

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-168-175
УДК 537.621.5

А.М. Вишнеvский^{ID}, А.А. Фирсова
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИПОЛЬНОГО МАГНИТНОГО МОМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА НЕЗАМКНУТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является квадратурный (на основе интегральных формул) метод определения дипольного магнитного момента (ДММ) по результатам измерения магнитного поля (МП) на замкнутой поверхности, охватывающей источники поля. Цель состоит в модификации этого метода для случая, когда измерения на некоторых участках поверхности отсутствуют, что делает ее незамкнутой.

Материалы и методы. Материалами работы являются описания методов определения магнитных моментов и публикации, оценивающие их эффективность. Реализуемый метод заключается в замене значений МП на участках поверхности, где отсутствуют измерения, значениями поля от априори задаваемого типа источника. Это позволяет получить корректирующие коэффициенты, учитывающие влияние недостающих участков.

Основные результаты. Предложены способы учета недостающих участков незамкнутой поверхности измерений при определении значений ДММ квадратурным методом. На основе решения серии тестовых задач произведена оценка погрешности расчета составляющих ДММ для МП различной структуры.

Заключение. Достигнуто повышение точности определения ДММ при реализации квадратурного метода. Приведенные расчетные соотношения могут быть использованы для вычисления составляющих ДММ по измерениям МП на образующих цилиндрической поверхности, а предложенный подход – на произвольных незамкнутых поверхностях.

Ключевые слова: магнитное поле, дипольный магнитный момент, измерения, квадратурный метод, незамкнутая поверхность, длина базы измерений.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-168-175
UDC 537.621.5

A. Vishnevsky^{ID}, A. Firsova
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

CALCULATION OF DIPOLE MAGNETIC MOMENT FROM OPEN-SURFACE MEASUREMENTS

Object and purpose of research. This paper discusses a quadrature-based method of dipole magnetic moment (DMM) calculation as per magnetic field measurement data for the open surface encompassing magnetic field sources. The purpose of the study was to modify this method for the case when measurement data are not available for certain areas on the surface (in other words, when the surface is not closed).

Materials and methods. The paper describes magnetic dipole calculation methods, as well as the publications discussing their efficiency. The method suggested in this paper basically substitutes the lacking magnetic field data by the values for pre-defined type of source, thus giving the correction coefficients needed to take into account the contribution of lacking areas.

Main results. The paper suggests the methods for taking into account the missing parts of the open measurement surface in quadrature-based DMM calculation procedure. Calculation errors of DMM components for magnetic fields of various structure are estimated as per the solution for a series of test problems.

Conclusion. The quadrature method offered in this study offers more accurate DMM calculation. The expressions given in the paper could be used to calculate DMM components as per magnetic field measurements for the generatrices of cylindrical surface, and the approach suggested in this study could be applied to arbitrary open surfaces.

Keywords: magnetic field, dipole magnetic moment, measurement, quadrature method, open surface, measurement base length.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Вишнеvский А.М., Фирсова А.А. Определение дипольного магнитного момента по измерениям на незамкнутой поверхности. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 168–175.

For citations: Vishnevsky A., Firsova A. Calculation of dipole magnetic moment from open-surface measurements. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 168–175 (in Russian).

Введение

Introduction

Основными интегральными характеристиками источников магнитного поля являются мультипольные моменты [1], при этом дипольный магнитный момент характеризует поле на дальних расстояниях от его источников. Так, в частности, уровень ДММ является одним из показателей помехоактивности ферромагнитного оборудования [2], а также определяет дальность магнитометрического обнаружения объекта.

ДММ не может быть измерен напрямую, а определяется путем расчета по данным измерений напряженности (индукции) МП. В работе рассматривается общий случай, когда измерения могут производиться и в ближней зоне, а поле определяется в т.ч. и мультиполями высших порядков.

Известны два основных подхода к определению ДММ. Первый предполагает построение математической модели источников, решение обратной задачи определения интенсивности источников по измеренным значениям МП, как правило, путем решения системы линейных алгебраических уравнений, и расчет ДММ по найденным параметрам источников. При этом формально не накладываются ограничения на топографию точек измерений МП. Однако при использовании этого подхода возникает необходимость решения неустойчивой задачи и применения специальных методов решения некорректных задач [3, 4].

Особенностью другого подхода является необходимость проведения измерений на замкнутой поверхности, охватывающей источники МП. В данном случае расчет ДММ основан на применении интегральных формул [5, 6] и является алгоритмически более простым, а его методическая погрешность обусловлена только погрешностью интегрирования. Несмотря на эти преимущества практическое применение этого подхода ограничено необходимостью выполнения измерений на замкнутой поверхности, что не всегда возможно на практике. Также следует отметить, что некоторые измерения на участках поверхности, удаленных от источников поля, могут оказаться неинформативными в силу высокого уровня погрешности измерений относительно полезного сигнала.

В статье предлагаются алгоритмы, позволяющие использовать квадратурный метод определения ДММ в условиях отмеченных ограничений.

Методы определения дипольного магнитного момента

Dipole magnetic moment determination methods

В случае произвольной замкнутой поверхности измерений S вокруг источников поля компоненты магнитного мультипольного момента порядка n (составляющие тензора n -го ранга) определяются по результатам измерений напряженности МП $\vec{H} = (H_x, H_y, H_z)^T$ формулой [5]:

$$M_{ijk}^{(m)} = \int_S (\vec{H} \cdot \vec{n}) \varphi x^i y^j z^k dS + \frac{1}{m+1} \int_S \{ [(\vec{H} \times \vec{n}) \times \vec{r}] \cdot \text{grad} \varphi x^i y^j z^k \} dS, \quad (1)$$

где $m = i + j + k$; $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ – внешняя нормаль к поверхности S ; $\vec{r} = (x, y, z)^T$ – радиус-вектор текущей точки поверхности S ; символом φ обозначена операция образования тензора должной симметрии [7].

Для составляющих вектора ДММ $\vec{M} = (M_x, M_y, M_z)^T$ она принимает вид

$$M_\xi = \int_S \{ (\vec{H} \cdot \vec{n}) \xi dS + \frac{1}{2} [(\vec{H} \times \vec{n}) \times \vec{r}] \cdot \vec{e}_\xi \} dS, \quad \xi = x, y, z, \quad (2)$$

где \vec{e}_ξ – орт по координате ξ , в частности $\vec{e}_x = (1, 0, 0)^T$.

Рассматривается случай, когда данные измерений \vec{H} задаются на части S_B замкнутой поверхности S , а на части S_0 эти данные отсутствуют, при этом $S = S_B \cup S_0$.

Аппроксимируем поле на S_0 полем априори заданного типа источника с составляющими ДММ M_v ($v = x, y, z$), а выражение (2) представим в виде суммы:

$$M_\xi = M_\xi^B + \sum_{v=x,y,z} M_v \int_{S_0} \left\{ (\vec{H}_0^v \cdot \vec{n}) v dS + \frac{1}{2} [(\vec{H}_0^v \times \vec{n}) \times \vec{r}] \cdot \vec{e}_\xi \right\} dS, \quad (3)$$

где \vec{H}_0^v – поле выбранного типа источника с единичной v -компонентой ДММ,

$$M_\xi^B = \int_{S_B} \left\{ (\vec{H} \cdot \vec{n}) \xi dS + \frac{1}{2} [(\vec{H} \times \vec{n}) \times \vec{r}] \cdot \vec{e}_\xi \right\} dS. \quad (4)$$



Рис. 1. Схема измерений
Fig. 1. Measurement layout

В общем случае для определения \vec{M} решается система линейных алгебраических уравнений третьего порядка, включающая уравнения вида (3). В ряде практических случаев, например, когда S – цилиндрическая поверхность, а S_0 – ее торцы, при $\nu \neq \xi$

$$\int_{S_0} \left\{ (\vec{H}_0^\nu \cdot \vec{n}) \nu dS + \frac{1}{2} [(\vec{H}_0^\nu \times \vec{n}) \times \vec{r}] \cdot \vec{e}_\nu \right\} dS = 0. \quad (5)$$

Тогда

$$M_\xi = M_\xi^B + M_\xi \int_{S_0} \left\{ (\vec{H}_0^\xi \cdot \vec{n}) \xi dS + \frac{1}{2} [(\vec{H}_0^\xi \times \vec{n}) \times \vec{r}] \cdot \vec{e}_\xi \right\} dS, \quad (6)$$

При этом выражение для составляющих ДММ записывается в виде

$$M_\xi = \frac{1}{K_\xi} M_\xi^B, \quad (7)$$

$$\text{где } K_\xi = 1 - \int_{S_0} \left\{ (\vec{H}_0^\xi \cdot \vec{n}) \xi dS + \frac{1}{2} [(\vec{H}_0^\xi \times \vec{n}) \times \vec{r}] \cdot \vec{e}_\xi \right\} dS, \quad (8)$$

имеет смысл поправочного коэффициента, учитывающего незамкнутость поверхности S .

Конкретизируем рассмотрение для случая, когда измерения производятся на незамкнутой цилиндрической поверхности (рис. 1), причем точки измерений расположены на боковой поверхности цилиндра радиуса R , а измерения на торцах цилиндра отсутствуют, длина базы измерений (длина цилиндра) равна $2a$.

В этом случае для интегрирования в цилиндрической системе координат получаем:

$$M_X^B = r \int_{-a}^a \int_0^{2\pi} (H_Y \cos \varphi + H_Z \sin \varphi) x dx d\varphi - \frac{1}{2} r^2 \int_{-a}^a \int_0^{2\pi} H_X dx d\varphi, \quad (9)$$

$$M_Y^B = \int_{-a}^a \int_0^{2\pi} \left\{ r^2 \left[H_Y \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 \varphi \right) + \frac{3}{2} H_Z \sin \varphi \cos \varphi \right] + H_X \frac{rx}{2} \cos \varphi \right\} dx d\varphi, \quad (10)$$

$$M_Z^B = \int_{-a}^a \int_0^{2\pi} \left\{ r^2 \left[\frac{3}{2} H_Y \sin \varphi \cos \varphi + H_Z \left(1 - \frac{3}{2} \cos^2 \varphi \right) \right] + H_X \frac{rx}{2} \sin \varphi \right\} dx d\varphi. \quad (11)$$

Оценим сначала влияние отсутствия данных измерений на торцах цилиндра ($K_\xi = 1$) на примере МП равномерно распределенных по отрезку длины L трехкомпонентных диполей и намагниченного в произвольном однородном внешнем МП сплошного вытянутого сфероида длины L .

В табл. 1 приведена относительная (отнесенная к точному значению соответствующей компоненты) погрешность определения ДММ в зависимости от

Таблица 1. Погрешность определения дипольного магнитного момента при измерениях магнитного поля на боковой цилиндрической поверхности, %

Table 1. The error in DMM value from magnetic field measurements on lateral cylindrical surface, %

Относительная длина базы измерений, $2a/L$	МП распределенных по отрезку диполей			МП сфероида во внешнем поле		
	M_x	M_y	M_z	M_x	M_y	M_z
1	53	17	17	23	7	7
1,25	15	5	5	10	2	2
1,5	6	3	3	4	1	1
2	2	1	1	2	0,5	0,5

длины базы измерений при $R/L \approx 0,1$. Число точек измерений достаточно велико, так что можно считать, что погрешность определения ДММ обусловлена только отсутствием торцов. Как показывают результаты, методическая погрешность определения ДММ, вызванная незамкнутостью поверхности, в случае короткой длины базы измерений ($2a/L = 1$) может составлять более 50 % для продольной компоненты и 17 % для вертикальной и поперечной компонент.

Для уменьшения методической погрешности, обусловленной незамкнутостью поверхности измерений, рассмотрим следующие варианты аппроксимации поля на торцах цилиндра:

- МП создается точечным магнитным диполем, расположенным в точке $(x', 0, 0)$;
- МП создается магнитными диполями, равномерно распределенными по горизонтальному отрезку длины L ;
- МП создается намагниченным сфероидом длины L , при этом для простоты вычислений поле сфероида заменяется близким МП распределенных по горизонтальному отрезку диполей с плотностью

$$\vec{m}(x') = \frac{3\vec{M}}{2L} \left(1 - \frac{4x'^2}{L^2} \right). \quad (12)$$

Рассмотрим вывод поправочных коэффициентов для определения горизонтальной компоненты (наиболее чувствительной к длине базы измерений), когда поле на торцах аппроксимируется полем точечного магнитного диполя, расположенного в точке $(x', 0, 0)$. Для рассматриваемой поверхности измерений выполняется равенство (5) и используется (8). В этом случае

$$K_p^\xi = K_p^X = 1 - \left[a \int_0^r \int_0^{2\pi} (H_{0X}|_{x=a} + H_{0X}|_{x=-a}) r dr d\varphi + \frac{1}{2} \int_0^r \int_0^{2\pi} (H_{0n}|_{x=a} - H_{0n}|_{x=-a}) r^2 dr d\varphi \right], \quad (13)$$

$$\text{где } H_{0X} = \frac{1}{4\pi} \frac{2(x-x')^2 - r^2}{[(x-x')^2 + r^2]^{5/2}},$$

$$H_{0n} = H_{0Y} \cos \varphi + H_{0Z} \sin \varphi = \frac{3}{4\pi} \frac{(x-x')r}{[(x-x')^2 + r^2]^{5/2}}.$$

Таким образом, получаем после интегрирования окончательное выражение для K_p^X :

$$K_p^X = \sum_{\gamma=1,-1} \frac{2+r_x^2 \frac{a+3\gamma x'}{a+\gamma x'}}{4(1+r_x^2)^{3/2}}, \quad (14)$$

$$\text{где } r_x = \frac{r}{a+\gamma x'}.$$

Аналогичным путем получаются выражения для поправочных коэффициентов K_L^X (при аппроксимации МП на торцевых поверхностях цилиндра S_0 полем равномерно распределенных на отрезке $\left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ магнитных диполей) и K_S^X (при аппроксимации МП на S_0 полем вытянутого сфероида (12)):

$$K_L^X = \frac{1}{2} \sum_{\gamma=1,-1} \frac{1+\gamma \frac{r}{L} r_L}{1+r_L^2}, \quad (15)$$

$$K_S^X = \frac{3}{2} K_L^X - 3 \sum_{\gamma=1,-1} \gamma \frac{1}{L_\gamma^3} \left[\frac{2-6a_\gamma+6a_\gamma^2+r_L^2+6a_\gamma r_L^2-6a_\gamma^3-9a_\gamma^2 r_L^2+2r_L^4}{3\sqrt{1+r_L^2}} - 2a_\gamma r_L^2 \ln \left| x_\gamma \left(1+\sqrt{1+r_L^2} \right) \right| \right], \quad (16)$$

$$\text{где } x_\gamma = a+\gamma \frac{L}{2}, \quad r_L = \frac{r}{x_\gamma}, \quad L_\gamma = \frac{L}{x_\gamma}, \quad a_\gamma = \frac{a}{x_\gamma}.$$

Выполнив аналогичные вычисления, получим поправочные коэффициенты для определения поперечной и вертикальной компонент ДММ. Таким образом, с учетом того, что в рассматриваемом примере они одинаковы, имеем:

$$K_p^Y = K_p^Z = \frac{1}{8} \sum_{\gamma=1,-1} \frac{4+5r_x^2+\gamma \frac{x'}{r} r_x^3}{(1+r_x^2)^{3/2}}, \quad (17)$$

$$K_L^Y = K_L^Z = \frac{1}{4L} \sum_{\gamma=1,-1} \gamma \frac{3a+2L+2r_L r}{r_L \sqrt{1+r_L^2}}, \quad (18)$$

$$K_S^Y = K_S^Z = \frac{3}{2} K_L^{Y(Z)} - \frac{3}{2} \sum_{\gamma=1,-1} \gamma \frac{1}{L_\gamma^3} \left[\frac{4}{3} (1+r_L^2)^{3/2} + 2(2a_\gamma^2 - r_L^2) \sqrt{1+r_L^2} + \frac{2r_L^2(r_L^2 - 2a_\gamma^2)}{1+r_L^2} + \frac{a_\gamma(5r_L^2 - a_\gamma^2)}{\sqrt{1+r_L^2}} - 4a_\gamma \sqrt{1+r_L^2} - a_\gamma r_L^2 \ln \left| x_\gamma \left(1+\sqrt{1+r_L^2} \right) \right| \right]. \quad (19)$$

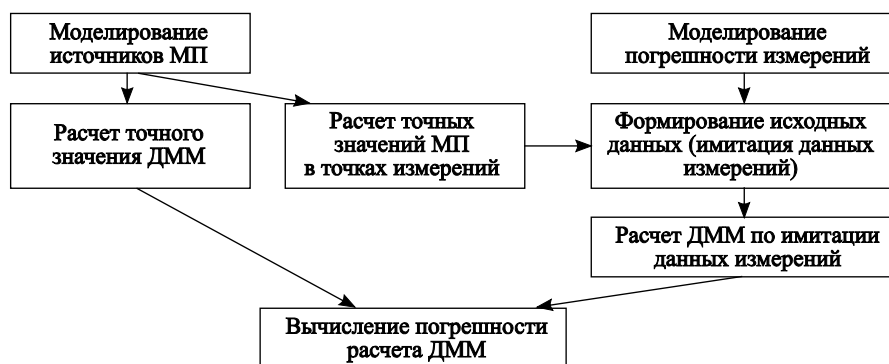


Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения тестовой задачи
Fig. 2. Flow chart of test problem solution sequence

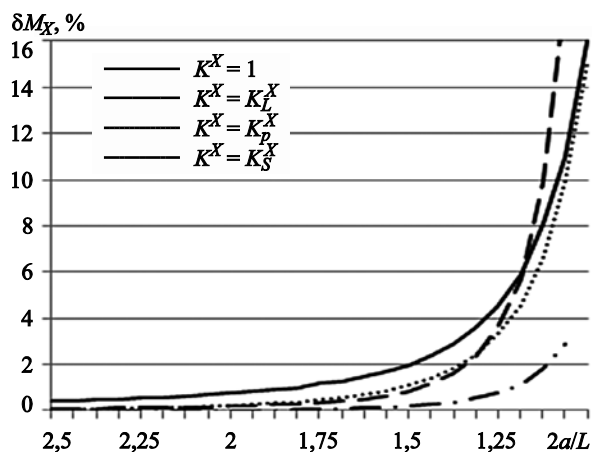


Рис. 3. Зависимость погрешности M_x от длины базы измерений для индуктивного магнитного поля при точных исходных данных
Fig. 3. Error in M_x versus measurement base length for induced magnetic field with exact inputs

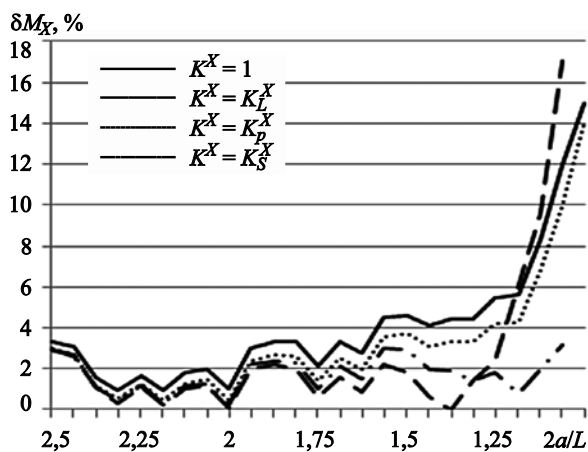


Рис. 4. Зависимость погрешности M_x от длины базы измерений для индуктивного магнитного поля при исходных данных с погрешностью
Fig. 4. Error in M_x versus measurement base length for induced magnetic field with inexact inputs

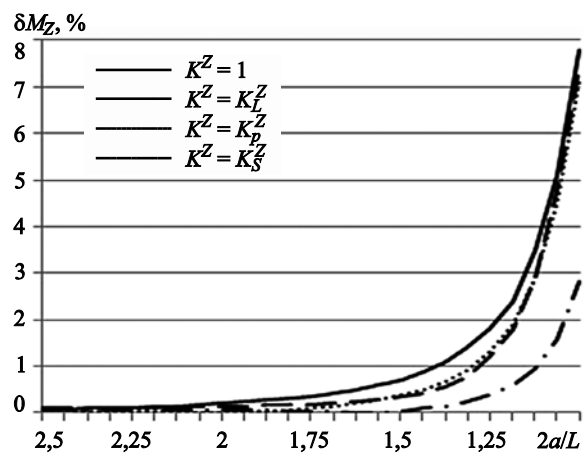


Рис. 5. Зависимость погрешности M_z от длины базы измерений для индуктивного магнитного поля при точных исходных данных
Fig. 5. Error in M_z versus measurement base length for induced magnetic field with exact inputs

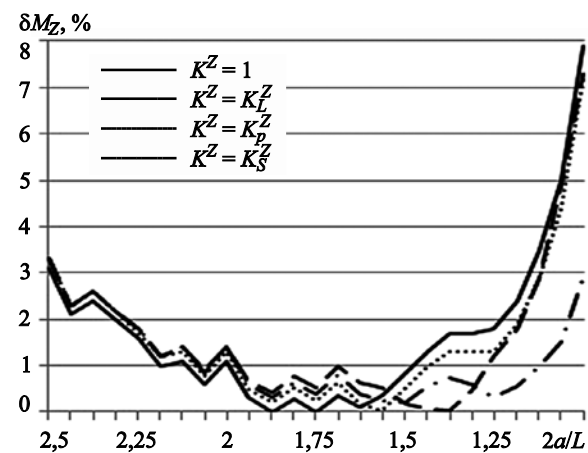


Рис. 6. Зависимость погрешности M_z от длины базы измерений для индуктивного магнитного поля при исходных данных с погрешностью
Fig. 6. Error in M_z versus measurement base length for induced magnetic field with inexact inputs

Сравнительный анализ алгоритмов

Comparison of calculation algorithms

Оценки погрешности определения ДММ и сопоставление способов аппроксимации отсутствующих измерений производились на основе решения серии тестовых задач. Алгоритм решения такой задачи приведен на рис. 2.

В результате решения тестовой задачи вычислялась относительная погрешность определения каждой из компонент ДММ

$$\delta M_{\xi} = \frac{|M_{\xi} - M_{\xi}^{Exact}|}{|\vec{M}^{Exact}|}, \quad (20)$$

где M_{ξ}^{Exact} – точное значение ξ -компоненты ДММ, M_{ξ} – значение ξ -компоненты ДММ, полученное по результатам имитации данных измерений, $|\vec{M}^{Exact}|$ – модуль вектора точного значения ДММ.

В тестовых задачах рассматривались различные варианты распределения магнитных диполей, намагниченности и контуров с током, а также компьютерная магнитная модель корабля длиной L . Моделирование МП производи-

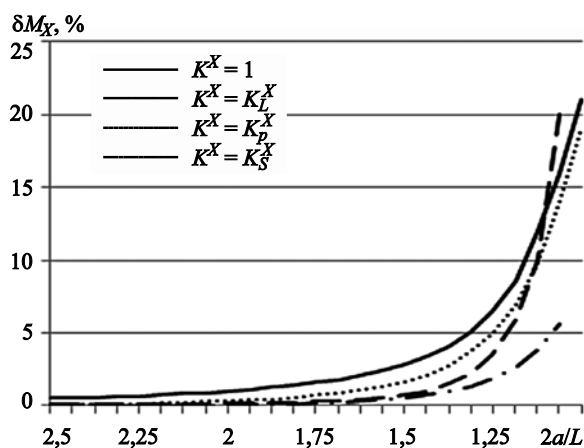


Рис. 7. Зависимость погрешности M_x от длины базы измерений для результирующего магнитного поля при точных исходных данных

Fig. 7. Error in M_x versus measurement base length for resultant magnetic field with exact inputs

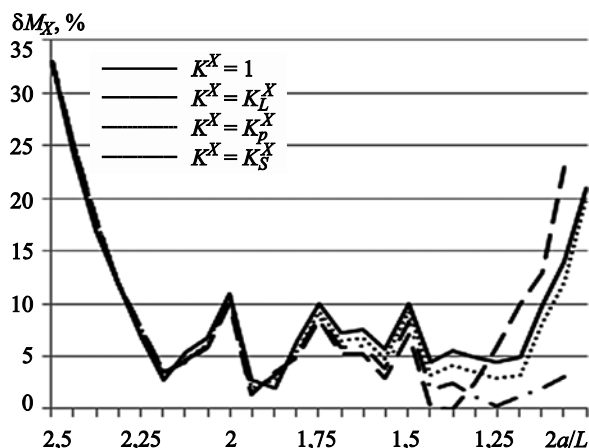


Рис. 8. Зависимость погрешности M_x от длины базы измерений для результирующего магнитного поля при исходных данных с погрешностью

Fig. 8. Error in M_x versus measurement base length for resultant magnetic field with inexact inputs

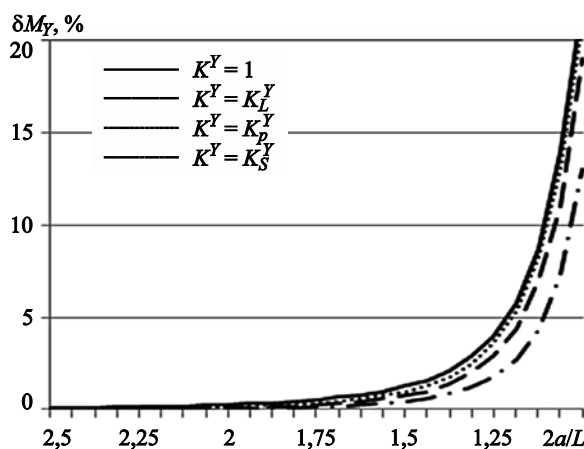


Рис. 9. Зависимость погрешности M_y от длины базы измерений для результирующего магнитного поля при точных исходных данных

Fig. 9. Error in M_y versus measurement base length for resultant magnetic field with exact inputs

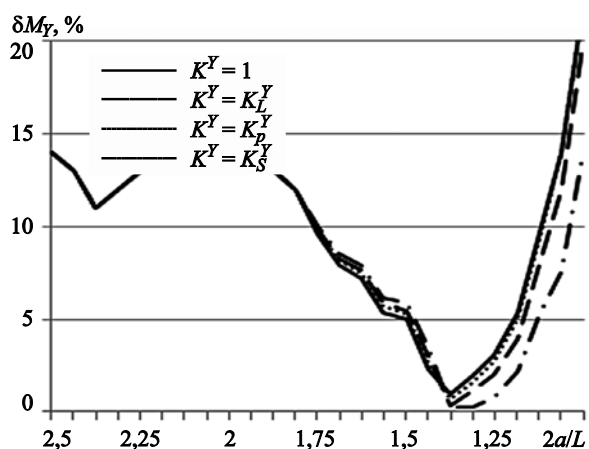


Рис. 10. Зависимость погрешности M_y от длины базы измерений для результирующего магнитного поля при исходных данных с погрешностью

Fig. 10. Error in M_y versus measurement base length for resultant magnetic field with inexact inputs

лось с помощью программного обеспечения STAR 3D Magnetic [8].

По структуре создаваемых полей эти модели можно разделить на две группы. В первой группе рассматривались поля, характерные для индуктивного намагничивания ферромагнитных конструкций. Во второй – поля, соответствующие остаточному намагничиванию и компенсации МП с помощью обмоток с током.

Некоторые характерные зависимости погрешности определения составляющих ДММ для различных вариантов аппроксимации МП на отсутствующих участках поверхности измерений (применялись различные значения коэффициентов K^z) приведены на рис. 3–6 – для случая индуктивного намагничивания, а также на рис. 7–10 – для случая результирующего МП. Вариант с $K^z = 1$ соответствует пренебрежению МП на части поверхности S_0 .

В рассмотренных примерах принято, что измерения МП производятся с равномерным шагом на восьми образующих боковой цилиндрической поверхности при $R \approx 0,1L$ с шагом $0,03L$ по оси X на базе $2a$. В исходные данные дополнительно вносятся погрешность, среднеквадратическое значение которой составляет 5 %. Варьируемый параметр $2a/L$ – относительная длина базы измерений.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы для случая отсутствующих участков измерений на торцах цилиндрической поверхности измерений:

- алгоритмы с учетом аппроксимации отсутствующих участков измерений наиболее эффективны для индуктивного МП;
- в случае вытянутых объектов наименьшую методическую погрешность дает аппроксимация отсутствующих участков измерений полем сфероида;
- в случае аппроксимация отсутствующих измерений полем сфероида наибольшее снижение погрешности происходит для продольной составляющей ДММ;
- при исходных данных с погрешностью наилучшие результаты также показывает алгоритм аппроксимации отсутствующих участков измерений полем сфероида;
- при исходных данных с погрешностью и длине базы измерений свыше 1,5 длины объекта в суммарной погрешности расчета ДММ преобладает вклад погрешности измерений над методической погрешностью.

Решение тестовых задач на численных моделях кораблей с другими основными размерениями при-

водит к аналогичным зависимостям. Таким образом, в тех случаях, когда отсутствующие измерения хорошо аппроксимируются выбранным типом источника поля, погрешность ДММ может быть существенно уменьшена.

Заключение

Conclusion

В статье предложен подход, позволяющий использовать квадратурный метод определения ДММ, теоретически предполагающий интегрирование данных измерений МП по замкнутой поверхности, на незамкнутых поверхностях. Показана эффективность рассмотренного подхода на примере измерений на боковой поверхности цилиндра, охватывающей объект.

Среди рассмотренных способов аппроксимации МП на недостающих участках незамкнутой поверхности лучшие результаты показал вариант учета МП как поля намагниченного сфероида с длиной, равной длине объекта.

Предложенный способ расчета ДММ может быть применен при разработке методик измерений ДММ по данным лабораторных и натуральных измерений магнитного поля.

Список использованной литературы

1. Шимони К. Теоретическая электротехника. Москва : Мир, 1964. 773 с.
2. Чалисов Ю.И., Додзина Т.Я. Экспериментальный анализ внешнего магнитного поля электротехнических устройств // Электричество. 1983. № 6. С. 49–53.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. 3-е изд., испр. Москва : Наука, 1986. 286, [1] с.
4. Вишневецкий А.М., Фирсова А.А. Выбор параметра регуляризации в задаче пересчета магнитного поля // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 36(320). С. 107–121.
5. Вишневецкий А.М. Определение электрических и магнитных мультипольных моментов по результатам измерений на замкнутых поверхностях // Электричество. 1993. № 3. С. 50–52.
6. Vishnevsky A.M. Methods of interpretation of electric and magnetic field measurement results. // Acoustic and other physical fields of ships. Krylov Shipbuilding Research Institute. 1994. St. Petersburg. P. 182–187.
7. Медведев Б.В. Начала теоретической физики: Механика, теория поля, элементы квантовой механики. Москва : Наука, 1977. 496 с.

8. Программа расчета магнитного поля STAR 3D Magnetic. Версия 2: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610567 Рос. Федерация / А.Я. Лановок, Р.Я. Низкий, Р.А. Роголь. № заявки 2018665256/69; заявл. 27.12.2018; опублик. 14.01.2019. 1 с.
7. *B. Medvedev*. Fundamentals of theoretical physics. Mechanics, field theory, elements of quantum mechanics. Moscow, Nauka, 1977, 496 pp. (*in Russian*).
8. STAR 3D Magnetic software for magnetic field calculations. Certificate No. 2011618301 on state registration of software (*in Russian*).

References

1. *K. Simonyi*. Theoretische Elektrotechnik (*Russian translation*). Moscow, Mir, 1964, 773 pp.
2. *Yu. Chalisov, T. Dodzina*. Experimental analysis of external magnetic field for electric hardware // *Elektrichestvo* (Electricity), 1983, No. 6, pp. 49–53 (*in Russian*).
3. *A. Tikhonov, V. Arsenin*. Solution methods for incorrect problems. Moscow, Nauka, 1986, 288 pp. (*in Russian*).
4. *A. Vishnevsky, A. Firsova*. Selecting regularization parameter in the problem of magnetic field extrapolation // Transactions of Krylov State Research Institute, 2008, Issue 36(320), pp. 107–121 (*in Russian*).
5. *A. Vishnevsky*. Determination of electric and magnetic multipole moments as per measurement data for closed surfaces // *Elektrichestvo* (Electricity), 1993, No. 3, pp. 50–52 (*in Russian*).
6. *Vishnevsky A.M.* Methods of interpretation of electric and magnetic field measurement results. // Acoustic and other physical fields of ships. Krylov Shipbuilding Research Institute. 1994. St. Petersburg. P. 182–187.

Сведения об авторах

Вишневецкий Александр Михайлович, д.т.н., профессор, начальник 7-го отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-10. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4795-0113>.
Фирсова Анна Анатольевна, к.т.н., с.н.с., ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-33. E-mail: nurka100@mail.ru.

About the authors

Alexander M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-10. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4795-0113>.
Anna A. Firsova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-33. E-mail: nurka100@mail.ru.

Поступила / Received: 22.11.21
Принята в печать / Accepted: 10.03.22
© Вишневецкий А.М., Фирсова А.А., 2022