

УДК 621.317.44

А.В. Дегтярёв

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина*

### ТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОБЪЕКТА

*В результате исследования на основе моделирования внешнего магнитного поля источника в виде эксцентричного магнитного момента предложен точечный магнитометрический метод измерения параметров и пространственной конфигурации магнитного поля, основанный на определении его дипольных, квадрупольных и октапольных магнитных моментов. Метод основан на измерении компонент напряженности поля в трех точках пространства с определенными координатами и определении по результатам измерений дипольных, квадрупольных и октапольных магнитных моментов.*

**Ключевые слова:** напряженность магнитного поля, точечный магнитометрический метод, дипольный магнитный момент, квадрупольный магнитный момент, октапольный магнитный момент.

#### Введение

В настоящее время в различных областях науки и техники требуется определять значение и направление напряженности магнитного поля. Такие задачи возникают при необходимости оценить влияние магнитного поля на магниточувствительные устройства, также в задачах идентификации объектов и космических исследованиях необходимо располагать информацией о пространственной конфигурации магнитного поля. Интегральной характеристикой магнитного поля является магнитный момент – один из важнейший контролируемых параметров физических тел, которые являются источником магнитного поля и, в частности, дипольный, квадрупольный и октапольный магнитный моменты.

Существующие методы измерения магнитного момента можно разделить на магнитометрические – т.н. точечные, основанные на измерении магнитной индукции в одной или нескольких точках пространства и интегральные, основанные на измерении магнитного потока.

**Постановка проблемы.** К недостаткам интегрального метода относится сложность конструкции

и большие размеры первичного измерительного преобразователя при измерении магнитного момента крупногабаритных объектов, а также значительные погрешности измерения. Точечные методы отличаются простотой первичных преобразователей. Однако они также имеют не высокую точность, связанную с недостаточной селективностью дипольного магнитного момента системой датчиков из полного спектра поля, что обусловлено несовершенством теоретических основ метода. В некоторых областях науки, в частности, космических исследованиях необходимы измерения квадрупольных и октапольных магнитных моментов. Применение интегральных методов для их измерения неизвестно, а распространенные точечные методы ограничиваются измерением дипольного магнитного момента.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Известно, что существуют точечные методы, имеющие высокую селективность, однако их применение ограничено измерениями лишь дипольного магнитного момента, а также они характеризуются использованием большого количества датчиков, что обуславливает определенные сложности при создании измерительной системы и подверженность

влиянию помех [1, 2]. Следует отметить неразвитость нормативной и эталонной базы измерений магнитного момента, особенно это касается метрологического обеспечения измерений квадрупольных и октупольных магнитных моментов [3, 4].

**Целью исследования** является совершенствование метрологического обеспечения единства магнитных измерений путем разработки совокупности эффективного точечного метода и средства измерения магнитных моментов  $n$ -го порядка источников внешнего магнитного поля.

### Результаты исследования

Сущность предложенного метода заключается в следующем: тремя трёхкомпонентными индукционными датчиками выполняются измерения компонент напряженности магнитного поля источника в плоскости XOY в точках, схема расположения которых относительно исследуемого источника изображена на рис. 1, где стрелками указано направление компонент напряженности поля в точках 1, 2, 3.

Затем по результатам измерения компонент напряженности внешнего магнитного поля объекта

$$\begin{aligned} H_{kx} &= \frac{1}{4\pi I_k^5} (2M_x x_k^2 - x_k a_{xx} + a_{3x}); \\ H_{ky} &= \frac{1}{4\pi I_k^5} (-M_y x_k^2 - x_k a_{yx} + a_{3y}); \\ H_{kz} &= \frac{1}{4\pi I_k^5} (-M_z x_k^2 - x_k a_{zx} + a_{3z}), \end{aligned}$$

где  $k = 1, 2, 3$ , составляем для трех пар точек (рис. 1) системы уравнений и решаем их методом Гаусса. После этого получаем систему из трех уравнений и решаем её относительно искомым величин с учётом соотношений

$$H_{kx} = E_{kx} k_f, H_{ky} = E_{ky} k_f, H_{kz} = E_{kz} k_f,$$

где  $k_f, \text{мЭ/мВ}$  – постоянная трёхкомпонентных датчиков;  $E_{kx}, E_{ky}, E_{kz}$  – измеренные электрические сигналы в  $k$ -й точке.

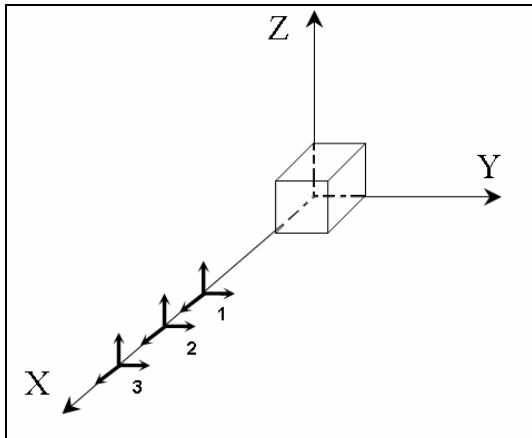


Рис. 1. Схема расположения датчиков относительно исследуемого источника поля

Для первой пары точек: № 1 ( $x_1, y_1 = z_1 = 0$ ) и № 2 ( $x_2, y_2 = z_2 = 0$ ) составляем три уравнения

$$\left. \begin{aligned} E_{1x} k_f r_1^5 - E_{2x} k_f r_2^5 &= 2M_x (x_1^2 - x_2^2) - (x_1 - x_2) a_{xx}; \\ E_{1y} k_f r_1^5 - E_{2y} k_f r_2^5 &= M_y (x_1^2 - x_2^2) - (x_1 - x_2) a_{yx}; \\ E_{1z} k_f r_1^5 - E_{2z} k_f r_2^5 &= -M_z (x_1^2 - x_2^2) - (x_1 - x_2) a_{zx}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Для второй пары точек: № 1 ( $x_1, y_1 = z_1 = 0$ ) и № 3 ( $x_3, 0, 0$ ) составляем три уравнения

$$\left. \begin{aligned} E_{1x} k_f r_1^5 - E_{3x} k_f r_3^5 &= 2M_x (x_1^2 - x_3^2) - (x_1 - x_3) a_{xx}; \\ E_{1y} k_f r_1^5 - E_{3y} k_f r_3^5 &= M_y (x_1^2 - x_3^2) - (x_1 - x_3) a_{yx}; \\ E_{1z} k_f r_1^5 - E_{2z} k_f r_2^5 &= -M_z (x_1^2 - x_3^2) - (x_1 - x_3) a_{zx}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Для второй пары точек: № 2 ( $x_2, 0, 0$ ) и № 3 ( $x_3, 0, 0$ ) составляем три уравнения

$$\left. \begin{aligned} E_{2x} k_f r_2^5 - E_{3x} k_f r_3^5 &= 2M_x (x_2^2 - x_3^2) - (x_2 - x_3) a_{xx}; \\ E_{2y} k_f r_2^5 - E_{3y} k_f r_3^5 &= M_y (x_2^2 - x_3^2) - (x_2 - x_3) a_{yx}; \\ E_{2z} k_f r_2^5 - E_{3z} k_f r_3^5 &= -M_z (x_2^2 - x_3^2) - (x_2 - x_3) a_{zx}. \end{aligned} \right\} (3)$$

Решая системы уравнений (1) – (3) методом Гаусса путем исключения из них неизвестных величин  $I_k$ , получаем новую систему уравнений с квадрупольными магнитными моментами  $a_{xx}, a_{yx}, a_{zx}$ :

$$\left. \begin{aligned} E_{12}^{yz} a_{xx} + E_{12}^{xz} a_{yx} + E_{12} a_{zx} &= E_I; \\ E_{23}^{yz} a_{xx} + E_{23}^{xz} a_{yx} + E_{23} a_{zx} &= E_{II}; \\ E_{13}^{yz} a_{xx} + E_{13}^{xz} a_{yx} + E_{13} a_{zx} &= E_{III}. \end{aligned} \right\} (4)$$

В этих уравнениях коэффициенты при неизвестных квадрупольных магнитных моментах будут равны

$$\begin{aligned} E_{12}^{yz} &= \begin{vmatrix} E_{1y} & E_{1z} \\ E_{2y} & E_{2z} \end{vmatrix}, E_{12}^{xz} = \begin{vmatrix} E_{1x} & E_{1z} \\ E_{2x} & E_{2z} \end{vmatrix}; \\ E_{12} &= \frac{1}{E_{2z}} \begin{vmatrix} E_{2x} & E_{12}^{xz} \\ E_{2y} & E_{12}^{yz} \end{vmatrix}; \\ E_{23}^{yz} &= \begin{vmatrix} E_{2y} & E_{2z} \\ E_{3y} & E_{3z} \end{vmatrix}, E_{23}^{xz} = \begin{vmatrix} E_{2x} & E_{2z} \\ E_{3x} & E_{3z} \end{vmatrix}; \\ E_{23} &= \frac{1}{E_{3z}} \begin{vmatrix} E_{3x} & E_{23}^{xz} \\ E_{3y} & E_{23}^{yz} \end{vmatrix}; \\ E_{13}^{yz} &= \begin{vmatrix} E_{1y} & E_{1z} \\ E_{3y} & E_{3z} \end{vmatrix}, E_{13}^{xz} = \begin{vmatrix} E_{1x} & E_{1z} \\ E_{3x} & E_{3z} \end{vmatrix}; \\ E_{13} &= \frac{1}{E_{3z}} \begin{vmatrix} E_{3x} & E_{13}^{xz} \\ E_{3y} & E_{13}^{yz} \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

а значения свободных членов  $E_I, E_{II}, E_{III}$  соответственно вычисляются по формулам:

$$E_I = (x_1 + x_2)(2E_{12}^{yz} M_x + E_{12}^{xz} M_y + E_{12} M_z);$$

$$E_{II} = (x_2 + x_3)(2E_{23}^{yz}M_x + E_{23}^{xz}M_y + E_{23}M_z);$$

$$E_I = (x_1 + x_3)(2E_{13}^{yz}M_x + E_{13}^{xz}M_y + E_{13}M_z).$$

Решение системы уравнений (4) с помощью матриц имеет вид

$$\begin{pmatrix} a_{xx} \\ a_{yx} \\ a_{zx} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} A_{11}E_I + A_{21}E_{II} + A_{31}E_{III} \\ A_{12}E_I + A_{22}E_{II} + A_{32}E_{III} \\ A_{13}E_I + A_{23}E_{II} + A_{33}E_{III} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – главный определитель системы уравнений:

$$\Delta = \begin{vmatrix} E_{12}^{yz} & E_{12}^{xz} & E_{12} \\ E_{23}^{yz} & E_{23}^{xz} & E_{23} \\ E_{13}^{yz} & E_{13}^{xz} & E_{13} \end{vmatrix};$$

$A_{nk}$  ( $n = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$ ) – коэффициенты, значения которых определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \begin{vmatrix} E_{23}^{xz} & E_{23} \\ E_{13}^{xz} & E_{13} \end{vmatrix}, A_{21} = -\begin{vmatrix} E_{12}^{xz} & E_{12} \\ E_{13}^{xz} & E_{13} \end{vmatrix}, A_{31} = \begin{vmatrix} E_{12}^{xz} & E_{12} \\ E_{23}^{xz} & E_{23} \end{vmatrix}, \\ A_{12} &= \begin{vmatrix} E_{23}^{yz} & E_{23} \\ E_{13}^{yz} & E_{13} \end{vmatrix}, A_{22} = \begin{vmatrix} E_{12}^{yz} & E_{12} \\ E_{13}^{yz} & E_{13} \end{vmatrix}, A_{32} = -\begin{vmatrix} E_{12}^{yz} & E_{12} \\ E_{23}^{yz} & E_{23} \end{vmatrix}, \\ A_{13} &= \begin{vmatrix} E_{23}^{yz} & E_{23}^{xz} \\ E_{13}^{yz} & E_{13}^{xz} \end{vmatrix}, A_{23} = -\begin{vmatrix} E_{12}^{yz} & E_{12}^{xz} \\ E_{13}^{yz} & E_{13}^{xz} \end{vmatrix}, A_{33} = \begin{vmatrix} E_{12}^{xz} & E_{12}^{yz} \\ E_{23}^{xz} & E_{23}^{yz} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Найденные значения квадрупольных магнитных моментов (5), которые являются функцией от компонент дипольных магнитных моментов  $M_x, M_y, M_z$  и координат  $x_0, y_0, z_0$  эксцентричного результирующего диполя источника внешнего магнитного поля, запишем в развернутой форме в виде выражений

$$\begin{aligned} a_{xx} &= 4M_x x_0 + 3M_y y_0 + 3M_z z_0; \\ a_{yx} &= 4M_y x_0 - 3M_x y_0; \\ a_{zx} &= 4M_z x_0 - 3M_x z_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решая выражения (6) относительно неизвестных величин  $x_0, y_0, z_0$ , получим

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{1}{\Delta} (B_{11}a_{xx} + B_{21}a_{yx} + B_{31}a_{zx}); \\ y_0 &= \frac{1}{\Delta} (B_{12}a_{xx} + B_{22}a_{yx} + B_{32}a_{zx}); \\ z_0 &= \frac{1}{\Delta} (B_{13}a_{xx} + B_{23}a_{yx} + B_{33}a_{zx}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\Delta$  – главный определитель уравнений (6)

$$\Delta = \begin{vmatrix} 4M_x & 3M_y & 3M_z \\ 2M_y & -3M_x & 0 \\ 2M_z & 0 & 3M_x \end{vmatrix};$$

$B_{nk}$  ( $n = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$ ) – коэффициенты, значения которых определяются выражениями:

$$B_{11} = -9M_x^2, \quad B_{21} = -9M_x M_y, \quad B_{31} = 9M_x M_z,$$

$$B_{12} = -6M_x M_y, \quad B_{22} = 6(2M_x^2 M_z^2), \quad B_{32} = 6M_y M_z,$$

$$B_{13} = 6M_x M_z, \quad B_{23} = 6M_y M_z, \quad B_{33} = -6(2M_x^2 M_y^2).$$

По найденным значениям координат  $x_0, y_0, z_0$  (7) определяем остальные неизвестные квадрупольные моменты

$$a_{xy} = 2M_x y_0 - 3M_y x_0;$$

$$a_{xz} = 2M_x z_0 - 3M_z x_0;$$

$$a_{yy} = 3M_x x_0 + 4M_y y_0 + 3M_z z_0;$$

$$a_{yz} = 2M_y z_0 - 3M_z y_0;$$

$$a_{zy} = 2M_z y_0 - 3M_y z_0;$$

$$a_{zz} = 3M_x x_0 + 3M_y y_0 + 4M_z z_0$$

и октупольные магнитные моменты

$$a_{3x} = M_x (2x_0^2 - y_0^2 - z_0^2) + 3x_0 (M_y y_0 + M_z z_0);$$

$$a_{3y} = M_y (2y_0^2 - x_0^2 - z_0^2) + 3y_0 (M_x x_0 + M_z z_0);$$

$$a_{3z} = M_z (2z_0^2 - x_0^2 - y_0^2) + 3z_0 (M_x x_0 + M_y y_0).$$

Определение дипольных, квадрупольных и октупольных магнитных моментов по результатам измерения напряженности в трех точках внешнего магнитного поля исследуемого источника типа «черный ящик» позволяет легко вычислить уровень поля источника в заданных зонах окружающего пространства:

$$H_x = \frac{1}{4\pi^5} [M_x (2x^2 - y^2 - z^2) + 3x(M_y y + M_z z) - xa_{xx} + ya_{xz} + za_{zx} + a_{3x}];$$

$$H_y = \frac{1}{4\pi^5} [M_y (2y^2 - x^2 - z^2) + 3y(M_x x + M_z z) + xa_{yx} - ya_{yy} + zy_{yz} + a_{3y}];$$

$$H_z = \frac{1}{4\pi^5} [M_z (2z^2 - x^2 - y^2) + 3z(M_x x + M_y y) + xa_{zx} + ya_{zy} - za_{zz} + a_{3z}];$$

и определить пространственную конфигурацию внешнего магнитного поля источника (рис. 2, 3).

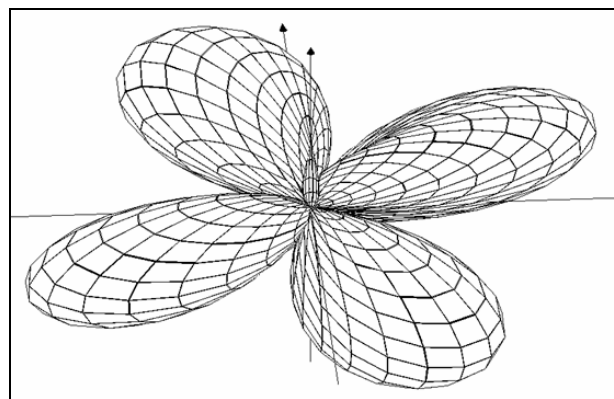


Рис. 2. Квадрупольная составляющая внешнего магнитного поля

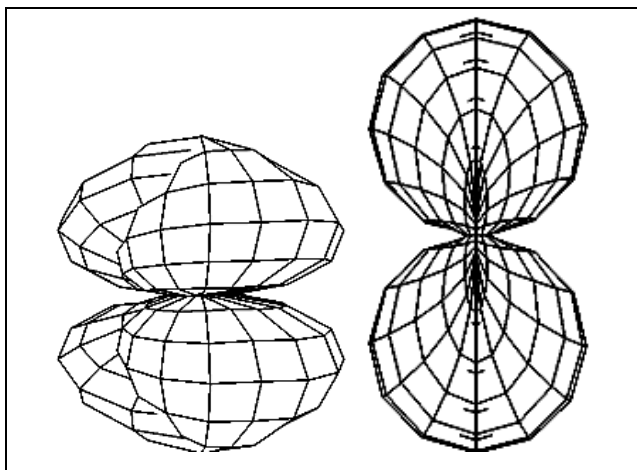


Рис. 3. Пространственная конфигурация внешнего магнитного поля объекта при различных значениях компонент магнитного момента

### Выводы

1. В статье рассмотрен магнитометрический метод измерения – “метод трех точек”, позволяющий определять магнитные моменты второго и третьего порядков.

2. Результаты могут быть использованы при решении задач электромагнитной совместимости, идентификации объектов по их магнитным образам, при создании измерительных систем и испытательных магнитометрических стендов.

3. Необходима разработка новых нормативных документов с учетом современных требований различных отраслей техники и их гармонизация с международными нормативными документами, поскольку действующие нормативные документы не устанавливают методы и средства измерения магнитных моментов высших порядков – квадруполь-

ных, октупольных и т.д., необходимых для точного описания внешнего магнитного поля технических объектов их идентификации и позиционирования и т.д, а также необходимо создание образцовых мер магнитных моментов высших порядков.

### Список литературы

1. Дегтярёв, А.В. Двенадцатиточечный метод и трехмодульная измерительная система для пространственного гармонического анализа магнитного поля [Текст] / А.В. Дегтярёв // *Электротехника и электромеханика*. – 2006. – № 6. – С. 57-59.

2. Дегтярёв, А.В. Двухмодульная система измерения зональной гармоники первого порядка магнитного поля технических объектов [Текст] / А.В. Дегтярёв // *Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ'2005) – Том VII – Международная конференция “Метрология и измерительная техника” (МКМИТ'2005)*. – X., 2005. – С. 156-159.

3. ГОСТ 8.231-84 Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения магнитного момента и магнитной восприимчивости [Текст]. – Введ. 01.08.83.-М.: Изд-во стандартов, 1984.-5 с.

4. ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля [Текст]. – Введ. 01.07.93. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 5 с.

Поступила в редколлегию 22.08.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

### ТОЧКОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ПРОСТОРОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ОБ'ЄКТА

О.В. Дегтярьов

У результаті дослідження на основі моделювання зовнішнього магнітного поля джерела у вигляді ексцентричного магнітного моменту запропонований точковий магнітометричний метод вимірювання параметрів і просторової конфігурації магнітного поля, заснований на визначенні його дипольних, квадрупольних і октупольних магнітних моментів. Метод заснований на вимірюванні компонентів напруженості поля в трьох точках простору з певними координатами й визначенні за результатами вимірювань дипольних, квадрупольних і октупольних магнітних моментів.

**Ключові слова:** напруженість магнітного поля, точковий магнітометричний метод, дипольний магнітний момент, квадрупольний магнітний момент, октупольний магнітний момент.

### POINT METHOD OF MEASURING OF PARAMETERS AND SPATIAL CONFIGURATIONS OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF SOURCE

A.V. Degtyariov

As a result of research on the basis of design of external magnetic-field of source as an eccentric magnetic moment the point magnetometer method of measuring of parameters and spatial configuration of magnetic-field is offered, based on determination of his dipole, quadrupole and octupole magnetic moments. A method is based on measuring component of the field tension in three points of space with certain coordinates and determination on results measurings of dipole, quadrupole and octupole magnetic moments.

**Keywords:** tension of magnetic-field, point magnetometer method, dipole magnetic moment, quadrupole magnetic moment, octupole magnetic moment.