

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ КЛАСТЕРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

А.П. Лапин, А.И. Стрехнин

TRANSFER FUNCTIONS' MATHEMATICAL MODELS FOR CLUSTER SYSTEM OF PRESSURE TRANSMITTERS

A.P. Lapin, A.I. Strehnin

Рассматривается процедура нахождения математических моделей функций преобразования измерительных преобразователей давления, объединенных в кластеры. Предложен метод определения сложности математических моделей. Приведен пример выбора математических моделей для кластеров преобразователей давления тензорезистивного типа.

Ключевые слова: математическая модель, измерительный преобразователь, функция преобразования.

This article discusses a procedure for finding pressure measurement transmitters mathematical models which take some special features of clustered transmitters into account. Authors designed a procedure for estimation of found mathematical models complexity. Mathematical models for each cluster of tensorresistive pressure measurement transmitters were found.

Keywords: mathematical model, measurement transmitter, transfer function.

Введение

В работе [1] показана возможность объединения измерительных преобразователей (ИП) давления, обладающих близкими метрологическими характеристиками, в кластеры. Можно предположить, что в рамках одного кластера существуют математические модели функции преобразования (ФП), позволяющие получить меньшую величину приведенной погрешности ИП, чем при использовании единой модели ФП для всей партии преобразователей в целом. В статье рассматриваются вопросы нахождения моделей ФП внутри кластеров измерительных преобразователей, что позволяет увеличить метрологический запас [2] преобразователей давления по приведенной погрешности.

Постановка задачи. Современная технология производства микропроцессорных ИП давления предполагает использование единой ММ для ИП одного конструктивного исполнения [3]. Рассмотрим 2-факторную модель функции преобразования ИП давления следующего вида:

$$\begin{aligned}
 P = & p^0 (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \beta_5 t^5) + \\
 & + p^1 (\beta_6 + \beta_7 t + \beta_8 t^2 + \beta_9 t^3 + \beta_{10} t^4 + \beta_{11} t^5) + \\
 & + p^2 (\beta_{12} + \beta_{13} t + \beta_{14} t^2 + \beta_{15} t^3 + \beta_{16} t^4 + \beta_{17} t^5) + \\
 & + p^3 (\beta_{18} + \beta_{19} t + \beta_{20} t^2 + \beta_{21} t^3 + \beta_{22} t^4 + \beta_{23} t^5) + \\
 & + p^4 (\beta_{24} + \beta_{25} t + \beta_{26} t^2 + \beta_{27} t^3 + \beta_{28} t^4 + \beta_{29} t^5) + \\
 & + p^5 (\beta_{30} + \beta_{31} t + \beta_{32} t^2 + \beta_{33} t^3 + \beta_{34} t^4 + \beta_{35} t^5), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где P – рассчитанное давление; β – вещественные коэффициенты; p – нормированный код давления на выходе ИП; t – нормированный код температуры, окружающей измерительный преобразователь, среды.

Использование полной математической модели (1) на практике маловероятно вследствие того, что полная модель не обеспечит заданный класс точности ИП при проведении процедуры верификации [4].

Лапин Андрей Павлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Южно-Уральский государственный университет; a_lapin@mail.ru

Стрехнин Алексей Игоревич – магистрант кафедры «Информационно-измерительная техника», Южно-Уральский государственный университет; ctpexhnh@gmail.com

Lapin Andrei Pavlovich – PhD, associate professor of «Information and measurement technique» department of SUSU; a_lapin@mail.ru

Strehnin Aleksei Igorevich – master of «Information and measurement technique» department of SUSU; ctpexhnh@gmail.com

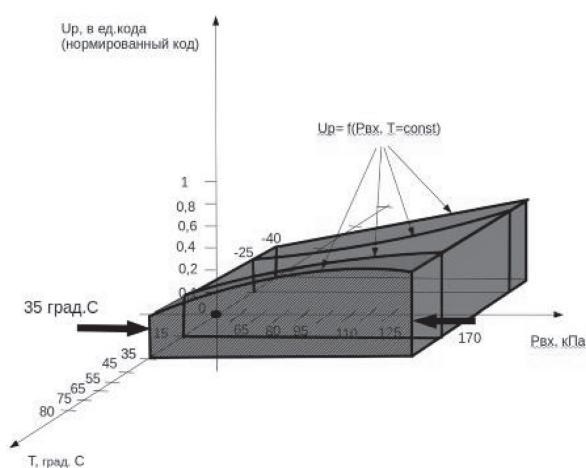
Целью данной работы является нахождение вида моделей функции преобразования для измерительных преобразователей давления, входящих в кластеры А, В и С, описанные в [1].

Для достижения поставленной цели необходимо реализовать следующие задачи:

1. Предложить метод предварительного формирования вида ММ ФП.
2. Разработать метод уточнения вида предварительно сформированной модели ФП и создать алгоритм реализации этого метода.
3. Разработать алгоритм формирования вида ММ ФП методом «исключения».
4. Применить методику оценки сложности ММ ФП.

Метод предварительного формирования вида модели ФП

Метод срезов позволяет осуществить предварительное формирование модели путем определения максимальной степени вхождения факторов температуры p и давления t в математическую модель. Суть метода заключается в «разрезании» пространственной ФП на заданном уровне одного из факторов (см. рисунок) и аппроксимации полученного «среза» полиномами последовательно возрастающих степеней. Степень аппроксимирующего полинома, обеспечивающая заданный уровень погрешности аппроксимации, признается оптимальной для данного «среза». Проводя «разрезания» пространственной ФП, получаем набор степеней факторов, на основании которых осуществляется предварительное формирование математической модели функции преобразования ИП давления.



Пример среза пространственной модели ФП по температуре

Применение метода «срезов» к ИП кластеров А, В и С [1] позволило получить приведенные ниже предварительные модели:

1. Для кластера А:

$$P = p^0 (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3) + p^1 (\beta_6 + \beta_7 t + \beta_8 t^2 + \beta_9 t^3) + p^2 (\beta_{12} + \beta_{13} t + \beta_{14} t^2 + \beta_{15} t^3) + p^3 (\beta_{18} + \beta_{19} t + \beta_{20} t^2 + \beta_{21} t^3). \quad (2)$$

2. Для кластера В:

$$P = p^0 (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3) + p^1 (\beta_6 + \beta_7 t + \beta_8 t^2 + \beta_9 \cdot t^3) + p^2 (\beta_{12} + \beta_{13} t + \beta_{14} t^2 + \beta_{15} t^3) + p^3 (\beta_{18} + \beta_{19} t + \beta_{20} t^2 + \beta_{21} t^3) + p^4 (\beta_{24} + \beta_{25} t + \beta_{26} t^2 + \beta_{27} t^3). \quad (3)$$

Для кластера С методом срезов в рамках модели (1) не найдено удовлетворительных математических моделей.

Метод уточнения вида моделей ФП

Метод всех возможных регрессий [5] позволяет уточнить математическую модель, найденную методом срезов, путем исключения из нее избыточных коэффициентов, которые ухудшают качество модели при проведении процедуры верификации.

Суть метода всех возможных регрессий заключается в переборе всех вариантов математических моделей, которые могут быть получены из слагаемых предварительно сформированной математической модели. Каждая математическая модель оценивается с точки зрения удовлетворения предельно допустимым значениям температурной, приведенной и погрешности от нелинейности. Те модели, которые удовлетворяют этим предельно допустимым значениям, признаются годными для дальнейшего исследования.

При проведении исследований методом всех возможных регрессий партии ИП [1] были приняты следующие уровни максимально допустимых погрешностей:

1) максимальная приведенная погрешность $\gamma = 0,075 \%$;

2) максимальная погрешность от нелинейности $\gamma_{нел} = 0,060 \%$;

3) максимальная температурная погрешность $\gamma_{тем} = 0,080 \%$.

Применение метода всех возможных регрессий связано с большим объемом вычислений и большим количеством моделей, удовлетворяющих приведенным выше максимально допустимым значениям погрешностей. Для обоснованного выбора одной модели из множества полученных в статье предлагается оценивать сложность найденных математических моделей и выбирать модели, имеющие низкие показатели сложности.

Оценка сложности математических моделей

Для оценки сложности математических моделей предлагается применить метод весового ранжирования коэффициентов модели [6]. Для этого коэффициенты модели (1) группируются следующим образом:

$$P = (\beta_{35}t^5p^5) + (\beta_{29}t^5p^4 + \beta_{34}t^4p^5) + (\beta_{23}t^5p^3 + \beta_{28}t^4p^4 + \beta_{33}t^3) + (\beta_{17}t^5p^2 + \beta_{22}t^4p^3 + \beta_{27}t^3p^4 + \beta_{32}t^2p^5) + (\beta_{11}t^5p^1 + \beta_{16}t^4p^2 + \beta_{21}t^3p^3 + \beta_{26}t^2p^4 + \beta_{31}tp^5) + (\beta_{10}t^4p^1 + \beta_{15}t^3p^2 + \beta_{20}t^2p^3 + \beta_{25}t^1p^4) + (\beta_9t^3p^1 + \beta_{14}t^2p^2 + \beta_{19}t^1p^3) +$$

$$+ (\beta_8t^2p^1 + \beta_{13}t^1p^2) + (\beta_7tp) + (\beta_5t^5 + \beta_4t^4 + \beta_3t^3 + \beta_2t^2 + \beta_1t^1) + (\beta_{30}p^5 + \beta_{24}p^4 + \beta_{18}p^3 + \beta_{12}p^2 + \beta_6p^1) + (\beta_0). \quad (4)$$

Показатель сложности математической модели представляется 36-разрядным двоичным числом. В определенном разряде находится 0, если данный коэффициент не присутствует в модели, и 1 – если присутствует. Самому старшему разряду соответствует коэффициент β_{35} , а самому младшему – β_0 (см. выражение (4)). Переводя полученное число в десятичное, получаем значение показателя сложности модели ФП измерительного преобразователя давления.

Достоинство данного метода состоит в том, что с его помощью можно оценить сложность всего множества частных моделей в рамках общей модели (1).

Таблица 1

Математические модели для кластера А

№ модели	Маска модели	Сложность модели	Приведенная погрешность, %		
			min	сред.	max
1	111100110100111100110000000000000000	645583	0,00005	0,00604	0,02744
2	111100111100111100110000000000000000	653775	0,00002	0,00450	0,01733
3	111100111100110100111000000000000000	883151	0,00011	0,00453	0,01622
4	111100110100111100111000000000000000	907727	0,00003	0,00583	0,02761
5	111100111100101100111000000000000000	911823	0,00002	0,00501	0,01864
6	111100111100111100111000000000000000	915919	0,00002	0,00451	0,01745
7	111100111100111000111100000000000000	8780239	0,00004	0,00452	0,01752
8	111100111100110100110100000000000000	9009615	0,00005	0,00458	0,01731
9	111100110100111100110100000000000000	9034191	0,00004	0,00604	0,02744
10	111100111100101100110100000000000000	9038287	0,00015	0,00558	0,01985
11	111100111100111100110100000000000000	9042383	0,00002	0,00451	0,01751
12	111100111000111100111100000000000000	9238991	0,00022	0,00468	0,01777
13	111100111100110100111100000000000000	9271759	0,00001	0,00452	0,01753
14	111100111100101100101100000000000000	9284047	0,00004	0,00468	0,01704
15	111100111100111100101100000000000000	9288143	0,00004	0,00467	0,01702
16	111100110100111100111100000000000000	9296335	0,00002	0,00487	0,01760
17	111100111100101100111100000000000000	9300431	0,00003	0,00468	0,01710
Максимально допустимые значения, %			0,075		

Таблица 2

Математические модели для кластера В

№ модели	Маска модели	Сложность модели	Приведенная погрешность, %		
			min	сред.	max
1	111100111100111100111100101000000000	9302363	0,00016	0,010	0,044
2	111100111100111100111100111000000000	13627739	0,00001	0,010	0,034
3	111100111100111100111000101100000000	135131483	0,00012	0,010	0,043
4	111100111100111100111100100100000000	143520091	0,00004	0,010	0,044
5	111100111100111100111100101100000000	143520091	0,00037	0,010	0,043
6	111100111100111100111100101100000000	143520095	0,00027	0,010	0,035
7	111100111100111100101100111100000000	147829087	0,00000	0,012	0,043
8	111100111100111100111100110100000000	147845467	0,00008	0,010	0,037

Метрологический запас по приведенной погрешности моделей ФП

Метрологический запас		$K_{м.з}$ (min)	$K_{м.з}$ (сред.)	$K_{м.з}$ (max)
Кластер А	Модель (5)	3,9	7,5	15,0
	Стандартная	2,1	3,2	5,0
Кластер В	Модель (6)	4,4	8,9	15,0
	Стандартная	1,5	2,0	2,5

Результаты исследований

Применение метода всех возможных регрессий позволило уточнить предварительно сформированные методом срезов математические модели функции преобразования измерительных преобразователей давления для кластеров А и В. Найденные модели и их показатели сложности представлены в табл. 1 и 2.

Для ИП кластера А предлагается использовать модель вида

$$P = p^0 (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3) + p^1 (\beta_6 + \beta_7 t + \beta_8 \cdot t^2 + \beta_9 t^3) + p^2 (\beta_{12} + \beta_{13} t + \beta_{14} t^2) + p^3 (\beta_{18} + \beta_{19} t + \beta_{20} t^2 + \beta_{21} t^3). \quad (5)$$

Для ИП кластера В предлагается использовать модель вида

$$P = p^0 (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3) + p^1 (\beta_6 + \beta_7 t + \beta_8 t^2 + \beta_9 t^3) + p^2 (\beta_{12} + \beta_{13} t + \beta_{14} t^2 + \beta_{15} t^3) + p^3 (\beta_{18} + \beta_{19} t + \beta_{20} t^2 + \beta_{21} t^3) + p^4 (\beta_{24} + \beta_{25} t + \beta_{26} t^2). \quad (6)$$

Минимальное, среднее и максимальное значения метрологического запаса по приведенной погрешности для моделей (5) и (6) в сравнении со стандартной моделью, применяемой в настоящее время, показаны в табл. 3.

Под метрологическим запасом нами понималось следующее выражение

$$K_{м.з} = 0,075/\gamma, \quad (7)$$

где 0,075 – максимально допустимая приведенная погрешность для исследованных преобразователей давления, %; γ – максимальная приведенная погрешность для конкретного измерительного преобразователя найденная по результатам испытаний ИП, %.

Заключение

Предлагаемая поэтапная процедура формирования математической модели функции преобразования для ИП кластеров А и В позволяет увеличить метрологический запас измерительных преобразователей по приведенной погрешности за счет учета индивидуальных особенностей кластеров.

Найденные математические модели (5) и (6) позволяют увеличить средний метрологический запас по приведенной погрешности для кластера А в 2,3 раза, а для кластера В – в 4,5 раза по сравнению со средним запасом, обеспечиваемым на современном этапе производства, что может способствовать увеличению межповерочного интервала измерительных преобразователей давления.

Литература

1. Лапин, А.П. Нечеткая кластеризация измерительных преобразователей давления / А.П. Лапин, А.И. Стрехнин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 14. – № 23(240). – С. 15–18.
2. Taymanov, R. Intelligent measuring instruments. Maximum reliability of measuring information, minimum metrological maintenance / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // Proceedings of XVII IMEKO World Congress. Dubrovnik, Croatia, 2003. – P. 1094–1097.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики: справ. / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
4. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Верификация>
5. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. Ю.П. Адлера и В.Г. Горского. – М.: Финансы и статистика, 1986. – Кн. 2. – 351 с.
6. Шестаков, А.Л. Оценка сложности моделей функции преобразования датчика давления / А.Л. Шестаков, А.П. Лапин, Е.А. Лапина // Вестник ЮУрГУ, Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 13. – № 2(219). – С. 4–8.

Поступила в редакцию 30 октября 2011 г.