- 4 – мостовая измерительная схема;
- 5 – источник опорного напряжения;
- 6 – вторичный нормирующий преобразователь (ВНП);
- 7 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- 8 – блок обработки информации;
- 9 – отсчетное устройство;
- 10 – интерфейс;
- 11 – датчик температуры

Конструктивно СИТ, изображенное на рис. 1, состоит из тензорезисторного преобразователя (тензодатчика) 1 и блока измерения и обработки информации 2. В зависимости от выполняемых функций СИТ может включать в себя различное количество тензодатчиков. Чувствительный элемент 3 тензодатчика преобразует измеряемую физическую величину в деформацию d . Вместе с чувствительным элементом деформируются наклеенные на него тензорезисторы, образующие мостовую измерительную схему 4, питание которой осуществляется источником опорного напряжения 5. Выходное напряжение мостовой измерительной схемы по линиям связи подается на вход ВНП 6, где осуществляется его усиление. Сигнал с выхода ВНП поступает на вход АЦП 7, где преобразуется в цифровой код, который поступает на блок обработки информации 8. Цифровой код N с выхода блока обработки информации подается на отсчетное устройство 9. Также в современных СИТ обязательно наличие связи с внешней ЭВМ, которая осуществляется через интерфейс 10. Для компенсации влияния температуры на результат измерения используется датчик температуры 11, выход которого, в зависимости от типа датчика, может быть подключен как к входу ВНП, так и непосредственно к блоку обработки информации. Конструктивно датчик температуры размещается вблизи тензодатчика. Более подробно работа, особенности построения и применения функциональных узлов тензорезисторных СИТ рассмотрены в [3, 4].

Температурные погрешности тензорезисторных СИТ. Температурная погрешность для тензорезисторных СИТ является наиболее существенной составляющей дополнительной погрешности. Она вызывается изменением температуры окружающей среды, которая

возникает как из-за изменения упругих свойств чувствительного элемента, так и из-за температурного дрейфа параметров мостовой схемы. Без применения методов температурной компенсации значение температурной погрешности может значительно превосходить основную погрешность тензорезисторного СИТ, достигая значений $\pm(5...10)$ %.

Температурная погрешность чувствительного элемента обусловлена зависимостью упругих свойств чувствительного элемента от температуры. С возрастанием температуры величина модуля упругости чувствительного элемента снижается. Погрешность от этого эффекта для специальных сталей составляет около 1% на 25 К. Температурная погрешность возникает также вследствие изменения линейных размеров при нагреве чувствительного элемента.

Температурная погрешность мостовой схемы, которая складывается из температурного дрейфа нуля тензорезисторов и температурного дрейфа чувствительности.

Для компенсации температурной погрешности применяются следующие способы, основанные на структурных методах повышения точности [5]:

- схемная компенсация температурного приращения сопротивления тензорезисторов;
- применение комбинированных тензорезисторов;
- применение тензорезисторов с компенсационной петлей;
- внесение поправки.

Способ схемной компенсации основан на применении компенсационных тензорезисторов, находящихся в одинаковых температурных условиях с активными. При использовании схемы полного моста, в которой все тензорезисторы являются одновременно и активными, и компенсационными, происходит взаимная компенсация температурных приращений сопротивлений тензорезисторов. Таким образом, при использовании способа схемной компенсации, температурная погрешность мостовой схемы практически исключается. Остаточную погрешность, которая возникает из-за разброса температурных характеристик тензорезисторов (ТКС, температурный дрейф нуля, температурная ползучесть), можно уменьшить путем подбора тензорезисторов с близкими температурными характеристиками.

Менее популярны способы температурной компенсации, основанные на применении комбинированных тензорезисторов, тензочувствительная решетка которых выполнена из двух материалов, имеющих равные по величине, но разные по знаку ТКС, и тензорезисторов с компенсационной петлей, которая имеет ТКС больший, чем у самого тензорезистора, и включается как дополнительное сопротивление в компенсационное плечо мостовой схемы.

Применение указанных выше способов температурной компенсации тензорезисторных СИТ позволяет свести к минимуму температурную погрешность мостовой схемы. Способ внесения поправки в результат измерения позволяет скомпенсировать обе составляющие температурной погрешности. Значение температуры тензодатчика измеряется с помощью дополнительного измерительного канала. По предварительно определенной зависимости температурной погрешности от значения выходного сигнала канала измерения температуры вносится поправка в измеренное значение. До появления интеллектуальных тензорезисторных СИТ поправка вносилась в аналоговом виде с помощью специальных функциональных преобразователей [6, 7]. Применение в современных тензорезисторных СИТ интеллектуальных функциональных узлов позволяет автоматизировать процесс внесения поправки и реализовать достаточно сложные алгоритмы компенсации температурной погрешности.

Температурная компенсация при изменении температуры во времени. При изменении температуры окружающей среды во времени (например, при взвешивании с помощью бункерной весоизмерительной системы высокотемпературных жидкостей в химической промышленности, при работе крановых весов в литейном цехе и т. д.), возникает динамическая составляющая температурной погрешности, обусловленная различной тепловой инерционностью тензодатчика и датчика температуры. Тепловая инерционность

датчика температуры обусловлена невозможностью мгновенного изменения теплового состояния датчика и является источником динамической погрешности измерения температуры, то есть несоответствия выходного сигнала датчика температуре окружающей среды. Тензодатчик, как правило, имеет тепловую инерционность в несколько раз большую, чем датчик температуры. Это приводит к тому, что значение температуры, измеренное датчиком температуры, в случае изменения во времени температуры окружающей среды не будет соответствовать температуре тензодатчика.

В работах [8 – 10] для устранения динамической составляющей температурной погрешности предложено использование метода экстраполяции к установившемуся значению. На его основе разработан способ компенсации влияния изменяющейся во времени температуры.

Соотношения для расчета установившихся значений измеряемой величины и температуры окружающей среды имеют вид:

$$\tilde{X}^y = \frac{\tilde{X}_{i+1}^{изм} - \tilde{X}_i^{изм} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_X}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_X}}}, \quad (1)$$

$$T^y = \frac{T_{i+1}^{изм} - T_i^{изм} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_T}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_T}}}, \quad (2)$$

где $\tilde{X}_{i+1}^{изм}$, $\tilde{X}_i^{изм}$, $T_{i+1}^{изм}$, $T_i^{изм}$ - измеренные через интервал времени Δt значения измеряемой величины и температуры окружающей среды соответственно;

τ_X , τ_T - температурные постоянные времени тензодатчика и датчика температуры соответственно.

Температурные постоянные времени датчиков могут быть определены любым известным способом, вариация их значений у датчиков одного типа незначительна.

Работа алгоритма температурной компенсации, основанного на предложенном способе, исследована при различных законах изменения температуры. Температурная погрешность СИТ δ_T при использовании предложенного способа складывается из неисключенной температурной погрешности θ_T и неисключенной систематической погрешности $\theta_{дин}$, обусловленной неточностью определения температурных постоянных времени датчиков. При погрешностях определения температурных постоянных времени $\delta_{\tau_T} = \delta_{\tau_X} = 5\%$ и остальных условиях: $T^н = 20^\circ C$, $T^y = 40^\circ C$, $k=10$ значение δ_T составило $\pm 0,13\%$. Значение времени установления показаний по сравнению с традиционной температурной компенсацией снижено с $6\tau_X$ до $3\tau_X$.

Далее была исследована работа алгоритма температурной компенсации при различных законах изменения измеряемой величины, выявлена высокая чувствительность алгоритма к изменению измеряемой величины. Для устранения данного недостатка предложено применение динамического усреднения оценки действительного значения измеряемой величины. Его суть заключается в том, что текущее среднее значение $\bar{X}_j^{o'}$ определяется на основе усреднения предыдущего среднего $\bar{X}_{j-1}^{o'}$ и текущего значения оценки $X_j^{o'}$:

$$\bar{X}_j^{o'} = \frac{j-1}{j} \bar{X}_{j-1}^{o'} + \frac{1}{j} X_j^{o'}. \quad (3)$$

Компьютерное моделирование динамического усреднения оценки действительного значения по формуле (3) подтверждает эффективность предложенного решения.

Достоверность теоретических результатов, полученных в данном разделе, подтверждена экспериментальными исследованиями, которые заключались в испытаниях крановых весов ВКМ-3 при их работе в условиях изменяющейся температуры окружающей среды. По результатам испытаний было зафиксировано уменьшение максимального значения приведенной температурной погрешности с 2% до 0,17%, по сравнению с традиционным алгоритмом температурной компенсации, и уменьшение времени установления показаний со 135 с до 75 с.

Выводы. Разработанный способ температурной компенсации, в отличие от существующих, позволяет значительно уменьшить динамическую составляющую температурной погрешности, обусловленную различной тепловой инерционностью тензодатчика и датчика температуры, а также снизить время установления показаний. Применение предложенного способа позволяет повысить точность тензорезисторных СИТ механических величин при их работе в условиях изменения температуры окружающей среды.

Полученные результаты могут быть распространены на общий случай компенсации дополнительной погрешности СИТ, вызванной изменением внешнего влияющего фактора (ВВФ), в частности ее динамической составляющей, обусловленной неидентичностью переходной характеристики канала измерения величины ВВФ и динамической функции влияния ВВФ на основной канал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раннев Г.Г. Интеллектуальные средства измерений / Г. Г. Раннев. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 272 с.
2. Садовский Г.А. Теоретические основы информационно-измерительной техники: Учебное пособие - М.: Высшая школа 2008. – 478 с.
3. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.
4. Signal Conditioning ADC: AD7710, AD7711, AD7712, AD7730. Technical description. Analog Devices (www.analogdevices.com).
5. Клокова Н.П. и др. Тензодатчики для экспериментальных исследований. - М.: Машиностроение, 1972. - 152 с.
6. А. с. SU 1763867 A1 G01 B 5/30 Тензометрическое устройство. / Исаков С.А., Фильчиков В.А., Пашенко В.В., Маланин В.П. №4858215/28 Заявл. 08.08.90. Опубл. 23.09.92. Бюл. №35.
7. Пат. RU 2037145 C1 G01 L 9/04 Тензометрический измеритель давления. / Левцов В.И., Королев А.И. №93003230/10 Заявл. 18.01.93. Опубл. 09.06.95. Бюл. №16.
8. Потыльчак А.П., Черепащук Г.А. Компенсация воздействия на средства измерительной техники изменяющихся внешних влияний. // МНТК “Метрологія в електроніці - 2004”. Праці конференції. – Т. 1.-Харків. - 2004.- С. 140 – 142.
9. Потыльчак А.П., Черепащук Г.А. Компенсация температурной погрешности тензорезисторных СИТ в условиях нестационарных тепловых полей // Український метрологічний журнал. – №1. – 2006. С. 11 – 16.
10. Пат. № 18203 України на корисну модель, МКВ G01L 5/04 G01B13/00. Спосіб температурної компенсації тензометричних пристроїв / Потыльчак О.П., Черепащук Г.О. - № 20040907201; Заявл. 1.09.2004; Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н. Потыльчак О.П.

ОСОБЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОГРІШНОСТІ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

У статті розглянуто особливості устрою сучасних тензорезисторних засобів виміральної техніки. Описано причини виникнення температурних похибок та відомі методи

їх компенсації. Запропоновано спосіб компенсації динамічної складової температурної похибки, що виникає через зміну температури навколишнього середовища у часі.

Ключові слова: тензорезистор, температурна компенсація, стала часу, алгоритм

Ph.D. Potylchak O.P.

FEATURES COMPENSATE FOR TEMPERATURE MEASURE ERROR OF A MEASURING INSTRUMENT WITH TEMPERATURE ENVIRONMENT

In the article features of strain gauge measuring instruments structure are considered. The causes of temperature errors and known methods of their compensation are described. The method of temperature error dynamic component, that appears due to instability of environment temperature, compensation is offered.

Keywords: strain gauge, temperature compensation, time constant, algorithm.