

УДК 681.586.78

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗИЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ФУНКЦИЯМИ ГАУССА С РАЗНОСТНЫМ АРГУМЕНТОМ

© 2012 В.С. Тиньгаев¹, С.А. Матюнин², В.А. Медников², В.Г. Мадриченко²

¹ ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 23.03.2012

В статье рассматривается аппроксимация позиционной характеристики первичных преобразователей с помощью модифицированной функции Гаусса. Приведены сравнительные результаты оптимизации коэффициентов четырёх разновидностей аппроксимирующей функции для трёх критериев оптимизации.

Ключевые слова: математическая модель, преобразователи линейных перемещений, индуктивный датчик, позиционная характеристика

Преобразователи линейных перемещений (ПЛП) являются одним из важных измерительных элементов высокоточных систем управления и контроля, особенно в авиационной и ракетно-космической технике. Разработкой и выпуском точных и компактных преобразователей перемещения занимаются достаточно многие фирмы, но только очень немногие из них могут выпускать преобразователи для жестких условий эксплуатации (Heiden-hain, Германия; Sony и Mitutoyo, Япония; Harley Precision Instrument, США и некоторые др.). В связи с работами по модернизации и созданию новых типов ракетных, авиационных и наземных боевых комплексов вызывает необходимость в расширении исследований по созданию первичных преобразователей с высокими стабильными метрологическими показателями, в том числе устойчивыми к особо жестким внешним дестабилизирующим факторам: виброударным воздействиям, глубоким перепадам температуры вплоть до криогенных температур.

Для отработки конструкции преобразователей перемещений их оптимизации необходима математическая модель, которая могла бы аппроксимировать экспериментальные данные по возможности более точно с использованием небольшого количества коэффициентов, характеризующих модель. Анализ характера

экспериментально полученных позиционных характеристик U_j показал, что следующие функции имеют вид, характерный для позиционных характеристик индуктивных преобразователей перемещения (ИПП):

$$Y1(x) = a + b \cdot (x_0 - x) \cdot e^{-c \cdot (x_0 - x)^2} \quad (1)$$

$$Y2(x) = a + b \cdot (x_0 - x) \cdot e^{-c \cdot |x_0 - x|} \quad (2)$$

$$Y3(x) = a + b \cdot (x_0 - x) \cdot e^{-c \cdot |x_0 - x|^z} \quad (3)$$

$$Y4(x) = a + b \cdot \sin g(x_0 - x) \cdot |x_0 - x|^n \cdot e^{-c \cdot |x_0 - x|^z} \quad (4)$$

В качестве критериев оптимизации при поиске неизвестных коэффициентов a, b, c, x_0, n, z функций (1)-(4) были выбраны минимальные значения среднеквадратического отклонения W^{CKO} , среднемодульного отклонения W^{CMO} и наибольшего отклонения W^{MMO} во всем диапазоне перемещений X подвижного (элемента) ИПП:

$$W1(a, b, c, x_0, z, n) = \sqrt{\frac{1}{Nn-1} \sum_{j=0}^{Nn-1} (U_j - Y1(a, x_j, b, c, x_0, z, n))^2} \quad (5)$$

$$W2(a, b, c, x_0, z, n) = \frac{1}{Nn-1} \sum_{j=0}^{Nn-1} |U_j - Y1(a, x_j, b, c, x_0, z, n)| \quad (6)$$

$$W3(a, b, c, x_0, z, n) = \text{Max}(U_j - Y(x_j)) \quad (7)$$

Тиньгаев Владимир Сергеевич, начальник сектора отдела 1507. E-mail: tingaev@inbox.ru
Матюнин Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные системы и устройства». E-mail: mitrea.sgau@rambler.ru
Медников Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные системы и устройства». E-mail: wamednikov@gmail.com
Мадриченко Вениамин Геннадьевич, аспирант. E-mail: veniamines@gmail.com

где N_p – количество экспериментальных точек.

Коэффициенты a, b, c, x_0, z, n можно найти минимизируя функцию погрешности W , используя компьютерный математический пакет Mathcad компании MathSoft [2] с помощью функции:

$$\text{Minimize}(W, a, b, c, x_0, z, n) \quad (8)$$

В таблице 1 даны результаты расчетов оптимальных коэффициентов a, b, c, x_0, z, n обеспечивающих минимальные погрешности аппроксимации функций $Y1(x), Y2(x), Y3(x), Y4(x)$ для каждого критерия $W^{CKO}, W^{CMO}, W^{MMO}$. На рис. 1 графически представлена аппроксимирующая функция $Y1(x)$ оптимизации по среднеквадратическому отклонению W^{CKO} и исходный набор данных $U_j(x_j)$.

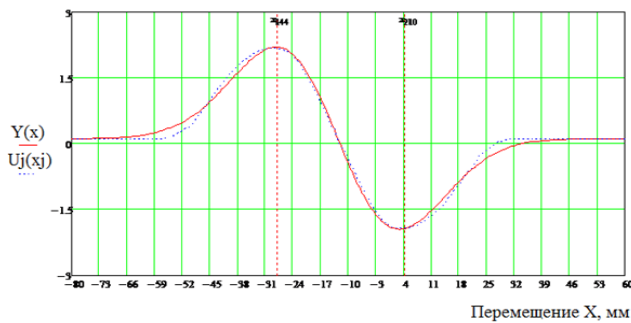


Рис. 1. Позиционные характеристики экспериментальной U_j и аппроксимирующей функции $Y1(x)$

Относительные погрешности среднеквадратического отклонения γ_{1CKO} , средне модульное отклонение γ_{1CMO} и наибольшего отклонения γ_{1MMO} для всего диапазона аппроксимации для функции $Y1(x)$ (формула 1), оптимизированных на минимум среднеквадратического отклонения определяются как:

$$\gamma_{1CKO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{CKO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 2,01\% \quad (9)$$

$$\gamma_{1CMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{CMO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 1,32\% \quad (10)$$

$$\gamma_{1MMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{MMO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 5,2\% \quad (11)$$

Относительные погрешности среднеквадратического отклонения γ_{1CKO} , средне модульное отклонение γ_{1CMO} и наибольшего отклонения γ_{1MMO} для всего диапазона аппроксимации для функции $Y1(x)$ (формула 1), оптимизированных на минимум среднеквадратического отклонения определяются как:

$$\gamma_{1CKO}^{CMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{CKO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 2,1\% \quad (12)$$

$$\gamma_{1CKO}^{CMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{CKO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 1,24\% \quad (13)$$

$$\gamma_{1MMO}^{CMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{MMO}^{CMO}(a, b, c, x_0) = 6,14\% \quad (14)$$

Относительные погрешности среднеквадратического отклонения γ_{1CKO} , средне модульное отклонение γ_{1CMO} и наибольшего отклонения γ_{1MMO} для всего диапазона аппроксимации для функции $Y1(x)$ (формула 1), оптимизированных на минимум максимального отклонения определяются как:

$$\gamma_{1CKO}^{MMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{CKO}^{MMO}(a, b, c, x_0) = 2,16\% \quad (15)$$

$$\gamma_{1CMO}^{MMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{CMO}^{MMO}(a, b, c, x_0) = 1,38\% \quad (16)$$

$$\gamma_{1MMO}^{MMO} = \frac{100}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot W1_{MMO}^{MMO}(a, b, c, x_0) = 5,01\% \quad (17)$$

Аналогично была проведена оптимизация функций $Y2(x), Y3(x), Y4(x)$, результаты помещены в сводную таблицу 1. Распределение погрешности ϵ_j аппроксимации функцией $Y1(x)$ в каждой j -той экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$\epsilon_j = \frac{U_j - Y1(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\% \quad (18)$$

и представлена графически на рис. 2 ϵ_{1j} – при минимизации среднеквадратического отклонения; ϵ_{2j} – при минимизации среднеквадратического отклонения; ϵ_{3j} – при минимизации максимального отклонения.

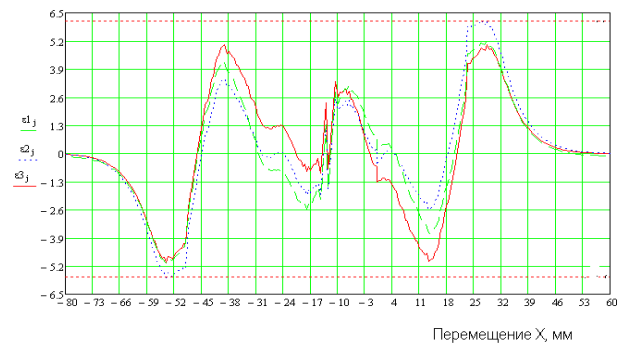


Рис. 2. Относительная погрешность аппроксимирующей функции $Y1(x)$

Распределение погрешности ϵ_j аппроксимации функцией $Y2(x)$ в каждой j -той экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$\varepsilon_j = \frac{U_j - Y2(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\% \quad (19)$$

и представлена графически на рис. 3 ε_{1j} – при минимизации среднеквадратичного отклонения; ε_{2j} – при минимизации среднемодульного отклонения; ε_{3j} – при минимизации максимального отклонения.

На рис. 2, 3 показаны относительные погрешности аппроксимирующих функций $Y1(x)$, $Y2(x)$, из которых видно, что по краям экспериментальной характеристики погрешность аппроксимации максимальная, а в центральной области погрешность аппроксимации минимальная.

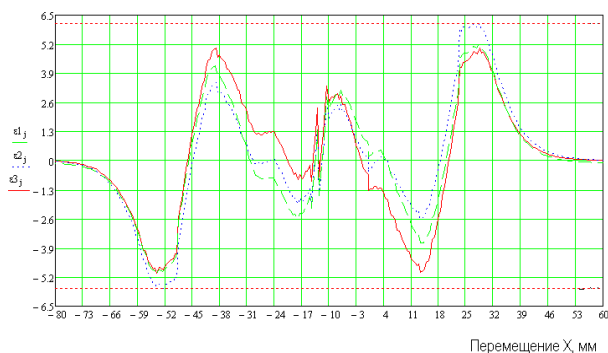


Рис. 3. Обобщенная погрешность аппроксимирующей функции $Y2(x)$

Распределение погрешности ε_j аппроксимации функцией $Y3(x)$ в каждой j -той экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$\varepsilon_j = \frac{U_j - Y3(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\% \quad (20)$$

и представлена графически на рис. 4 ε_{1j} – при минимизации среднеквадратичного отклонения; ε_{2j} – при минимизации среднемодульного отклонения; ε_{3j} – при минимизации максимального отклонения.

Распределение погрешности ε_j аппроксимации функцией $Y4(x)$ в каждой j -той экспериментальной точке вычислялось по формуле:

$$\varepsilon_j = \frac{U_j - Y4(x_j, a, b, c, x_0)}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\% \quad (21)$$

и представлена графически на рис. 5 ε_{1j} – при минимизации среднеквадратичного отклонения; ε_{2j} – при минимизации среднемодульного отклонения; ε_{3j} – при минимизации максимального отклонения.

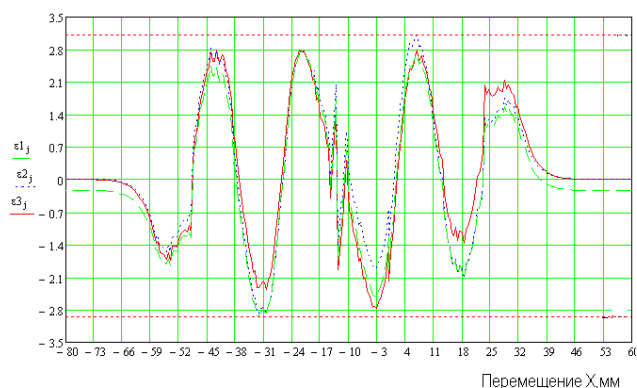


Рис. 4. Обобщенная погрешность аппроксимирующей функции $Y3(x)$

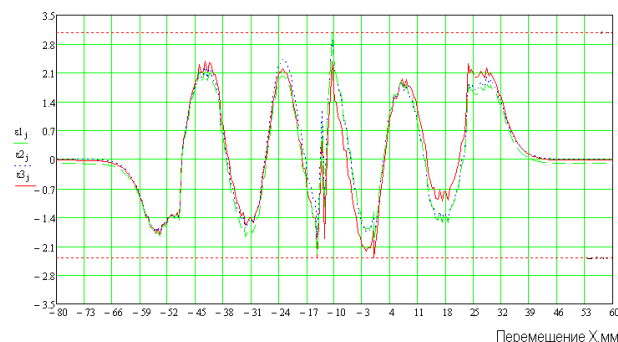


Рис. 5. Обобщенная погрешность аппроксимирующей функции $Y4(x)$

На рис. 4, 5 показаны относительные погрешности аппроксимирующих функций $Y3(x)$, $Y4(x)$, на которых видно, что по краям экспериментальной характеристики погрешность аппроксимации и в центральной области погрешность аппроксимации минимальные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Тиньгаев, В.С.* Аппроксимация характеристик индуктивных датчиков линейных перемещений с помощью модифицированной функции Гаусса с разностным аргументом первого порядка / *В.С. Тиньгаев, С.А. Матюнин, В.А. Медников* // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. №7 (31). С. 77-81.
2. *Кирьянов, Д.В.* Самоучитель Mathcad 11. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.
3. *Карпов, В.И.* Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. 207 с.
4. *Аш, Ж.* Датчики измерительных систем. Кн. 1. – М.: Мир, 1992. 480 с.
5. *Фрайден, Дж.* Современные датчики. Справочник. – М.: Технофера, 2005. 592 с.
6. *Vaumer* (Швейцария). Индуктивные датчики с пропорциональным (аналоговым) выходом <http://www.promsystem.ru/catalog>
7. *Vaumer* (Швейцария). Магнитные датчики, датчики линейных перемещений <http://www.promsystem.ru/catalog>

Таблица 1. Оптимизация и оценка погрешности W_1, W_2, W_3 аппроксимируемыми функциями $Y_1(x), Y_2(x), Y_3(x), Y_4(x)$

Параметр	Относительная погрешность для функций $Y_1(x), Y_2(x), Y_3(x), Y_4(x)$											
	средне квадратическая, %.				средне модульная, %.				максимальная, %.			
оптимизация погрешности	$Y_1(x)$		$Y_2(x)$		$Y_1(x)$		$Y_2(x)$		$Y_1(x)$		$Y_2(x)$	
	2,01		2,01		1,32		1,32		5,2		5,2	
средне квадратического отклонения (СКО)	$Y_3(x)$		$Y_4(x)$		$Y_3(x)$		$Y_4(x)$		$Y_3(x)$		$Y_4(x)$	
	1,19		0,96		0,87		0,66		2,94		3,07	
средне модульного отклонения (СМО)	$Y_1(x)$		$Y_2(x)$		$Y_1(x)$		$Y_2(x)$		$Y_1(x)$		$Y_2(x)$	
	2,09		2,09		1,24		1,24		6,14		6,14	
минимизация максимального отклонения, (ММО)	$Y_3(x)$		$Y_4(x)$		$Y_3(x)$		$Y_4(x)$		$Y_3(x)$		$Y_4(x)$	
	1,19		0,97		0,75		0,62		3,12		3,08	
минимизация максимального отклонения, (ММО)	$Y_1(x)$		$Y_2(x)$		$Y_1(x)$		$Y_2(x)$		$Y_1(x)$		$Y_2(x)$	
	2,16		2,16		1,38		1,39		5,0		5,02	
минимизация максимального отклонения, (ММО)	$Y_3(x)$		$Y_4(x)$		$Y_3(x)$		$Y_4(x)$		$Y_3(x)$		$Y_4(x)$	
	1,19		0,99		0,76		0,63		2,78		2,38	
Коэффициенты аппроксимирующих функций												
оптимизация погрешности	a		b		c		x_0		z		n	
средне квадратического отклонения (СКО)	0,12	0,12	0,21	0,22	$2,03x \cdot 10^{-3}$	$2,04x \cdot 10^{-3}$	-12,59	-12,59	---	---	---	---
	0,13	0,12	0,17	0,24	$1,04x \cdot 10^{-4}$	$5,36x \cdot 10^{-5}$	-12,61	-12,61	2,8	2,9	---	0,85
средне модульного отклонения (СМО)	0,12	0,12	0,21	0,21	$1,96x \cdot 10^{-3}$	$1,96x \cdot 10^{-3}$	-12,56	-12,56	---	---	--	---
	0,12	0,12	0,17	0,24	$1,08x \cdot 10^{-4}$	$5,66x \cdot 10^{-5}$	-12,62	-12,63	2,8	2,9	--	0,86
минимизация максимального отклонения, (ММО)	0,12	0,12	0,21	0,21	$2,03x \cdot 10^{-3}$	$2,04x \cdot 10^{-3}$	-12,75	-12,74	---	---	--	---
	0,12	0,12	0,17	0,23	$1,15x \cdot 10^{-4}$	$5,91x \cdot 10^{-5}$	-12,5	-12,5	2,8	2,9	--	0,87

MODELING THE POSITIONAL CHARACTERISTICS OF INDUCTIVE LINEAR DISPLACEMENT SENSORS BY MODIFIED GAUSSIAN FUNCTIONS WITH DIFFERENT ARGUMENT

© 2012 V.S. Tingayev¹, S.A. Matyunin², V.A. Mednikov², V.G. Madrichenko²

¹ Federal State Unitary Enterprise State Scientific Production Rocker Space Centre "TsSKB-Progress"

² Samara State Aerospace university named after acad. S.P. Korolyov (National Research University)

In article approximation of positional characteristic of primary sensors by means of the modified Gaussian functions is considered. Comparative results of factors optimization of four versions of approximating function for three criteria of optimization are given.

Key words: *mathematical model, linear displacement sensors, inductive sensor, positional characteristic*

Vladimir Tingaev, Chief of the 1507 Sector. E-mail: tingaev@inbox.ru
Sergey Matyunin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Electronic Systems and Devices". E-mail: mitrea.sgau@rambler.ru
Valeriy Mednikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Electronic Systems and Devices". E-mail: wamednikov@gmail.com
Veniamin Madrichenko, Post-graduate Student. E-mail: veniamines@gmail.com