

МОДЕЛЬ ТОПОГРАФИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НАКЛАДНОГО ДАТЧИКА УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Ланкин М.В.¹, Кучер А.И.¹

¹ФГБОУ ВПО «Южно-Российский Государственный Политехнический Университет (НПИ) имени М.И. Платова», Новочеркасск, Россия (346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), e-mail: artiom.kucher@gmail.com

Построена 3D конечно-элементная модель накладного датчика устройства экспресс-контроля изделий из листовой электротехнической стали с каналом измерения напряженности магнитного поля. Моделирование выполнено при помощи программы ANSYS Maxwell. Модель описывает четверть дифференциального магнитного моста с целью уменьшения размерности модели и времени расчета. Толщина листа стали 0,8 мм. Измерения проведены при различных значениях тока в намагничивающей обмотке. По полученной модели, экспериментально методом планирования эксперимента, рассчитаны параметры уравнения регрессии второго порядка. Применен ортогональный центральный композиционный план для построения топографии магнитного поля накладного датчика устройства в окрестности испытуемого образца. Модель описывает топографию магнитного поля при $x \in [0; 3]$ мм и $I \in [100; 500]$ ампервитков

Ключевые слова: топография магнитного поля, испытание листовой электротехнической стали

TOPOGRAPHY MODEL FOR MAGNETIC FIELD OF OVERHEAD SENSOR OF DEVICE FOR EXPRESS-CONTROL OF ELECTRICAL STEEL

Lankin M.V.¹, Kucher A.I.¹

¹ South-Russia State Polytechnic University (NPI) n.a. M.I. Platov, Novocherkassk, Russia (346428, Novocherkassk, Prosveshenia str., 132), e-mail: artiom.kucher@gmail.com

Built 3D finite element model of a patch sensor device express control of products from electrical steel sheet with a channel to measure the magnetic field. Simulations performed using the program ANSYS Maxwell. The model describes a quarter of a differential magnetic bridge to reduce the dimension of the model and calculation time. Steel sheet thickness of 0.8 mm. The measurements were performed at different values of the current in the field winding. According to the resulting model, the experimental method of experiment planning, calculated parameters of the regression equation of the second order. Applied orthogonal central composite design for the construction of the topography of the magnetic field on sensor device in the vicinity of the test specimen. The model describes the topography of the magnetic field at $x \in [0, 3]$ mm and $I \in [100, 500]$ ampere-turns

Keywords: topography of magnetic field, testing of electrical steel

При производстве деталей и изделий из листовой электротехнической стали необходимо уделять особое внимание контролю магнитных характеристик материала, так как эти характеристики зависят от способа обработки. Помимо этого, необходимость такого контроля обусловлена получением готовой продукции (например электродвигателей) с заданными эксплуатационными параметрами. Промежуточный контроль магнитных характеристик (в частности $B(H)$ -характеристики) стали и изделий на ее основе делает технологический процесс гибким и минимизирует процент брака готовых электротехнических изделий.

Известно устройство [3]. Данное устройство позволяет получить вебер-амперную и $B(H)$ -характеристику участка детали из листовой электротехнической стали. Напряженность магнитного поля в образце определяется косвенным образом по формуле:

$$H = \frac{I \cdot W}{\Delta},$$

где I – ток, протекающей в намагничивающей обмотке; W – число витков намагничивающей катушки; Δ – величина воздушного зазора, в который помещен образец.

Величина Δ не постоянна, так как после входа в насыщение образца фактическое значение зазора возрастает за счет насыщения сердечника намагничивающей системы в районе контакта с образцом. Из-за этого возникает погрешность измерения напряженности магнитного поля на поверхности листа электротехнической стали. Для компенсации данной погрешности предлагается ввести канал измерения напряженности на поверхности испытуемой детали, представляющий собой линейку из n -датчиков Холла, расположенных на некоторых расстояниях $x_1...x_n$ от листа электротехнической стали. Для определения числа датчиков и их местоположения необходимо построить модель топографии магнитного поля накладного датчика в окрестности испытуемого образца[2].

Для проведения измерений была построена модель накладного датчика. Моделирование выполнено при помощи программы ANSYS Maxwell. ANSYS Maxwell – высокопроизводительное интерактивное программное обеспечение, которое использует конечно-элементный анализ для решения электрических, магнитостатических задач, переходных задач и задач вихревых токов.

Трехмерная конечно-элементная модель представлена на рисунке 1, где 1 – испытуемый образец; 2 – магнитопровод; 3 – намагничивающие катушки. Отметим, что используя две плоскости симметрии, моделируется 1/4 датчика с целью уменьшения размерности модели и уменьшения времени расчета. Используя плоскость симметрии, моделируется 1/4 дифференциального магнитного моста с целью уменьшения размерности модели и времени расчета.

Измерения проводились вдоль оси Oz на отрезке $[0,10]$ мм. Толщина листа стали 0,8 мм. Измерения проведены при различных значениях тока в намагничивающей обмотке. Результаты измерения представлены на рисунке 2.

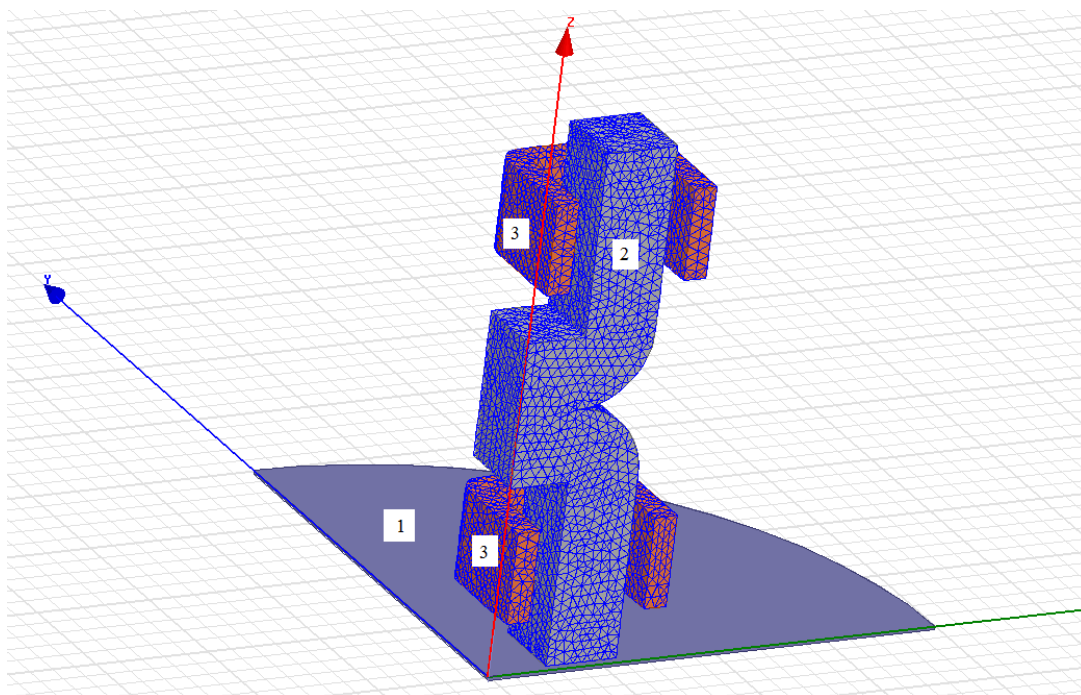


Рис. 1. Конечно-элементная модель накладного датчика

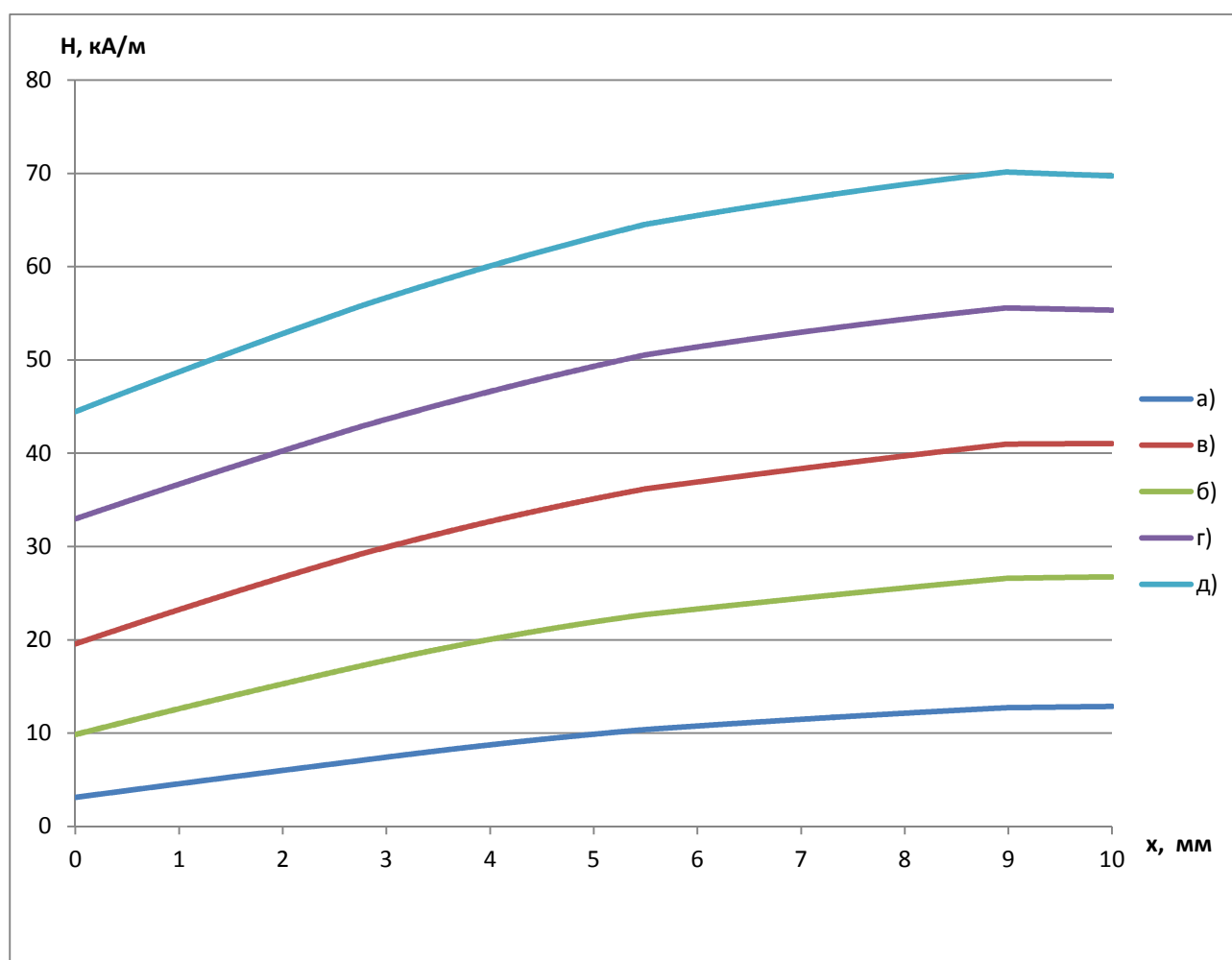


Рис. 2. Результаты измерения при различном числе ампер-витков: а) 200; б) 400; в) 600; г) 800; д) 1000.

Как видно из рисунка 2, зависимость значения напряженности магнитного поля от расстояния до испытуемого образца носит линейный характер, однако с увеличением значения тока в намагничивающей обмотке увеличивается угол наклона характеристики, поэтому сложно говорить о линейности зависимости $H = f(x, I)$.

Выполним построение математической модели топографии магнитного поля вблизи испытуемого образца методом планирования эксперимента [5]. Задача в данном случае состоит в том, чтобы экспериментальным путем установить зависимость $H = f(x, I)$. Здесь H – отклик, а x, I – факторы. Измерения проводились в среде *ANSYS Maxwell*.

Необходимо выбрать регрессионную модель объекта исследования. Выбрать модель – значит выбрать вид этой функции, записать её уравнение. Тогда остается спланировать и провести эксперимент для оценки численных значений констант (коэффициентов) этого уравнения. Полиномиальная модель в общем виде определяется выражением:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j,$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – оценки значений коэффициентов уравнения, x_i, x_j – факторы, y – отклик, k – количество факторов.

Необходимо получить регрессионную модель второго порядка. Для построения модели второго порядка используем ОЦКП – ортогональный центральный композиционный план [5].

Зададимся центром плана для всех факторов исходя из априорной информации.

$$x = 1,5 \text{ мм}; I = 3 \text{ А};$$

Теперь зададимся интервалами варьирования для факторов:

$$h_1 = 1,5 \text{ мм}; h_2 = 2 \text{ А};$$

Произведем кодирование факторов по формуле:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{h_i}; i = 1, 2, \dots, n.$$

Для анализа полученных результатов и проверки адекватности модели необходимо задаться числом повторных опытов $m = 3$. Зададимся погрешностью расчета значения погрешности 1%. Матрица планирования эксперимента приведена в таблице.

Обработка полученных результатов произведена посредством программного средства Statistica 6.0 [4].

Для проверки гипотезы об адекватности полученной модели используется F -критерий Фишера [1] и определяется следующей формулой:

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X1	x1, мм	X2	I, Ав	H, кА/м
1	2	3	4	5	6
1	+	3	+	500	23.71
2	+	3	+	500	23.71
3	+	3	+	500	23.71
4	-	0	+	500	14.52
5	-	0	+	500	14.52
6	-	0	+	500	14.52
7	+	3	-	100	3.40
8	+	3	-	100	3.40
9	+	3	-	100	3.40
10	-	0	-	100	1.13
11	-	0	-	100	1.13
12	-	0	-	100	1.13
13	+ α	3	0	300	12.15
14	+ α	3	0	300	12.15
15	+ α	3	0	300	12.15
16	- α	0	0	300	6.11
17	- α	0	0	300	6.11
18	- α	0	0	300	6.11
19	0	1.5	+ α	500	19.32
20	0	1.5	+ α	500	19.32
21	0	1.5	+ α	500	19.32
22	0	1.5	- α	100	2.27
23	0	1.5	- α	100	2.27
24	0	1.5	- α	100	2.27
25	0	1.5	0	300	9.19
26	0	1.5	0	300	9.19
27	0	1.5	0	300	9.19

$$F_{\text{рас}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{вос}}^2},$$

где $S_{\text{ад}}$ – дисперсия адекватности, показывающая погрешность отклика полученного из уравнения регрессии, $S_{\text{вос}}$ – дисперсия воспроизводимости, показывающая погрешность отклика полученного экспериментальным путем.

Столбец MS в строке *Lack of Fit* по значению соответствует $S_{\text{ад}}$, значению $S_{\text{вос}}$ соответствует число в строке *Pure Error* [4] на рисунке 3.

Из рисунка 2.3 видно, что $F_{\text{табл}} < F_{\text{рас}}$ следовательно полученная модель адекватна. На рисунке 2.4 приведена поверхность отклика.

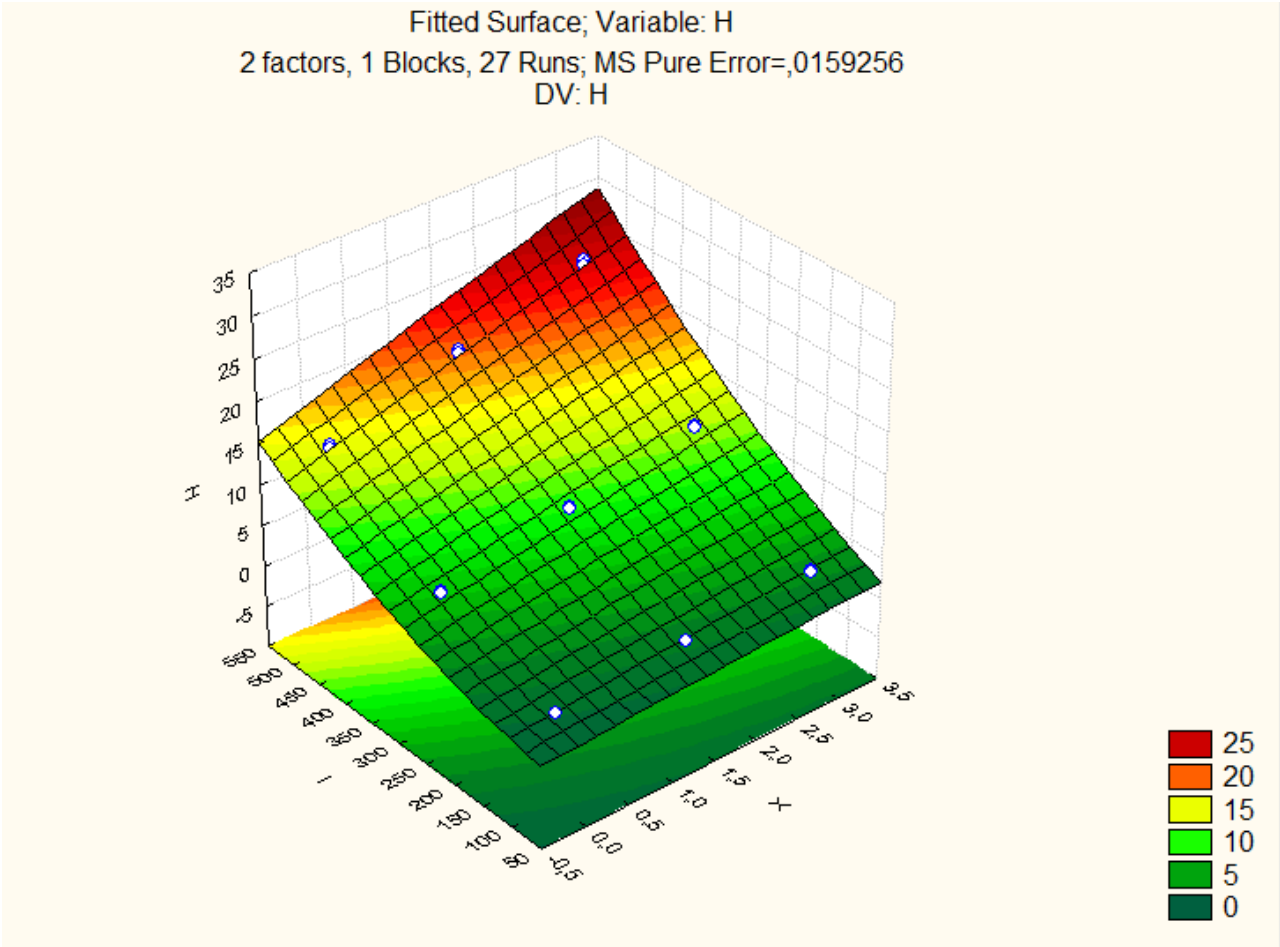
Полученное уравнение регрессии имеет вид

$$H = -0.343 + 0.033 \cdot x - 0.039 \cdot x^2 + 0.01 \cdot I + 0.00004 \cdot I^2 + 0.006 \cdot x \cdot I.$$

Модель описывает топографию магнитного поля при $x \in [0;3]$ мм и $I \in [100;500]$ Ампер-витков.

ANOVA; Var.:H; R-sqr=,99986; Adj.:99983 (S)					
2 factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Pure Error=, DV: H					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)X (L)	152,933	1	152,933	38411,9	0,000000
X (Q)	0,047	1	0,047	11,8	0,002913
(2)I(L)	1287,689	1	1287,689	323425,7	0,000000
I(Q)	14,940	1	14,940	3752,6	0,000000
1L by 2L	35,824	1	35,824	8997,8	0,000000
Lack of Fit	0,139	3	0,046	2,91	0,062824
Pure Error	0,072	18	0,004		
Total SS	1491,645	26			

Рис. 3. Проверка адекватности модели



Список литературы

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Градовский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
2. Ланкин М.В., Кучер А.И. Устройство определения магнитных характеристик листовой электротехнической стали с каналом измерения напряженности магнитного поля// Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2012. – С. 11-14.
3. Пат. 100833 Российская Федерация, МПК G01R33/00. Устройство для измерения магнитных характеристик полос из листовой стали/ Шайхутдинов Д.В.; заявитель и патентообладатель Шайхутдинов Д.В. – №2010139473/28; заявл. 24.09.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36
4. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных – М.: Бином-пресс, 2007. – 512 с.
5. Шкуратник В.Л. Измерения в физическом эксперименте –М.: Горная книга, 2006. – 335 с.

Рецензенты:

Горбатенко Н.И., д.т.н., профессор, И.О. первого проректора, ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова, г.Новочеркасск.

Гречихин В.В., д.т.н., доцент, доцент кафедры ИИСТ, ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова, г.Новочеркасск.