

Литература

1. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой [Текст] / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. — К. : Наукова думка, 1972. — 221 с.
2. Гавриш П. А. Совершенствование технологии производства порошковой проволоки [Текст] / П. А. Гавриш, Е. В. Касова, В. В. Чигарев, И. В. Серов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — Запорозьке, ЗНТУ. — № 2. — 2005. — С. 29–33.
3. Гавриш П. А. Зниження розбризкування при зварюванні міді та сталі [Текст] / В. В. Чигарьов, І. В. Серов // Вісник Житомирського державного технічного університету, Житомир. — № 2(37). — 2006. — С. 3–8.
4. Гавриш П. А. Вплив швидкості зварювання на якість зварного з'єднання міді [Текст] / П. А. Гавриш // Вісник Хмельницького національного університету, 2005. — № 6. — Т. 2. — С. 75–78.
5. Рябов В. Р. Сварка разнородных металлов и сплавов [Текст] / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. — М. : Машиностроение, 1984. — 239 с.
6. А. с. 1606296 СССР, МКИ В23К 35/362. Флюс для сварки меди [Текст] / П. А. Гавриш, А. В. Грановский, В. Т. Катренко, В. Д. Кассов (СССР). — № 4436292/31-27; Заявлено 06.06.88; Опубл. 15.11.90; Бюл. № 42. — 3 с.
7. А. с. 1538395 СССР, МКИ В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / В. М. Карпенко, А. В. Грановский, Н. А. Макаренко, П. А. Гавриш (СССР). — № 4418894/31-27; Заявлено 03.05.88; Приказ о снятии грифа ДСП № 06-154 от 04.11.2010 г.
8. А. с. 1540173 СССР, МКИ В23К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / В. М. Карпенко, А. В. Грановский, Н. А. Макаренко, П. А. Гавриш (СССР). — № 4442783/31-27; Заявлено 20.06.88; Приказ о снятии грифа ДСП № 06-154 от 04.11.2010 г.
9. Салин В. Н. Статистика: учебное пособие [Текст] / В. Н. Салин, Э. Ю. Чурилова, Е. П. Шпаковская. — М. : КНОРУС, 2007. — 188 с.

*Розглядається застосування мультипольної моделі та моделі сферичних гармонік для нормування рівня магнітного поля, яке створюється технічним об'єктом.*

*Ключові слова:* нормування, магнітне поле, мультиполь, гармоніка.

*Рассматривается применение мультипольной модели и модели сферических гармоник для нормирования уровня магнитного поля, создаваемого техническим объектом.*

*Ключевые слова:* нормирование, магнитное поле, мультиполь, гармоника.

*The application of multipole model and models of spherical harmonics for a normalization of a level of a magnetic field created of technical objects is considered.*

*Keywords:* normalization, magnetic field, multipole, harmonic.

УДК 621.317.4

# О НОРМИРОВАНИИ УРОВНЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ

**А. В. Гетьман**

Кандидат технических наук

Зав. отделом № 20 Научно-технического центра  
магнетизма технических объектов НАН Украины  
ул. Индустриальная, 19, г. Харьков, Украина, 61109  
**Контактный тел.:** (0572) 99-11-75. **Факс:** 99-21-62

**E-mail:** ntcmt@ukrpost.ua

## 1. Введение

Для целого ряда технических объектов (ТО) критичным с точки зрения их нормального функционирования является уровень воздействующего внешнего магнитного поля. Особенно актуальна в этом плане защита от негативного воздействия магнитного поля для электронных компонентов объектов космической и авиационной техники, систем управления в энергетике [1, 2] и т. д. Так, например, при создании малых космических аппаратов (КА) приходится решать задачу уменьшения негативного влияния помехонесущего магнитного поля (МП), создаваемого бортовой аппаратурой, на магниточувствительные элементы КА [3]. Это необходимо, прежде всего, для защиты бортового магнитометра КА от магнитной помехи, создаваемой его комплектующими и узлами, что призвано обеспечить точность ориентации

спутника по данным измерений магнитного поля Земли на орбите.

Традиционно эту задачу решают на основе многодипольной модели КА [4]. Для чего измеряют дипольный магнитный момент каждого из конструктивных элементов КА, а затем рассчитывают вклад в суммарную магнитную индукцию в зоне установки магниточувствительных элементов (например, бортового магнитометра) с последующей реализацией мероприятий по минимизации МП до допустимого уровня.

Однако такой подход, основанный на единственной характеристике пространственного распределения МП — дипольном магнитном моменте, имеет существенные недостатки. Прежде всего, это невозможность использования модели вблизи поверхности комплексуемых, поскольку при плотной компоновке аппаратуры внутри КА на расстояниях между его отдельными комплектующими

дипольная модель источников МП КА имеет существенную погрешность [5].

Кроме того, дипольная модель не позволяет локализовать по результатам измерений источники МП внутри ТО, что существенно сокращает арсенал практических средств оптимизации его магнитной структуры при обеспечении нормированного уровня магнитного поля. В этой связи представляется целесообразным перейти к мультипольной модели источников МП внутри ТО, позволяющей с достаточной точностью определять МП вблизи поверхности комплектующих, а также анализировать распределение источников внутри ТО по данным измерений его мультипольных магнитных моментов.

Целью работы является теоретическое обоснование возможности применения для нормирования уровня магнитного поля ТО его мультипольной модели, использующей в качестве ограничивающих три параметра — модули дипольного, квадрупольного и октупольного магнитных моментов.

## 2. Модели источника магнитного поля

Для аналитически точного описания МП вне сферы, содержащей источник, независимо от сложности его магнитоактивной части может быть использована мультипольная модель [6–8]. В основе модели лежит универсальное представление скалярного потенциала  $U$  внешнего МП в виде суммы вкладов полей элементарных точечных источников — мультиполей:

$$U = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{\infty} M_i \frac{(-1)^i}{i!} \frac{\partial^i}{\partial l_1 \partial l_2 \dots \partial l_i} \frac{1}{r}, \quad (1)$$

где  $M_i$  — модуль мультиполя порядка  $i$ ;  $r$  — расстояние от мультиполя до точки наблюдения МП;  $l_i$  — ось пространственной ориентации мультиполя (мультиполь порядка  $i$  имеет собственных  $i$  осей ориентации).

Согласно концепции применения мультипольной модели реальный источник МП заменяют некоторым конечным набором мультиполей, расположенных в центре сферы, полностью охватывающей ТО. Наиболее наглядны представления МП мультиполей, имеющих одинаковую ориентацию собственных осей в (1), что иллюстрирует рис. 1.

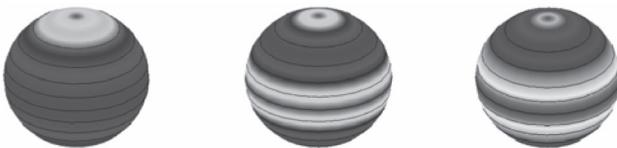


Рис. 1. Распределение потенциала на сфере для аксиальных мультиполей (для диполя, квадрупольного и октуполя, соответственно)

В самом общем случае (необязательно совпадающих осей), ориентация каждой  $i$ -й оси мультиполя определяется через косинусы с декартовыми осями  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ , присутствующими в (1) в дифференциальном операторе:

$$\frac{\partial}{\partial l_i} = \alpha_i \frac{\partial}{\partial x} + \beta_i \frac{\partial}{\partial y} + \gamma_i \frac{\partial}{\partial z}. \quad (2)$$

При этом легко видеть, что для диполя ( $i = 1$ ) потенциал по (1) приобретает наиболее простой вид [9]:

$$U_1 = \frac{1}{4\pi} M_1 \frac{\alpha x + \beta y + \gamma z}{r^3} = \frac{1}{4\pi} \frac{M_x x + M_y y + M_z z}{r^3} = \frac{1}{4\pi} \frac{(\vec{M}, \vec{r})}{r^3} \quad (3)$$

здесь использовано определение декартовых проекций  $M_x, M_y, M_z$  магнитного диполя через его величину (модуль) и направляющие косинусы. Для потенциала мультиполя более высокого порядка из (1) получаются более сложные выражения. Например, для потенциала квадруполя ( $i = 2$ ) имеем:

$$U_2 = \frac{1}{4\pi} \frac{M_2}{2r^3} \left[ \left( \gamma_1 \gamma_2 - \frac{\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2}{2} \right) (3 \cos^2 \theta - 1) + (\alpha_1 \gamma_2 + \gamma_1 \alpha_2) 3 \cos \theta \sin \theta \cos \varphi + (\beta_1 \gamma_2 + \beta_1 \alpha_2) 3 \cos \theta \sin \theta \sin \varphi + (\alpha_1 \alpha_2 - \beta_1 \beta_2) \frac{3}{2} \sin^2 \theta \cos 2\varphi + (\alpha_1 \beta_2 + \beta_1 \alpha_2) \frac{3}{2} \sin^2 \theta \sin 2\varphi \right]. \quad (4)$$

Аналогичным подходом для определения внешнего МП ТО является применение модели пространственных гармоник скалярного потенциала [10], представленного в виде ряда на основе сферических гармоник  $Y_i$ :

$$U = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{\infty} M_i \frac{Y_i}{r^{i+1}} = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{r^{i+1}} \sum_{m=0}^i P_i^m(\cos \theta) \{g_i^m \cos m\varphi + h_i^m \sin m\varphi\}, \quad (5)$$

где  $g_i^m$  и  $h_i^m$  — мультипольные коэффициенты источника — мультиполя  $M_i$ ;  $r, \theta, \varphi$  — сферические координаты точки наблюдения МП;  $P_i^m(\cos \theta)$  — присоединенные функции Лежандра первого рода.

Для потенциала диполя из (5) получаем:

$$U_1 = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r^2} \times [g_1^0 P_1^0(\cos \theta) + g_1^1 P_1^1(\cos \theta) \cos \varphi + h_1^1 P_1^1(\cos \theta) \sin \varphi], \quad (6)$$

что, сравнивая с (3), дает выражения для мультипольных коэффициентов диполя через его декартовы проекции

$$g_1^0 = M_z; \quad g_1^1 = M_x; \quad h_1^1 = M_y. \quad (7)$$

Для потенциала квадруполя представление через мультипольные коэффициенты имеет вид:

$$U_2 = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r^3} \left[ g_2^0 P_2^0(\cos \theta) + g_2^1 P_2^1(\cos \theta) \cos \varphi + h_2^1 P_2^1(\cos \theta) \sin \varphi + g_2^2 P_2^2(\cos \theta) \cos 2\varphi + h_2^2 P_2^2(\cos \theta) \sin 2\varphi \right]. \quad (8)$$

Из сравнения (4) и (8) следует связь между мультипольными коэффициентами и направляющими косинусами осей квадруполя:

$$g_2^0 = M_2 \left( \gamma_1 \gamma_2 - \frac{\alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2}{2} \right) g_2^1 = \frac{M_2}{2} (\alpha_1 \gamma_2 + \gamma_1 \alpha_2) h_2^1 = \frac{M_2}{2} (\beta_1 \gamma_2 + \beta_1 \alpha_2);$$

$$g_2^2 = \frac{M_2}{4} (\alpha_1 \alpha_2 - \beta_1 \beta_2) h_2^2 = \frac{M_2}{4} (\alpha_1 \beta_2 + \beta_1 \alpha_2). \quad (9)$$

Из (9) следует, что наибольшему значению мультипольного коэффициента соответствует такая ориентация мультиполя, когда его собственные оси направлены по оси аппликата.

Учитывая взаимосвязь между направляющими косинусами каждой оси:

$$\sqrt{(\alpha_1)^2 + (\beta_1)^2 + (\gamma_1)^2} = 1, \sqrt{(\alpha_2)^2 + (\beta_2)^2 + (\gamma_2)^2} = 1, \quad (10)$$

и используя значения мультипольных коэффициентов в (9), могут быть вычислены направления собственных осей и модуль мультиполя.

Таким образом, для определения величины (модуля) мультипольного магнитного момента достаточно знать величины мультипольных коэффициентов сферических гармоник его МП.

### 3. Изодинамы магнитного поля мультиполей

Для оценки уровня магнитного поля, создаваемого ТО, на практике, как правило, применяют модуль магнитной индукции, который для условия воздушной среды, окружающей источник поля, может быть заменен модулем напряженности МП:

$$\begin{aligned} |\vec{B}| &= \mu\mu_0 |\vec{H}| = \mu\mu_0 \sqrt{(H_x)^2 + (H_y)^2 + (H_z)^2} = \\ &= \mu\mu_0 \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Проведем оценку максимального магнитного поля, создаваемого на сфере диполем, квадруполем и октуполем на основании (1) и (11).

Для чего рассмотрим поверхности, образованные по условию равного модуля напряженности магнитного поля, для первой тройки аксиальных мультиполей, показанные на рис. 2.

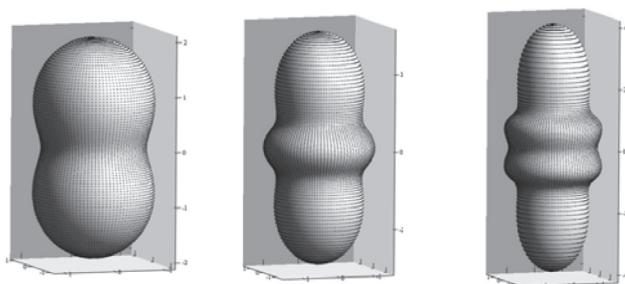


Рис. 2. Изодинамические поверхности аксиального диполя, квадруполя и октуполя

Из анализа изодинамических поверхностей магнитного поля следует, что максимумы модуля напряженности МП для всех трех зональных мультиполей лежат на оси аппликата, т. е. на собственной оси ориентации. Другими словами уровень МП в направлении оси аппликата

будет максимальным, а значит, справедливы выражения  $H_{\max}$  для диполя, квадруполя, и октуполя соответственно:

$$\begin{aligned} |H_{\max}^{(1)}| &= \frac{1}{4\pi} \frac{2M_1}{R^3}; \quad |H_{\max}^{(2)}| = \frac{1}{4\pi} \frac{3M_2}{R^4}; \\ |H_{\max}^{(3)}| &= \frac{1}{4\pi} \frac{4M_3}{R^5}. \end{aligned} \quad (12)$$

Если учесть произвольность выбора осей координат внутри сферы, охватывающей ТО, а также принять во внимание, что модуль мультиполя инвариантен его ориентации, то всегда возможно выбрать ось аппликата так, чтобы она совпала с собственной осью мультиполя. Поэтому для максимального уровня напряженности МП, создаваемого при любой ориентации мультиполя на сфере радиуса  $R$ , выражения (12) будут также справедливы.

Очевидно, что выражения (12) могут быть использованы на практике для ограничения (нормирования) максимального уровня МП создаваемого на заданном расстоянии (сфере радиуса  $R$ ) от ТО. При этом, естественно положить, что нормирование производится вблизи поверхности ТО, где вклады в суммарное магнитное поле от диполя, квадруполя и октуполя имеют одинаковый порядок величины [5].

В частности, при ограничении уровня МП, создаваемого комплектами КА, предлагается в качестве норм использовать модули дипольного, квадрупольного и октупольного магнитных моментов. Для чего непосредственно из (12) могут быть получены выражения, связывающие максимально допустимые значения модулей первой тройки мультипольных магнитных моментов с нормируемым значением напряженности магнитного поля:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{2\pi}{3} |H_{\max}| R^3; \quad M_2 = \frac{4\pi}{9} |H_{\max}| R^4; \\ M_3 &= \frac{\pi}{3} |H_{\max}| R^5. \end{aligned} \quad (13)$$

### 4. Выводы

В работе проведен анализ пространственного распределения МП, создаваемого тремя мультиполями: диполем, квадруполем и октуполем. В результате анализа установлено, что наибольшие значения модуля напряженности МП характерны для зональной ориентации мультиполя, при которой максимумы поля лежат на аксиальной оси. С использованием чего обоснована возможность расчета максимального уровня МП по значению модуля мультипольного магнитного момента.

Для практического использования при нормировании уровня магнитного поля на сфере, охватывающей технический объект, получены простые соотношения между значениями модулей дипольного, квадрупольного и октупольного магнитных моментов источника и максимальной напряженностью магнитного поля.

### Литература

1. Шидловский А. К. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов [Текст] / А. К. Шидловский, В. Ю. Розов // Техническая электродинамика. — 1996. — № 1. — С. 3—9.
2. Волохов С. А. Новое в определении уровней магнитных полей, допустимых и безопасных расстояний судового электрооборудования и судовых электронных систем в соответствии с требованиями международных стандартов [Текст] / С. А. Волохов, С. Т. Гузев, Н. Е. Жакобин, Ю. И. Назаров, В. И. Румакова // Труды международной конференции по судостроению (ISC). —

- Секция Ф. Судовая электродинамика, магнетизм и гидродинамика. — С. Петербург: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 1994. — С. 169–176.
3. Kildishev A. V. Measurement of the Spacecraft Main Magnetic Parameters [Текст] / A. V. Kildishev, S. A. Volokhov, J. D. Saltykov // IEEE Systems Readiness Technology Conference (AUTOTESTCON'97). — Anaheim (California). — 1997. — P. 669–675.
  4. Розов В. Ю. Магнетизм космических аппаратов [Текст] / В. Ю. Розов, А. В. Гетьман, С. В. Петров // Технічна електродинаміка. — 2010. — Тематичний випуск. Ч. 2. Проблеми сучасної електротехніки. — С. 144–147.
  5. Гетьман А. В. Пространственный гармонический анализ магнитного поля датчика нейтрального компонента плазмы [Текст] / А. В. Гетьман // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2010. — № 6/5. — С. 35–38.
  6. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. [Текст] / Дж. А. Стрэттон. — М. — Л.: Гостехиздат, 1948. — 539 с.
  7. Шимони К. Теоретическая электротехника [Текст] / К. Шимони. — М.: Мир, 1964. — 774 с.
  8. Smythe W. Static and Dynamic Electricity [Текст] / W. Smythe. — ISBN: 0891169172, Publisher: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. — 623 p.
  9. Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику [Текст] / А. Д. Нестеренко. — К.: Наукова думка, 1969. — 352 с.
  10. Яновский Б. М. Земной магнетизм [Текст] / Б. М. Яновский. — Часть 1. — Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1964. — 446 с.

*Установлена ідентичність типу кристалічної структури кобальту, одержаного електроосадженням у розчині та затвердінням розплаву в насиченому середовищі водню. Одержаний результат підтверджує достовірність явища електрохімічного фазоутворення металевих матеріалів через стадію рідкого стану.*

*Ключові слова: водень, метал, структура, фазовий склад.*

*Установлена ідентичність типу кристалічної структури кобальта, полученного електроосадженням в розстворі та затвердженням расплава в насиченой среде водорода. Полученный результат подтверждает достоверность явления электрохимического фазообразования металлических материалов через стадию жидкого состояния.*

*Ключевые слова: водород, металл, структура, фазовый состав.*

*The identity of crystalline structure type of cobalt obtained by electrodeposition in solution and by solidification of melt in saturated environment of hydrogen is found. The obtained result proves the validity of the phenomenon of electrochemical phase formation of metallic materials through a stage of liquid state.*

*Keywords: hydrogen, metal, structure, phase composition.*

УДК 669.268

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИИ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ В СРЕДЕ ВОДОРОДА

**О. Б. Гирин**

Доктор технических наук, профессор,  
проректор по научной работе, заведующий кафедрой\*

**Контактный тел.:** (0562) 46-13-21,

**факс:** (0562) 47-33-97

**E-mail:** girin@ua.fm

**В. В. Трофименко**

Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник, доцент\*

**Контактный тел.:** (056) 753-58-29,

**факс:** (0562) 33-71-36

\*Кафедра материаловедения

Украинский государственный

химико-технологический университет

пр. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, Украина, 49005

### 1. Введение

Недавно было установлено явление электрохимического фазообразования металлических материалов через стадию жидкого состояния [1, 2]. Достоверность обнаруженного явления подтверждается образованием интерметаллидов [3], карбидов [4] и эвтектик [5] в сплавах при электроосаждении в водных растворах их солей.

Цель данной работы состояла в дальнейшей экспериментальной проверке достоверности открытого явления.

### 2. Идея работы

Идея серии экспериментов, направленных на выяснение достоверности рассматриваемого явления, состояла в следующем. Известно, что расплавленные полиморфные металлы затвердевают в насыщенной среде водорода с образованием кристаллической структуры, тип которой соответствует промежуточной модификации [6]. С другой стороны известно, что структурообразование электроосаждаемых металлов также происходит в насыщенной среде водорода [7].

Если электроосаждаемые полиморфные металлы действительно проходят стадию жидкого состояния, то