

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А.Л. Шестаков, А.П. Лапин, Е.А. Лапина

OBJECTIVE OF OPTIMIZATION OF TRANSFORMATION FUNCTION OF MEASURING TRANSDUCERS

A.L. Shestakov, A.P. Lapin, E.A. Lapina

Разработка и создание современных датчиков давления, обладающих высоким классом точности, диктует поиск новых подходов к решению этой задачи. Появление интеллектуальных датчиков давления позволило перейти от схемотехнических решений к алгоритмическим методам коррекции погрешностей, вызванных нелинейностью функции преобразования и зависимостью измерительного преобразователя от температуры. Определяющую роль в этом играет правильный выбор функции преобразования измерительных преобразователей.

Ключевые слова: измерительные преобразователи давления, функция преобразования, интеллектуальные датчики давления.

Development and creation of modern pressure sensors with the highest class of accuracy, suppose a new approaches for solving this problem. Appearance of smart pressure sensor allow us to move from circuit solutions to algorithmic methods of correction errors generated by nonlinearity of the transformation function and the dependence of the temperature transmitter. The principal role in this is the correct choice of transformation function of measuring transducers.

Keywords: pressure transducers (sensors), transformation function, smart pressure sensors.

Введение

Для измерения давления широко используются преобразователи давления на основе тензорезисторов [1], имеющие ряд неоспоримых преимуществ перед преобразователями, реализующими другие методы преобразования давления. Однако, данным преобразователям присущи недостатки, в виде существенной нелинейности функции преобразования и значительной температурной зависимости. Повышение точности измерения связано с правильным выбором функции преобразования (ФП) измерительного преобразователя (ИП) давления.

1. Постановка задачи

Двухфакторная математическая модель (ММ) функции преобразования ИП может быть представлена в виде

$$U_p = F(P', T) + e, \quad (1)$$

где U_p - напряжение на выходе ИП; P' - подаваемое на вход ИП давление; T - температура среды, в которой находится ИП; e - различного рода неучтенные факторы (помехи). Для описания функции преобразования ИП широко используются полиномиальные модели [2]. Известно [1], что выходное напряжение ИП существенно зависит от температуры среды, в которой находится ИП. Запишем математическую модель (1) ФП ИП следующим образом:

$$U_p = \sum_{N=0}^{k_p} A_N(T) \cdot (P')^N + e, \quad (2)$$

где U_p - напряжение на выходе ИП; K_p - максимальная степень ММ ФП по давлению; P' - подаваемое на вход ИП давление; $A_0(T) \dots A_{K_p}(T)$ - коэффициенты ММ ФП как функции температуры при различных степенях входного давления P' .

Шестаков Александр Леонидович - д-р техн. наук, профессор, ректор ЮУрГУ, admin@urc.ac.ru

Лапин Андрей Павлович - канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники ЮУрГУ; a_lapin@mail.ru

Лапина Екатерина Андреевна - аспирант ЮУрГУ; a_lapm@mail.ru

Shestakov Aleksandr Leonidovich - PhD, professor, rector of SUSU; admin@urc.ac.ru

Lapin Andrey Pavlovich - PhD, associate professor of Equipment for information and measuring department of SUSU; a_lapm@mail.ru

Lapina Ekaterina Andreevna - postgraduate student of SUSU; a_lapin@mail.ru

Коэффициенты $A_0(T) \dots A_{K_p}(T)$ в формуле (2) могут быть представлены полиномами различных степеней по температуре в соответствии с выражением (3)

$$A_N(T) = \sum_{M=0}^{K_T(N)} a_{M,N} \cdot T^M, \quad (3)$$

где $K_T(N)$ - значение степени полинома, описывающего коэффициенты $A_N(T)$ из выражения (2) как функции температуры; T - значение температуры окружающей среды; $a_{0,N} \dots a_{K_T(N),N}$ - коэффициенты полинома, описывающего $A_N(T)$. Формулы (2) и (3) являются обобщенной ММ ФП измерительного преобразователя в случае двухфакторной модели.

2. Обратная функция преобразования ИП

Математическая модель функции преобразования реализуется путем градуировки [3] измерительного преобразователя. На вход преобразователя подается определенная последовательность значений образцового давления, при фиксированных температурах среды, в которой расположен ИП. Обычно [4], по результатам градуировки строится обратная ММ ФП измерительного преобразователя вида

$$P = F^{-1}(U_p(T), T) + e, \quad (4)$$

где P - рассчитанное на основе ФП измеряемое (подаваемое на вход ИП) давление; U_p - напряжение на выходе ИП; T - температура среды, в которой находится ИП; F^{-1} - обратная ФП, используемая в микропроцессорных (интеллектуальных) датчиках давления. Обратная ФП имеет следующий вид

$$P = \sum_{N=0}^{K_p} B_N(T) (U_p)^N + e, \quad (5)$$

где P - рассчитанное на основе ФП измеряемое (подаваемое на вход ИП) давление; $B_0(T) \dots B_{K_p}(T)$ - коэффициенты ФП ИП как функции температуры T при U_p ; U_p - напряжение на выходе ИП давления.

В современных (микропроцессорных) датчиках предусмотрен канал измерения температуры, имеющий на выводе напряжение, пропорциональное температуре окружающей среды. Поэтому коэффициенты $B_0(T) \dots B_{K_p}(T)$ могут быть записаны как функции температуры следующим образом

$$B_N(T) = \sum_{J=0}^{K_T(N)} \beta_{N,J} \cdot U_T^J, \quad (6)$$

где $K_T(N)$ - значение степени полиномов (коэффициентов), входящих в выражение (5), U_T - напряжение на выходе ИП давления, пропорциональное температуре окружающей среды (канал измерения температуры), $\beta_{N,0} \dots \beta_{N,K_T(N)}$ - коэф-

фициенты, описывающие полиномиальное представление $B_N(T)$.

Вид функции преобразования (5), как двухфакторной математической модели определяется параметрами K_p и K_T , и зависит от особенностей проведения градуировки, а именно числа точек по температуре и давлению. Стандартные испытания проводятся при $K_p = 6$, и $K_T = 6$, т.е. модель обратной ФП ИП может иметь вид

$$P = U_p^0 (\beta_0 + \beta_1 U_T + \beta_2 U_T^2 + \beta_3 U_T^3 + \beta_4 U_T^4 + \beta_5 U_T^5) + U_p^1 (\beta_6 + \beta_7 U_T + \beta_8 U_T^2 + \beta_9 U_T^3 + \beta_{10} U_T^4) + U_p^2 (\beta_{11} + \beta_{12} U_T + \beta_{13} U_T^2 + \beta_{14} U_T^3) + U_p^3 (\beta_{15} + \beta_{16} U_T + \beta_{17} U_T^2) + U_p^4 (\beta_{18} + \beta_{19} U_T) + U_p^5 \beta_{20}, \quad (7)$$

где $\beta_0 \dots \beta_{20}$ - коэффициенты математической модели, определенные по методу наименьших квадратов, U_p, U_T - значения напряжений на выходе ИП по давлению и температуре соответственно. При этом множество M возможных ММ обратной ФП равно

$$2^{21} = 2097152. \quad (8)$$

3. Показатель сложности модели функции преобразования

Принадлежащие множеству (8) ФП обладают различными по величине значениями метрологических характеристик (МХ): погрешности от нелинейности, температурной погрешности и других, и имеют различный уровень сложности математической модели.

Введем показатель, характеризующий степень сложности модели ФП. Используем предложенный в работе [5] показатель степени сложности модели следующего вида

$$C = K_p \cdot 10^{\max(K_p)} + \sum_{j=0}^{\max(K_T)} K_{Tj} \cdot 10^j, \quad (9)$$

где K_p, K_T - максимальные степени модели ФП по давлению и температуре соответственно. Применительно к модели (7) этот показатель принимает вид

$$C = K_p K_{T5} K_{T4} K_{T3} K_{T2} K_{T1} K_{T0}. \quad (10)$$

Наиболее сложной будет модель вида (7), имеющая в наличии все коэффициенты, с показателем сложности $C = 512345$. Наиболее простой будет модель вида $P = \beta_0 + \beta_1 \cdot U_T^1 + \beta_6 \cdot U_p^1$ с показателем сложности $C = 100001$.

4. Оптимизация индивидуальных функций преобразования измерительных преобразователей

Оптимальная (наилучшая) функция преобразования - это функция, которая при заданных ог-

раничениях на величину MX обладает наименьшим показателем сложности.

Задача выбора оптимальной (наилучшей) ФП измерительного преобразователя может быть сформулирована следующим образом: необходимо выбрать наиболее простую, в смысле выражения (10) функцию преобразования, из множества (8) обратных ФП, удовлетворяющую условиям ограниченный по допустимым значениям метрологических характеристик при градуировке и верификации, в соответствии с выражением (11)

$$F_{\text{опт}}^{-1} = \min C(F_0^{-1}; F^{-1}), \quad (11)$$

$$F^{-1} \in M, \quad \gamma \leq \gamma_{\text{НГр}} \gamma \leq \gamma_{\text{НВер}}, \quad \gamma \leq \gamma_{\text{ТГр}} \gamma \leq \gamma_{\text{ТВер}},$$

где F_0^{-1} - идеальная двухфакторная модель ФП (плоскость); $\gamma_{\text{НГр}}, \gamma_{\text{ТГр}}$ - предельно допустимые приведенные погрешности градуировки по нелинейности и температуре соответственно; $\gamma_{\text{НВер}}, \gamma_{\text{ТВер}}$ - предельно допустимые приведенные погрешности верификации по нелинейности и температуре. Полученная таким образом $F_{\text{опт}}^{-1}$ является наилучшей, согласно условий (11), моделью только для конкретного ИП, т.е. это наилучшая индивидуальная модель ФП конкретного ИП.

5. Оптимизация моделей ФП определенного конструктивного исполнения

Пусть мы исследуем партию ИП определенного конструктивного исполнения в количестве L штук. Обозначим модель ФП отдельного преобразователя этой партии как $F_{\text{опт}l}^{-1}$, где $l = 1, \dots, L$; L - количество ИП в исследуемой партии. Определим наилучшую (оптимальную) модель для ИП определенного конструктивного исполнения, например, обозначенного как G , путем выбора модели с наименьшим показателем сложности среди $F_{\text{опт}l}^{-1}$,

где $l = 1, \dots, L$ и обозначим ее как $F_{\text{опт}G}^{-1}$

$$F_{\text{опт}G}^{-1} = \min C(F_{\text{опт}l}^{-1}), \quad (12)$$

$$F_{\text{опт}G}^{-1} \in L$$

Заключение

Авторами сформулирована задача оптимизации функций преобразования ИП давления. Предложенная в работе последовательность решения задачи реализована в виде набора алгоритмов, изложенных в статье [6]. Вопросы статистического моделирования ФП измерительных преобразователей давления рассмотрены в работе [7].

Литература

1. Стучебников, В.М. Тензорезисторные преобразователи на основе гетерозонитаксиальных структур «кремний на сапфире» / В.М. Стучебников // Измерения, контроль, автоматизация. - 1982. - № 4(44). - С. 15-26.
2. Лапин, А.П. Исследование многофакторной функции преобразования датчиков давления ПП «Метран» / А.П. Лапин, Е.Е. Филиппова // Приборостроение: тематич. сб. науч. тр. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. - С 33-36.
3. РМГ 29-99 ГСП. Метрология. Основные термины. - М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2000. - С. 105.
4. Семенов, Л.А. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений / Л.А. Семенов, Т.Н. Сирая. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 128 с.
5. Данилов, Н.А. Синтез функции преобразования измерительной системы давления с заданной точностью // Вестник молодых ученых. Серия «Технические науки». - СПб., 2004. - №2.
6. Шестаков, А.Л. Алгоритмы выбора и обоснования моделей функций преобразования измерительных преобразователей давления / А.Л. Шестаков, А.П. Лапин, Е.А. Лапина // Вестник ЮУрГУ Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». - 2009 - Вып. 10. - С. 10-12.
7. Лапин, А.П. Статистическое моделирование функций преобразования датчиков давления типа «Метран» / А.П. Лапин, Ю.Н. Цыпина, Е.А. Лапина // Вестник ЮУрГУ Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». - 2008. - № 3(103). - С. 34-37

Поступила в редакцию 11 декабря 2009 г.