

## Оптимизация вихретоковых преобразователей

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»*

**Постановка проблемы.** На современном уровне развития науки и техники вихретоковые преобразователи, которые используются для определения толщины диэлектрических покрытий на металлических поверхностях изделий, должны удовлетворять требованиям точности, чувствительности, технологичности, иметь малые массогабаритные характеристики, низкое энергопотребление и стоимость. Поэтому проблема улучшения этих показателей является актуальной.

**Анализ последних достижений и публикаций.** На кафедре авиационных приборов и измерений Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» разработаны устройства для измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических поверхностях изделий, основанные на использовании вихретоковых преобразователей [1-4]. Однако оптимизация указанных устройств не была проведена.

**Цель статьи.** Для повышения технико-экономических показателей таких преобразователей необходимо решить следующие задачи:

- получить математические модели устройств;
- используя математические модели, вычислить рациональные конструктивные параметры преобразователей;
- реализовав устройство с рациональными параметрами, определить степень совпадения его показателей качества с показателями, рассчитанными по математическим моделям.

**Основные материалы исследования.** Для решения этих задач был выбран наиболее перспективный вихретоковый преобразователь [4]. Его оптимизацию осуществляли с привлечением методов планирования эксперимента. В качестве критерия оптимизации была выбрана масса  $m$  преобразователя в граммах. Ограничивающими параметрами являлись: погрешность измерения  $\Delta$ , %; чувствительность  $S$ , мВ/мм; энергопотребление  $P$ , мВт; максимальный предел измерения  $H_{\max}$ , мм.

Факторами, влияющими на эти показатели, были выбраны:  $X_1$  – диаметр  $d$  сердечника, мм;  $X_2$  – высота  $h$  сердечника, мм;  $X_3$  – количество витков  $W$ ;  $X_4$  – частота  $f$  питающего напряжения, Гц.

Следующими этапами оптимизации являются: реализация полного факторного эксперимента; построение математических моделей, устанавливающих зависимость критерия оптимизации и ограничений от воздействующих факторов; поиск рациональных конструктивных параметров преобразователя; проверка их значений на опытном образце устройства.

Для реализации полного факторного эксперимента были выбраны уровни и интервалы варьирования по каждому из факторов (табл.1).

Синтез матрицы планирования (табл.2) и обработка результатов эксперимента осуществлялись с использованием пакета прикладных программ по автоматизации планирования эксперимента [5].

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования, $\Delta X_i$	Размерность
	-	0	+		
$X_1(d)$	3	4,5	6	1,5	мм
$X_2(h)$	14	19,5	25	5,5	мм
$X_3(W)$	150	225	300	75	
$X_4(f)$	300	500	700	200	Гц

Таблица 2. Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$\Delta$	S	P	m	$H_{max}$
1	-	-	-	-	1,75	50	455	0,66	0,8
2	+	-	-	-	11,11	150	427	2,03	1,6
3	-	+	-	-	7,01	50	452,5	0,99	2,9
4	+	+	-	-	6,43	50	416	3,49	4,2
5	-	-	+	-	4,09	50	404	0,82	1,6
6	+	-	+	-	17,54	150	360	2,32	2
7	-	+	+	-	7,01	40	402,5	1,14	1,4
8	+	+	+	-	1,16	200	361	3,74	4,5
9	-	-	-	+	7,6	50	448,5	0,66	0,8
10	+	-	-	+	8,77	50	424	2,03	1,3
11	-	+	-	+	7,01	50	443	0,99	2
12	+	+	-	+	28,07	50	403	3,49	3,5
13	-	-	+	+	30,99	170	385,5	0,82	1,7
14	+	-	+	+	17,54	150	338,5	2,32	1,8
15	-	+	+	+	9,35	20	380,5	1,14	2,1
16	+	+	+	+	11,69	150	333	3,74	4,3

При обработке результатов экспериментального исследования получены в преобразованных переменных математические модели вида

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^4 b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,l=1 \\ i < j < l}}^4 b_{ijl} x_i x_j x_l + b_{ijlm} x_i x_j x_l x_m,$$

где  $y$  – показатель качества;  $b_0, b_i, b_{ij}; b_{ijl}; b_{ijlm}$  – коэффициенты неполной квадратичной модели;  $x_i, x_j, x_l, x_m$  – факторы, влияющие на показатель качества.

Значения коэффициентов математических моделей для всех пяти показателей приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов математических моделей для показателей качества

Обозначения коэффициентов	Показатели качества				
	$\Delta$	S	P	m	$H_{\max}$
$b_0$	11,070	89,375	402,125	1,899	2,281
$b_1$	1,719	29,375	-19,313	0,996	0,619
$b_2$	-1,354	-13,125	-3,188	0,441	0,831
$b_3$	1,351	26,875	-31,500	0,106	0,144
$b_4$	4,058	-3,125	-7,625	0,000	-0,094
$b_{12}$	0,403	6,875	-1,375	0,279	0,394
$b_{13}$	-2,158	16,875	-3,188	-	0,106
$b_{14}$	-0,329	-15,625	-0,563	0,000	-0,081
$b_{23}$	-3,765	-	1,813	-	-0,181
$b_{24}$	0,256	-5,625	-1,438	0,000	-0,043
$b_{34}$	0,914	9,375	-3,625	0,000	0,144
$b_{123}$	-0,841	19,375	1,625	-	0,206
$b_{124}$	4,058	11,875	-0,625	0,000	-
$b_{134}$	-2,010	-3,125	-0,563	0,000	-0,069
$b_{234}$	-2,010	-18,125	-	0,000	0,119
$b_{1234}$	0,329	-	-	0,000	-0,069

Примечание. Незначимые коэффициенты обозначены «-».

Для критерия оптимизации  $m$  математическая модель в натуральных значениях факторов имеет следующий вид:

$$m = -0,0083 + 0,0053d - 0,0718h + 0,0014W + 0,0338dh.$$

В результате оптимизации по методу наискорейшего спуска (табл.4) получены следующие рациональные значения конструктивных параметров:

$$d = 3,0 \text{ мм}; h = 16,7 \text{ мм}; W = 217 \text{ витков}; f = 180 \text{ Гц}.$$

При этом значение  $X_4(f)$  определено по математической модели  $\Delta = F(X_1, X_2, X_3, X_4)$  для  $X_1 = -1$ ,  $X_2 = -0,51$ ,  $X_3 = -0,11$ , которые соответствуют натуральным значениям факторов  $d = 3,0 \text{ мм}$ ;  $h = 16,7 \text{ мм}$ ;  $W = 217$ . В этом случае для погрешности  $\Delta = 0,3\%$   $X_4 = -1,6$  или  $f = 180 \text{ Гц}$ .

Ограничения S, P,  $H_{\max}$  для этих значений факторов определены по соответствующим математическим моделям, коэффициенты которых представлены в табл.3.

При экспериментальном исследовании опытного образца с рациональными конструктивными параметрами ( $d = 3,0 \text{ мм}$ ;  $h = 16,7 \text{ мм}$ ;  $W = 217$ ;  $f = 180 \text{ Гц}$ ) получены такие выходные характеристики:

$$m = 0,84 \text{ г}; \Delta = 0,29\%; S = 50 \text{ мВ/мм}; P = 375,5 \text{ мВт}; H_{\max} = 1,5 \text{ мм}.$$

Таким образом, показатели качества опытного образца вихретокового преобразователя с рациональными конструктивными параметрами с достаточной точностью совпадают с показателями, которые определены при оптимизации устройства по математическим моделям.

Таблица 4. Результаты оптимизации по методу наискорейшего спуска

Последовательность этапов крутого спуска	Факторы			Параметр оптимизации	Ограничения				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$		$m$	$\Delta$	$S$	$P$	$H_{\max}$
Коэффициенты уравнения $b_i$	0,996	0,441	0,106						
Произведение $b_i \Delta X_i$	1,494	2,426	7,95						
Округленный шаг	1,5	2,4	8,0						
Шаг, уменьшенный в 2 раза	0,75	1,4	4,0						
Натуральное значение факторов	$d$	$h$	$W$						
Опыты	1	3,75	18,1	221	1,32	0,3	38	397	1,42
	2	3,00	16,7	217	0,81				
	3	2,25	15,3	213	0,37				
	4	1,50	13,9	209	-0,41				

**Выводы.** В результате оптимизации вихретоковых преобразователей с использованием математических моделей определены их рациональные конструктивные параметры. Экспериментальные исследования опытного образца с такими параметрами подтвердили адекватность математических моделей и правильность решения оптимизационной задачи.

#### Список литературы

1. Пат. №53334 А Україна, МКІ<sup>7</sup> G01M 3/40. Накладний електромагнітний перетворювач / М.Д. Кошовий, М.В. Цеховський, В.О. Гаєвий (Україна). - №2002043566; Заявл. 29.04.2002; Опубл.15.01.2003, Бюл.№1. – 2с.
2. Пат.№54064 А Україна, МКІ<sup>7</sup> G01M 3/40. Пристрій для вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих виробках / М.Д. Кошовий, М.В.Цеховський, В.О. Гаєвий (Україна).- №2002043570; Заявл. 29.04.2002; Опубл. 17.02.2003, Бюл. №2. – 3с.
3. Пат №60137 А Україна, МКІ<sup>7</sup> G01M 3/40. Пристрій для вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих виробках / М.Д. Кошовий, М.В.Цеховський, В.О. Гаєвий (Україна).- №2003020975; Заявл. 04.02.2003; Опубл. 15.09.2003, Бюл. №9.- 2с.
4. Пат. №75684 Україна, МПК (2006) G01B 7/02. Вихрострумний перетворювач / М.В. Цеховський, М.Д. Кошовий, В.О. Гаєвий (Україна). №2004021056; Заявл. 13.02.2004; Опубл. 15.05.2006, Бюл.№5. – 2с.
5. Кошевой Н.Д. Разработка программного обеспечения по автоматизации планирования эксперимента // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского за 1977 г. - Харьков, 1998, - С.242-244.