

$$H(e^{j\hat{\omega}}) = \frac{[b_0 + b_1 \cos(\hat{\omega}) + b_2 \cos(2\hat{\omega})] - j[b_1 \sin(\hat{\omega}) + b_2 \sin(2\hat{\omega})]}{[1 + a_1 \cos(\hat{\omega}) + a_2 \cos(2\hat{\omega})] - j[a_1 \sin(\hat{\omega}) + a_2 \sin(2\hat{\omega})]}.$$

Модуль АЧХ равен:

$$A(\hat{\omega}) = \sqrt{\frac{[b_0 + b_1 \cos(\hat{\omega}) + b_2 \cos(2\hat{\omega})]^2 - j[b_1 \sin(\hat{\omega}) + b_2 \sin(2\hat{\omega})]^2}{[1 + a_1 \cos(\hat{\omega}) + a_2 \cos(2\hat{\omega})]^2 - j[a_1 \sin(\hat{\omega}) + a_2 \sin(2\hat{\omega})]^2}},$$

тогда аргумент ФЧХ равен:

$$\varphi(\hat{\omega}) = \arctg \frac{a_1 \sin(\hat{\omega}) + a_2 \sin(2\hat{\omega})}{1 + a_1 \cos(\hat{\omega}) + a_2 \cos(2\hat{\omega})} - \arctg \frac{b_1 \sin(\hat{\omega}) + b_2 \sin(2\hat{\omega})}{b_0 + b_1 \cos(\hat{\omega}) + b_2 \cos(2\hat{\omega})}.$$

Программа предусматривает операции по формированию и выводу результатов расчета на дисплей и память ПК.

### ***Заключение***

Предложен метод определения динамических характеристик датчиков в газообразной среде на ударной трубе высокого давления с наименьшими затратами и обеспечением необходимой точности и достоверности. Экспериментально получены переходные и частотные характеристики, а также частоты собственных колебаний датчиков.

### ***Библиографический список***

1. Авдеева, О. В. Основы управления техническими системами (Теория линейных систем) : учеб. пособие / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 246 с.
2. Мясникова, Н. В. Система для исследования характеристик датчиков динамического давления / Н. В. Мясникова, А. П. Панов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Контроль. Управление. – 2013. – № 4 (6). – С. 32–36.
3. Бушуев, О. Ю. Исследование динамических характеристик тензометрического преобразователя давления с целью диагностики его состояния / О. Ю. Бушуев, А. С. Семенов, А. О. Чернявский // Датчики и системы. – 2010. – № 4. – 95 с.

**Б. В. Цыпин, И. Н. Чебурахин, В. С. Волков, В. В. Кикот**

## **КОРРЕКЦИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЕРВИЧНЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

АО «НИИФИ», г. Пенза, Россия

Развитие микро- и нано электроники предоставляет новые возможности по увеличению точности измерительных устройств (ИУ) на основе миниатюрных электронных схем с низким энергопотреблением, работоспособных в условиях воздействия внешних факторов (повышенных температур, космического излучения и т.д.), за счет применения различных схемотехнических методов коррекции функции преобразования (ФП), аппаратно-программная реализация которых позволяет разместить промежуточный преобразователь непосредственно в месте измерения.

Для измерения различных физических величин широкое применение нашли тензопреобразователи, выходной сигнал которых в условиях воздействия повышенных

температур характеризуется дополнительной погрешностью, имеющей, в общем случае, аддитивную и мультипликативную составляющие. Для коррекции температурных погрешностей в составе ИУ необходим измерительный канал для преобразования температуры. Он может быть реализован тремя способами: использование временного разделения каналов по одному тракту передачи; использование преобразования температуры по двум измерительным каналам одновременно с измеряемой величиной; использование дополнительного канала только для преобразования температуры.

Задачу коррекции дополнительных температурных погрешностей (ТП) следует разделить на две самостоятельные задачи: разработку методов выделения информации о температурном ВФ и разработку методов введения корректирующей поправки в ФП ТП.

Недостатком всех указанных способов коррекции температурных погрешностей тензодатчиков является невозможность скорректировать мультипликативную погрешность тензодатчика. В этой связи, особый интерес представляет логометрический метод коррекции температурной погрешности тензометрического датчика [1, 2]. В измерительную цепь тензопреобразователя вводится делитель напряжения и методом деления вводится корректирующая поправка в измерительный сигнал. Логометрический метод позволяет скорректировать с помощью одного термозависимого сигнала, снимаемого с помощью дополнительного канала, и аддитивную и мультипликативную дополнительные погрешности. Логометрический метод позволяет добиться лучших результатов, в области коррекции температурных погрешностей тензопреобразователей, и его возможности далеко не исчерпаны.

При работе тензодатчиков в условиях высоких температур снижение погрешностей преобразования входной измеряемой величины достигается как конструктивными методами, так и применением специальных измерительных цепей (ИЦ).

ИЦ, используемые для коррекции температурных погрешностей, можно разделить на три группы:

- с естественной коррекцией;
- с включением дополнительных термозависимых элементов коррекции;
- с обработкой дополнительных сигналов.

Особенностью представленного деления является то, что эти группы не являются взаимоисключающими, а, напротив, по мере повышения требований к точности измерения ИЦ с естественной коррекцией дополняются включением термозависимых элементов (пассивная коррекция) или в дальнейшем усложняются до ИЦ с обработкой дополнительных сигналов (активная коррекция). Эффективность ИЦ с естественной коррекцией зависит от величины разброса температурных коэффициентов тензорезисторов, включенных в ИЦ. Примером ИЦ с естественной коррекцией может служить мостовая ИЦ ТП.

Эффективность использования ИЦ с включенными дополнительными термозависимыми элементами снижается тем, что функциональные температурные зависимости у компенсирующих элементов в широком диапазоне температур не совпадают с требуемыми. Настройка является трудоемкой операцией из-за необходимости осуществлять подгонку характеристик компенсирующих элементов. ИЦ с обработкой дополнительных сигналов имеют в настоящее время наибольшую перспективу применения, что связано с возможностями современной микроэлектроники и, в частности, с использованием микропроцессоров для реализации алгоритмов обработки дополнительных сигналов.

При построении ИЦ с обработкой сигналов для устранения температурной погрешности используют или метод сложения – аддитивная коррекция, или метод умножения (деления) – мультипликативная коррекция. Методы особенно эффективны, если аддитивная и мультипликативная температурные погрешности существенно различаются по величине [3–5]. При одновременном устранении аддитивной и мультипликативной погрешности чрезвычайно затруднительной оказывается процедура настройки ИЦ, что

особенно важно при массовом производстве. Это связано с тем, что при коррекции мультипликативной составляющей регулировка коэффициента передачи множительного устройства влияет на компенсацию аддитивной погрешности. Если сначала устраняется аддитивная погрешность с последующим умножением на корректирующий сигнал, то наличие хотя бы небольшого постоянного смещения корректируемого сигнала приводит к возникновению мультипликативной погрешности. Другой порядок устранения погрешностей – сначала мультипликативной, а затем аддитивной – ведет к изменению уровня аддитивной погрешности, и таким образом процесс настройки ИЦ имеет итерационный характер, как в первом, так и во втором случае. Практически это подтверждает то положение, что мультипликативная коррекция эффективна при малой аддитивной погрешности, а аддитивная коррекция эффективна при малой мультипликативной погрешности. Применение для снижения мультипликативной погрешности только метода умножения, а для снижения аддитивной – только метода сложения ограничивает возможности ИЦ для коррекции температурных погрешностей.

### **Выводы**

Коррекция ФП ИУ является гибким инструментом, пригодным для уменьшения систематических инструментальных погрешностей ИЦ за счет воздействий как на отдельные элементы, так и на все ИУ в целом. Наиболее перспективным методом коррекции дополнительной температурной погрешности представляется логометрический метод, позволяющий скорректировать как аддитивную, так и мультипликативную составляющую погрешности.

### **Библиографический список**

1. Чебурахин, И. Н. Коррекция температурной погрешности, аппроксимация градуировочных характеристик чувствительных элементов датчикопреобразующей аппаратуры с внутри-датчиковой электроникой / И. Н. Чебурахин, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 4 (14). – С. 32–41.
2. Пашенко, В. В. Проектирование измерительных цепей параметрических датчиков с использованием формализованных решений : дис. ... канд. техн. наук / Пашенко В. В. – Пенза : Изд-во ППИ, 1990. – С. 228.
3. Šaponjić, D. Correction of a piezoresistive pressure sensor using a microcontroller / D. Šaponjić, A. Žigic // Instruments and Experimental techniques. – 2001. – Vol. 44, № 1. – P. 38–44.
4. Cao, Q. W. Normalized sensitivity temperature compensation algorithm for diffused silicon pressure sensor / Q. W. Cao // Instrumentation users. – 2017. – № 24 (05). – P. 1–4.
5. Huang, J. M. Research on temperature compensation technology of pressure transmitter / J. M. Huang, M. D. Zhang // Foreign electronic measurement technology. – 2017. – № 36 (06). – P. 50–52.

**Н. П. Ординарцева**

## **ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ**

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

«Руководство по выражению неопределенности в измерениях» (GUM) [1] является одним из главных документов в метрологии. Его неоспоримой заслугой является установление всемирного единства в оценивании неопределённости измерений. GUM предоставляет концептуальный подход, позволяющий выполнять совместную обработку вкладов неопределенности, возникающих как из-за случайных, так и из-за систематиче-