

УДК 004.942: 681.527.8

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ АКТУАТОРА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ И КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бахвалов Ю.А., Гречихин В.В., Юфанова А.Л.

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: vgrech@mail.ru

Статья посвящена расчету магнитного поля актуатора с эффектом памяти формы. Построена математическая модель магнитной системы актуатора, основанная на разложении магнитного поля в линейной среде на сумму полей: поля, создаваемого токами катушек при отсутствии активного элемента из ферромагнетика с памятью формы и поля, образованного намагниченностью элемента при отсутствии тока в катушках. Для расчета магнитного поля в окружающем пространстве и активном элементе используются метод фундаментальных решений и метод конечных элементов соответственно. На основании математической модели разработан вычислительный алгоритм и приведен пример его применения. Достаточная для инженерных задач точность расчета магнитного поля может быть получена при относительно небольшом числе фиктивных магнитных зарядов. Это позволяет реализовать «быструю» компьютерную программу для расчета магнитных полей актуаторов с эффектом памяти формы, что важно в задачах функциональной диагностики.

Ключевые слова: актуатор с эффектом памяти формы, магнитное поле, метод конечных элементов, метод фундаментальных решений, вычислительный алгоритм

CALCULATION THE MAGNETIC FIELD OF THE ACTUATOR WITH SHAPE MEMORY EFFECT BY COMBINED METHOD OF FUNDAMENTAL SOLUTIONS AND FINITE ELEMENTS

Bakhvalov Y.A., Grechikhin V.V., Yufanova A.L.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional University «Platov South-Russian State Polytechnic University», Novocherkassk, e-mail: vgrech@mail.ru

The article is devoted to the calculation of the magnetic field of an actuator with shape memory effect. The mathematical model of magnetic system of the actuator is constructed based on decomposition of a magnetic field in the linear environment for the sum of fields: a field created by currents of coils in the absence of an active element from the ferromagnetic with shape memory and at the field formed by magnetization of an element in the absence of current in coils. For the calculation of the magnetic field in the surrounding space and in the active element is used method of fundamental solutions and finite element method respectively. The article describes the computational algorithm developed on the basis of mathematical model and shows the example of its application. Accuracy of calculation of a magnetic field, sufficient for engineering tasks can be received at rather small number of fictitious magnetic charges. It allows to realize the «fast» computer program for calculation of magnetic fields of actuators with effect of shape memory that is important in problems of functional diagnostics.

Keywords: actuator with shape memory effect, magnetic field, finite element method, method of fundamental solutions, computational algorithm

Одним из современных направлений развития промышленных систем управления является применение интеллектуальных материалов в измерительных и исполнительных элементах. К таким материалам относятся ферромагнетики с памятью формы (ФМПФ), способные изменять геометрические размеры под воздействием электромагнитных и механических сил и запоминать состояние [2, 5, 7]. Это позволяет повысить точность преобразования одного вида энергии в другой, упростить конструкцию устройств, сократить количество составных частей, подверженных поломке и износу. Как следствие, повысить эффективность систем управления. Поэтому разработка теории, принципов построения и средств исследования устройств на основе ФМПФ является актуальной задачей.

Постановка задачи

Целью работы является создание математической модели минимальной размерности и вычислительного алгоритма на ее основе для расчета магнитных полей актуаторов на основе ФМПФ. Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании актуаторов, так и в задачах диагностики при прогнозировании состояния объекта и при анализе неисправностей в реальном времени.

Общий вид двухтактного актуатора показан на рис. 1 [6]. В нем используется распределенная намагничивающая система, содержащая n пар катушек без ферромагнитных сердечников, что позволяет повысить быстродействие, уменьшить массу и габариты устройства.

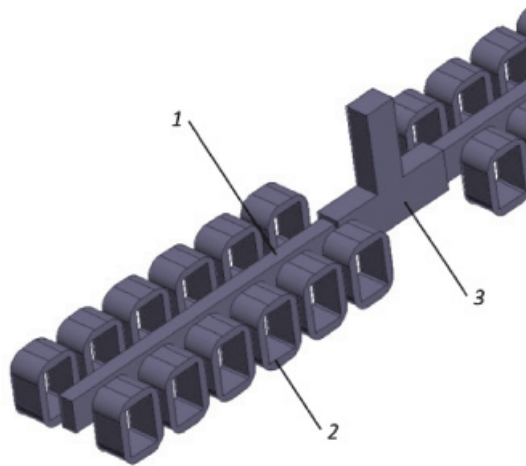


Рис. 1. Общий вид актуатора с двумя активными элементами (1), намагничивающими катушками (2) и исполнительным механизмом (3)

Математическая модель

Построим математическую модель магнитного поля одной пары катушек, между которыми находится часть активного элемента из ФМПФ, размеры которого совпадают с размерами окон катушек (рис. 2). Такую модель достаточно просто адаптировать на случай n пар катушек.

Стационарное трехмерное магнитное поле задачи описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}; & \operatorname{div} \vec{B} = 0; & B = B(H) & \text{в } V^+; \\ \vec{B} = \mu_0 \vec{H} & & & \text{в } V^- \end{cases} \quad (1)$$

с граничными условиями на границе раздела сред: $B_n^+ = B_n^-$; $H_\tau^+ = H_\tau^-$. Здесь μ_0 – магнитная постоянная; $\vec{\delta}$ – плотность тока в катушках; V^+ – подобласть, занятая активным элементом (ферромагнетиком); V^- – подобласть, окружающего элемент пространства, заполненная линейной средой с μ_0 ; $\vec{B}$, $\vec{H}$ – магнитная индукция и напряженность магнитного поля соответственно; B_n^+ , B_n^- – нормальные составляющие магнитной индукции; H_τ^+ , H_τ^- – тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля на границе раздела сред V^+ и V^- .

Для уменьшения размерности задачи будем далее использовать скалярный магнитный потенциал и фиктивные магнитные заряды. Это позволит применить для расчетов параметров поля в V^- бессеточный численный метод фундаментальных решений (МФР).

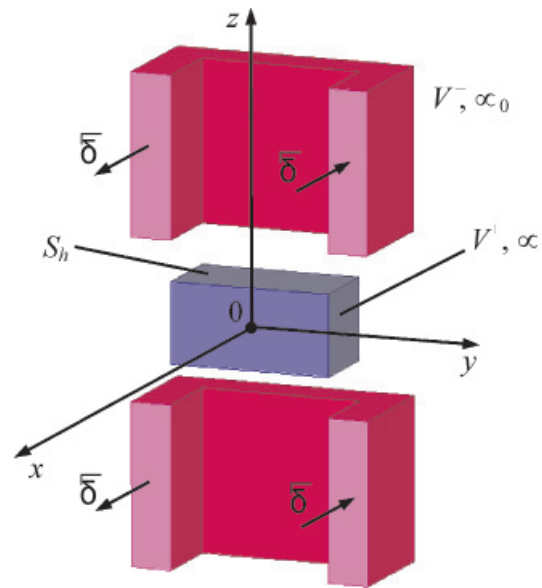


Рис. 2. Сечение исследуемой системы плоскостью yOz

Представим в V^- напряженность магнитного поля в виде суммы двух полей [3]:

$$\vec{H} = \vec{H}_\delta^- + \vec{H}_m^-, \quad (2)$$

где $\vec{H}_\delta^-$ – напряженность магнитного поля, созданного токами катушек во всем пространстве V ($V = V^+ + V^-$) при удалении из V^+ ферромагнетика; $\vec{H}_m^-$ – напряженность магнитного поля в V^- , созданного намагниченностью ферромагнетика при отсутствии тока в катушках.

При использовании разложения (2) в V^+ результирующее поле будет определяться как разность близких величин, что приведет к большим погрешностям. Поэтому, в отличие от [5], в V^+ будем определять результирующее поле $\vec{H}^+$.

Исходную систему уравнений (1) после введения магнитного потенциала φ заменим тремя системами:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_\delta^- &= \vec{\delta}; & \operatorname{div} \vec{B}_\delta^- &= 0; \\ \vec{B}_\delta^- &= \mu_0 \vec{H}_\delta^- & \text{в } V^-; \end{aligned} \quad (I)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\mu_0 \operatorname{grad} \varphi_m^-) &= 0; \\ \vec{H}_m^- &= -\operatorname{grad} \varphi_m^-; & \vec{B}_m^- &= \mu_0 \vec{H}_m^- & \text{в } V^-; \end{aligned} \quad (II)$$

$$\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} \varphi^+) = 0;$$

$$\vec{H}^+ = -\operatorname{grad} \varphi^+; \quad B = B(H) \text{ в } V^+. \quad (III)$$

Решение системы (I) заменим вычислением $\vec{H}_\delta^-$ путем интегрирования по объемам катушек V_c ($V_c = V_{c1} + V_{c2}$), используя

формулу, полученную из закона Био – Савара – Лапласа [4]

$$\vec{H}_{\delta}^{-}(M) = \frac{1}{4\pi} \iint_{V_c} \frac{\vec{\delta}(N), \vec{e}_r}{r_{NM}^2} dV_N, \quad (3)$$

где $\vec{\delta} = (iw_c / S_c) d\vec{l}$; $i w_c$ – магнитодвижущая сила, создаваемая током i в катушке с числом витков w_c ; S_c – площадь сечения катушки; $\vec{e}_r$ – единичный вектор, направленный из точки N к точке M .

Решение системы (II) в V^- выполним МФР, располагая в V^+ фиктивные магнитные заряды.

Решение системы (III) в V^+ с нелинейной средой из ФМПФ выполним методом конечных элементов (МКЭ).

Начало декартовой системы координат поместим в геометрическом центре активного элемента (рис. 2). Учитывая симметрию магнитной системы относительно плоскости xOy , будем решать задачу в области $z \geq 0$. Принимаем, что на плоскости xOy все потенциалы $(\varphi_{\delta}, \varphi_m^-, \varphi^+)$ равны нулю. На боковых гранях параллелепипеда активного элемента положим $\partial\varphi^+ / \partial n = 0$. На грани, лежащей в плоскости xOy , $\varphi^+ = 0$. На верхней грани S_h имеем следующие соотношения, вытекающие из исходных граничных условий (1),

$$\begin{cases} \varphi^+(M_i) = \varphi_{\delta}^-(M_i) + \varphi_m^-(M_i); \\ \mu H_n^+(M_i) = \mu_0 H_{\delta n}^-(M_i) + \mu_0 H_{mn}^-(M_i), \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} H_n^+(M_i) &= -\partial\varphi^+(M_i) / \partial n; \\ H_{\delta n}^-(M_i) &= -\partial\varphi_{\delta}^-(M_i) / \partial n; \\ H_{mn}^-(M_i) &= -\partial\varphi_m^-(M_i) / \partial n; \end{aligned}$$

точка $M_i \in S_h$; $i = 1, 2, \dots, N$; N – число точек коллокации на S_h .

Вычислительный алгоритм задачи

Считаем известными геометрические размеры активного элемента: ширину A_e и длину B_e (размеры по осям Ox и Oy); толщину H_e (размер по оси Oz), геометрические размеры катушки (ширину A_c , длину B_c , толщину H_c , толщину намотки провода S_c) и магнитодвижущую силу $i w_c$, создаваемую токами в катушках.

На верхней грани активного элемента разместим точки коллокации M_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Точки коллокации M_i имеют одинаковую z -координату $z_{M_i} = H_e / 2$. Фиктивные магнитные заряды (количество их $2N$) разместим в точках, x -координаты и y -координаты которых совпадают с соответствующими координатами точек коллокации M_i , причем

$q'_i = -q_i$, что следует из равенства нулю потенциалов всех точек плоскости xOy .

На рис. 3 показано положение точек коллокации M , при их числе $N = 5$, и фиктивных магнитных зарядов q , число зарядов $2N$. Размеры $a = b = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

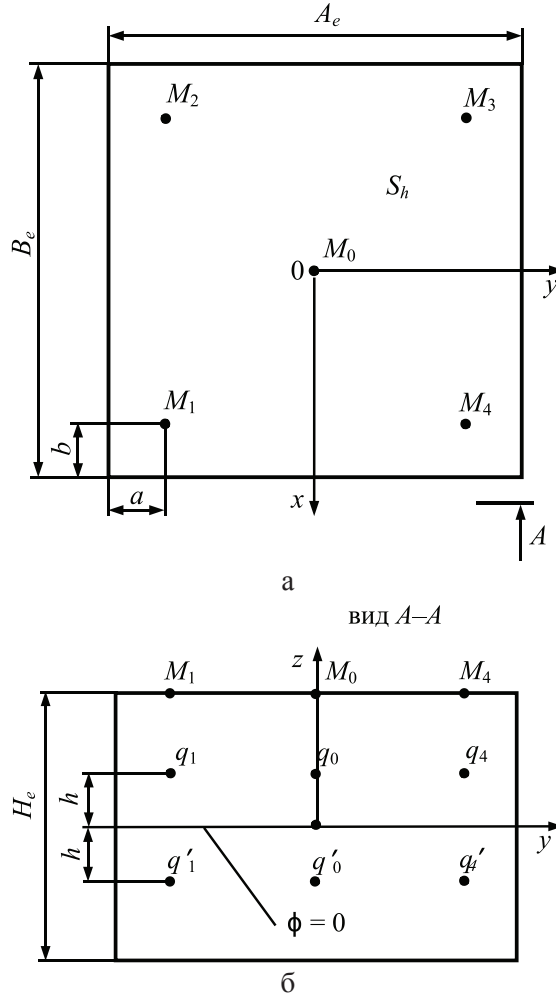


Рис. 3. Верхняя грань активного элемента S_h с точками коллокации $M(a)$ и расположением фиктивных магнитных зарядов $q(b)$

Аппликации всех зарядов равны h для q_i и $-h$ для q'_i . Принимаем $h = H_e / 20$.

Потенциал в точке коллокации M_i определим по формуле [1]

$$\varphi_m^-(M_i) = \sum_{j=1}^N q_j \left(\frac{1}{r_{ji}} - \frac{1}{r_{ji}'} \right), \quad (5)$$

где $r_{ji} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$;

$$r_{ji}' = \sqrt{(x_i - x_{j'})^2 + (y_i - y_{j'})^2 + (z_i - z_{j'})^2};$$

(x_j, y_j, z_j) – координаты точки коллокации M_j ; $(x_{j'}, y_{j'}, z_{j'})$ – координаты точки, в которой

находится заряд q_j ; $(x_{j'}, y_{j'}, z_{j'})$ – координаты точки, в которой находится заряд $q_{j'} = -q_j$.

Z-составляющую напряженности магнитного поля в точке M_i созданного зарядами, будем определять на основании (5) по формуле

$$H_{mz}^-(M_i) = \sum_{j=1}^N q_j \left(\frac{z_i - z_j}{r_{ji}^{3/2}} + \frac{z_i - z_{j'}}{r_{j'i}^{3/2}} \right), \quad (6)$$

где $z_j = h$; $z_{j'} = -h$.

Система (4) с учетом соотношения (5) и (6) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \varphi^+(M_i) = \sum_{j=0}^{N-1} q_j \left(\frac{1}{r_{ji}} - \frac{1}{r_{j'i}} \right) + \varphi_{\delta}^-(M_i); \\ \mu H_z^+(M_i) = \mu_0 \sum_{j=0}^{N-1} q_j \left(\frac{z_i - z_j}{r_{ji}^{3/2}} + \frac{z_i - z_{j'}}{r_{j'i}^{3/2}} \right) + \mu_0 H_{\delta z}^-(M_i). \end{cases} \quad (7)$$

Величина $H_{\delta z}^-(M_i)$ системы (7) определяется по формуле (3), $\varphi_{\delta}^-(M_i)$ находится из соотношения

$$\varphi_{\delta}^-(M_i) = \int_0^{z_i} H(z) dz. \quad (8)$$

Таким образом, система (7), состоящая из $2N$ уравнений, содержит $3N$ неизвестных $(q_i, \varphi^+(M_i), H_z^+(M_i))$. Дополнительно N уравнений, связывающих $\varphi^+(M_i)$ и $H_z^+(M_i)$, получим, решая систему (III) МКЭ.

Алгоритм решения исходной задачи состоит из следующих этапов:

1. Выбираем расположения N точек коллокаций. Формируем массивы координат точек коллокации и точек, в которых расположены фиктивные магнитные заряды. Например, для точки M_i имеем $M_i(x_i, y_i, H/2)$, $q_i(x_i, y_i, h)$, $q_{i'}(x_i, y_i, -h)$.

2. Вычисляем по формулам (3) и (8) в точках коллокации значения $H_{\delta z}^-(M_i)$ и $\varphi_{\delta}^-(M_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$.

3. Учитывая, что $\varphi^+(M_i) \ll \varphi_{\delta}^-(M_i)$ и $\varphi^+(M_i) \ll \varphi_m^-(M_i)$, полагаем $\varphi^+(M_i) = 0$ и, решая первые N уравнений системы (7), найдем q_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

4. Решая вторые N уравнений системы (7), находим $H_z^+(M_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$.

5. Решая краевую задачу МКЭ – систему (III) с граничными условиями: на S_h значения $H_z^+(M)$, где $M \in S_h$, в узлах конечной элементной сетки, которые определяются по второй формуле системы (7); на грани V^+ , лежащей в плоскости xOy , полагаем $\varphi^+ = 0$, на боковых гранях $\partial\varphi^+/\partial n = 0$.

6. В тех случаях, когда магнитная проницаемость среды V^+ зависит от H^+ , производится уточнение значений m и H^+ с использованием зависимости $B(H)$ ФМПФ.

7. Определив $\varphi^+(M_i)$, можно уточнить значения зарядов q_i , решая систему (7).

Результаты экспериментальных исследований

Выберем для исследования систему (рис. 2), имеющую следующие параметры:

$$A_e = B_e = A_c = B_c = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad H_e = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$H_c = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad C_c = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Для оценки погрешности моделирования комбинированным методом (МФР и МКЭ) решим задачу МКЭ, при этом катушки и активный элемент поместим в центре параллелепипеда со сторонами $0,5 \times 0,25 \times 0,25$ м, который заполним 87434 тетраэдрами. На гранях параллелепипеда задаем векторный магнитный потенциал $\vec{A} = 0$. На первом этапе расчетов определяем при $i\omega_c = 10^3$. А каждой катушки значения H_{δ}^- в точках коллокации M_i , а также в ряде точек на отрезке $[0, z_i]$, где $z_i = H_e/2$. Далее численным интегрированием вычисляем $\varphi_{\delta}^-(M_i)$ с использованием соотношения (8). Затем определяем величины H_z^+ и φ^+ в точках коллокаций.

Перейдем к решению задачи комбинированным методом (МФР и МКЭ).

Вариант I. Выбираем $N = 5$ точек коллокаций (рис. 3). В силу симметрии их положения имеем $q_1 = q_2 = q_3 = q_4$. Таким образом, в этом варианте имеем два неизвестных заряда q_0 и q_1 , а также H_0^+ , H_1^+ , φ_0^+ и φ_1^+ .

Величины H_{δ}^{-} и Φ_{δ}^{-} в точках коллокации M_0 и M_1 определяем по формулам (3), (8). В результате имеем систему уравнений

$$\Phi^{+}(M_0) = \Phi_{\delta}^{-}(M_0) + q_0 \left(\frac{1}{r_{0,0}} - \frac{1}{r_{0',0}} \right) + 4q_1 \left(\frac{1}{r_{1,0}} - \frac{1}{r_{1',0}} \right);$$

$$\Phi^{+}(M_1) = \Phi_{\delta}^{-}(M_1) + q_0 \left(\frac{1}{r_{1,0}} - \frac{1}{r_{1',0}} \right) + 4q_1 \left(\frac{1}{r_{1,1}} - \frac{1}{r_{1',1}} \right).$$

Полагая $\Phi^{+}(M_0) = \Phi^{+}(M_1) = 0$, найдем q_0 и q_1 . Далее определяем $H^{+}(M_0)$ и $H^{+}(M_1)$ при начальном значении $\mu^{(0)} = 10^3 \mu_0$. В случае $\mu(H^{+})$ решаем краевую задачу в V^{+} МКЭ, уточняя H_z^{+} , Φ^{+} , q_0 , q_1 . Результаты сведем в табл. 1.

Среднеквадратичное отклонение (RMSD) вычисляем по формуле

$$\text{RMSD} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{z_i}^{+}(\text{МКЭ}) - H_{z_i}^{+})^2 / N}.$$

Таблица 1

Результаты расчетов при $N = 5$

Номер точки (i)	Расчет комбинированным методом (МФР и МКЭ)				Расчет МКЭ	Относительная погрешность
	H_{δ}^{-} , А/м	Φ_{δ}^{-} , А	H_z^{+} , А/м	Φ^{+} , А	$H_z^{+}(\text{МКЭ})$, А/м	$\delta(H_z^{+})$, %
0	176613,4	83,8	445,8	0,1	266,2	67,4
1	125161,4	57,7	311,6	0,082	212,5	46,6

Относительное RMSD для $N = 5$ составило 53,3 %.

Вариант II. Разместим $N = 13$ точек коллокаций (рис. 4) на S_h . В силу симметрии положения точек имеем четыре неизвестных заряда q_0, q_1, q_2, q_3 , а также неизвестные $H_z^{+}(M_i)$ и $\Phi^{+}(M_i)$, $i = 0, 1, 2, 3$.

Система уравнений составляется так же, как в варианте I. Результаты сведены в табл. 2. Относительное RMSD для $N = 13$ составило 9,1 %.

З а м е ч а н и е. Результаты, приведенные в табл. 1, 2, получены при $\mu = 10^3 \mu_0$.

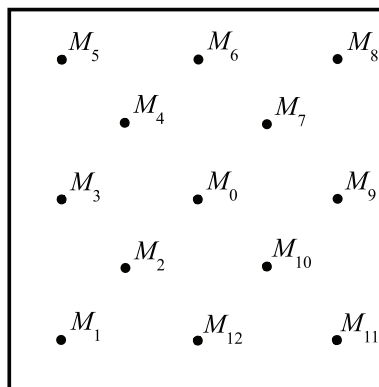


Рис. 4. Расположение точек коллокации $N = 13$

Таблица 2

Результаты расчетов при $N = 13$

Номер точки (i)	Расчет комбинированным методом (МФР и МКЭ)				Расчет МКЭ	Относительная погрешность
	H_{δ}^{-} , А/м	Φ_{δ}^{-} , А	H_z^{+} , А/м	Φ^{+} , А	$H_z^{+}(\text{МКЭ})$, А/м	$\delta(H_z^{+})$, %
0	176613,4	83,8	306,5	0,089	266,2	15,1
1	125161,4	57,7	238,9	0,070	212,5	12,4
2	161570,5	69,5	233,0	0,099	238,0	-2,1
3	157664,0	74,0	265,1	0,055	246,4	7,6

Выводы

Предложена математическая модель минимальной размерности и алгоритм для расчета магнитного поля актуатора на основе ФМПФ. Модель и алгоритм основаны на разложении магнитного поля в линейной среде, окружающей устройство, на два поля: $\vec{H}_\delta^-$ – напряженность магнитного поля, созданная токами катушек при отсутствии активного элемента из ФМПФ и поля $\vec{H}_m^-$, создаваемого намагниченностью ФМПФ при отсутствии катушек с током. Для определения магнитного поля в окружающем пространстве $\vec{H}_m^-$ и активном элементе $\vec{H}^+$ используются МФР и МКЭ соответственно. При этом магнитное поле $\vec{H}_\delta$ вычисляется по формуле, вытекающей из закона Био – Савара – Лапласа.

Достаточная для инженерных задач точность расчета параметров магнитного поля может быть получена при относительно небольшом числе фиктивных магнитных зарядов, что характерно для МФР [1]. Так при 26 зарядах погрешность расчета не превышает 9%. Как следует из рис. 3, дальнейшее увеличение зарядов приведет к уменьшению погрешности. При 34 зарядах следует ожидать менее 5%.

При учете симметрии магнитной системы размерность задачи существенно сокращается: при 10 зарядах число неизвестных равно двум (q_0, q_1), при 18 зарядах – трем (q_0, q_1, q_2), при 26 зарядах – 4 (q_0, q_1, q_2, q_3). Это позволяет реализовать «быструю» компьютерную программу для расчета магнитных полей актуаторов на основе ФМПФ, что важно в задачах диагностики при прогнозировании состояния объекта и при анализе неисправностей в реальном времени.

Результаты работы получены при поддержке гранта РФФИ № 14-08-01288 «Разработка теории натурно-модельных испытаний измерительных и исполнительных систем, построенных на основе ферромагнитных материалов с эффектом памяти формы».

Список литературы

1. Бахвалов Ю.А., Князев С.Ю., Щербакоев Е.Е., Щербакоев А.А. Моделирование потенциальных полей с применением метода точечных источников. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 158 с.

2. Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Такаги Т., Ховайло В.В., Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173. – № 6. – С. 577–608.

3. Тозони О.В., Маергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. – К.: Техніка, 1974. – 352 с.

4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: Наука, 1974. – 943 с.

5. Asua E., Feuchtwanger J., Garcia-Arribas A., Etxebarria V., Orue I., Barandiaran J.M. Ferromagnetic shape memory alloy actuator for micro- and nanopositioning // Sensor Letters. – 2009. – № 7. – P. 348–350.

6. Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V., Shaikhutdinov D.V. Measuring and Actuating Devices Based on Shape Memory Ferromagnets. Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – Vol. 56. – P. 609–613.

7. Suorsa I., Pagounis E., Ullakko K. Magnetic shape memory actuator performance // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – Vol. 272. – P. 2029–2030.

References

1. Bakhvalov Yu.A., Knyazev S.U., Scherbakova E.E., Scherbakov A.A. *Modelirovanie potentsialnykh poley s primeneniem metoda tochechnykh istochnikov* [Modeling of potential fields using the method of point sources]. Novocherkassk, YURGPU (NPI), 2012. 158 p.

2. Vasilev A.N., Buchelnikov V.D., Takagi T., Khovailo V.V., Estrin E.I. Shape memory ferromagnets, *PHYS-USP*, 2003, vol. 46, no. 6, pp. 559–588.

3. Tozoni O.V., Maergoyz I.D. *Raschet trekhmernykh elektromagnitnykh poley* [The calculation of three dimensional electromagnetic fields]. Kiev, Tekhnika, 1974. 352 p.

4. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov* [Handbook of physics for engineers and University students]. Moscow, Nauka, 1974. 943 p.

5. Asua E., Feuchtwanger J., Garcia-Arribas A., Etxebarria V., Orue I., Barandiaran J.M. Ferromagnetic shape memory alloy actuator for micro- and nanopositioning. *Sensor Letters*, 2009, no. 7, pp. 348–350.

6. Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V., Shaikhutdinov D.V. Measuring and Actuating Devices Based on Shape Memory Ferromagnets. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 56, pp. 609–613.

7. Suorsa I., Pagounis E., Ullakko K. Magnetic shape memory actuator performance. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, vol. 272, pp. 2029–2030.

Рецензенты:

Савелов Н.С., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», г. Новочеркасск;

Седов А.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.