

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДАТЧИКА ПЛАЗМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**А.В.Гетьман**, канд.техн.наук

Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,  
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина.

e-mail: [getmanav@mail.ru](mailto:getmanav@mail.ru)

*Проведен пространственный гармонический анализ магнитного поля, создаваемого магнитоактивной частью датчика нейтрального компонента плазмы из состава научной аппаратуры космического аппарата «Микросат», на основе которого проведена оценка создаваемой датчиком магнитной помехи в зоне установки бортового магнитометра. Библ. 6, рис. 4.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, магнитный момент, пространственная гармоника, сигнатура магнитного потока.

**Введение.** Одной из проблем, возникающих при создании малых космических аппаратов (КА), является обеспечение магнитной совместимости его комплектующих и аппаратуры полезной нагрузки. Общий подход [1] к решению этой проблемы основан на уменьшении величины магнитной индукции, создаваемой каждым из блоков КА. К эффективным способам уменьшения величины внешнего магнитного поля оборудования относятся конструктивные изменения аппаратуры, основанные на антисимметричной ориентации постоянных магнитов, входящих в состав ее радиоэлектронных компонентов, а также экранирование магнитоактивной части приборов с ферромагнитными экранами [2]. При этом первый способ предусматривает переориентацию встречно постоянных магнитов внутри блока либо установку внутри него дополнительного компенсационного магнита, величину и ориентацию которого находят, исходя из критерия равенства нулю суммарного магнитного момента блока КА. Магнитные экраны наиболее эффективны в замкнутом исполнении, поэтому их изготавливают в виде оболочек, которые либо охватывают источники магнитного поля, чем уменьшают уровень создаваемой ими магнитной помехи, либо охватывают магниточувствительную часть аппаратуры, чем уменьшают уровень воздействующей извне магнитной помехи.

В случае совместного применения обоих способов уменьшения создаваемой магнитной помехи контроль результирующего магнитного поля комплектующего КА является предметом анализа его составляющих, создаваемых индуктивной и остаточной намагниченностями экрана и постоянных магнитов.

С целью уменьшения величины магнитной индукции, создаваемой в зоне установки бортового магнитометра аппаратурой КА, в работе на примере датчика плазмы из состава научной аппаратуры КА «Микросат», разрабатываемого ГП «КБ «Южное», проведен анализ магнитного поля.

**Исходные положения.** В работе исследуется датчик нейтрального компонента плазмы (датчик DN), магнитоактивная часть которого состоит из четырех кольцеобразных магнитов, имеющих размеры  $\varnothing 40\text{--}\varnothing 28 \times 10$  мм и магнитный момент  $M=5,5 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ , а также охватывающего их ферромагнитного экрана 3 (рис. 1).

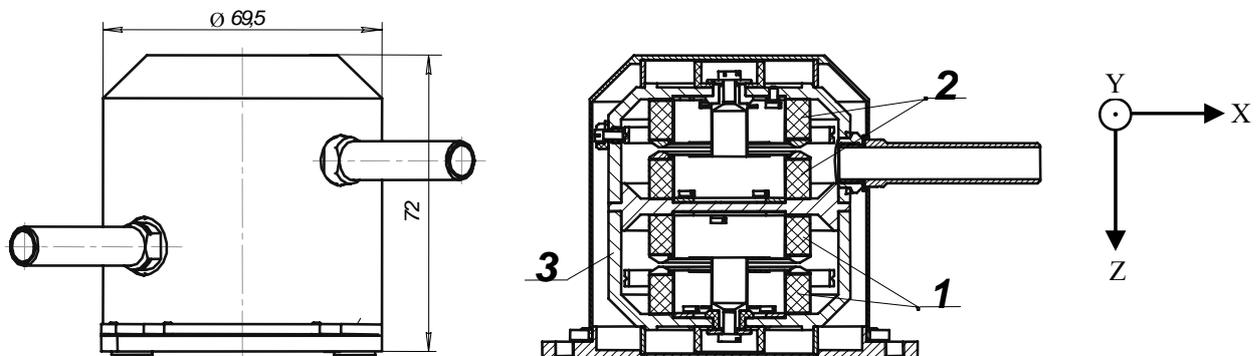


Рис. 1

Пара 1 нижних на рис. 1 кольцевых магнитов ориентирована северным полюсом вверх, а пара 2 верхних магнитов – северным полюсом вниз.

Такое осесимметричное расположение и антисимметричная ориентация четырех постоянных магнитов позволяют в первом приближении заменить их эквивалентными осевыми дипольным и квадрупольным магнитными моментами (ММ). При этом величина дипольного магнитного момента системы из четырех магнитов в системе координат КА была измерена и равна

$$\sum_{i=1}^4 \vec{M}_i \approx \left( \sum_{i=1}^4 \vec{M}_i \right)_z = -0,06 \text{ A} \cdot \text{м}^2. \quad (1)$$

Величина осевого квадрупольного ММ четырех магнитов может быть найдена с помощью представления магнитов в виде точечных диполей на основе выражений из [3]

$$M_{\text{кв.}} = 4l_{\text{ср.}} M = -0,66 \text{ A} \cdot \text{м}^3, \quad (2)$$

где  $l_{\text{ср.}} = 0,03 \text{ м}$  – среднее расстояние между центрами встречно ориентированных постоянных магнитов.

Довольно большое значение квадрупольного ММ четверки постоянных магнитов оправдывает применение в конструкции датчика DN ферромагнитного экрана для уменьшения его внешнего магнитного поля.

### Сферические гармоники магнитного поля.

Для анализа магнитной индукции, создаваемой датчиком DN в областях установки бортового и научного магнетометров, воспользуемся представлением [4]

$$\vec{B} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{r^{n+1}} \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos\theta) \{g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi\} \right), \quad (3)$$

где  $g_n^m$  – мультипольные коэффициенты;  $r$  – расстояние от датчика DN до магнетометра;  $\theta, \varphi$  – сферические координаты магнетометра в системе координат, связанной с датчиком DN.

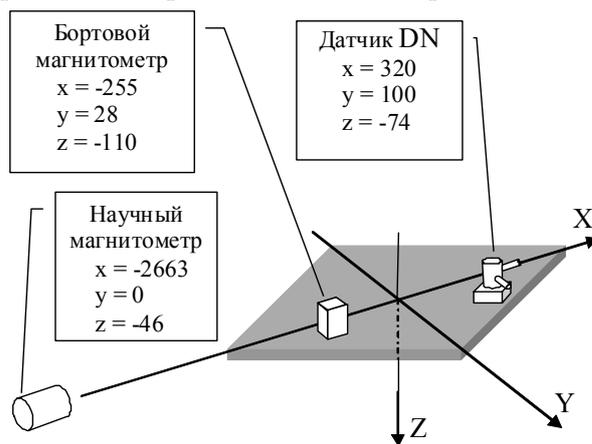


Рис. 2

Декартовы координаты, связанные с КА, бортового и научного магнетометров, а также датчика DN показаны на рис. 2.

Относительно большое расстояние между бортовым магнетометром и датчиком (более 7 габаритных размеров датчика) позволяет воспользоваться свойством быстрого уменьшения относительных вкладов гармоник старших степеней в магнитную индукцию из (3) при удалении от источника магнитного поля. Это позволяет ограничить сумму в (3), оставив только четыре слагаемых: три проекции дипольной гармоники и вклад осевого квадрупольного мультипольного коэффициентом  $g_2$ .

Учитывая, что магнетометры и датчик можно считать лежащими на одной прямой, то с достаточной для инженерных расчетов точностью для оценки магнитной индукции, создаваемой постоянной намагниченностью датчика DN в областях установки магнетометров, выражение (3) может быть заменено на представления

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( 2 \frac{g_1^1}{r^3} + \frac{3}{2} \frac{g_2^1}{r^4} \right), \quad B_y = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{h_1^1}{r^3} \right), \quad B_z = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{g_1^1}{r^3} \right). \quad (4)$$

Для проведения на основе (4) анализа магнитного поля, создаваемого датчиком DN, были экспериментально определены величины его сферических гармоник (мультипольных магнитных моментов) с помощью контурной измерительной системы. Схема эксперимента, проведенного согласно рекомендациям [1] для шести ориентаций осей датчика DN относительно нормали N измерительной обмотки контурной измерительной системы [5], показана на рис. 3.

Используя известную методику [6] определения вкладов сферических гармоник интегрированием магнитных сигнатур, а также, исключая вклад от индуктивной намагниченности ферромагнитного экрана магнитным полем Земли, были получены следующие величины мультипольных коэффициентов сферических гармоник постоянного внешнего магнитного поля датчика DN

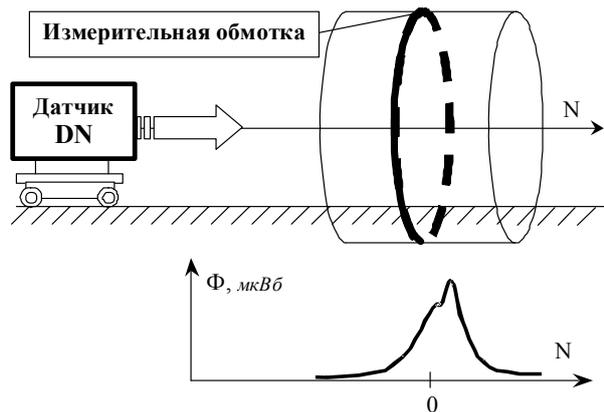


Рис. 3

ший вклад квадрупольной гармоники. Поэтому вычисленная согласно (5) величина X-ой проекции магнитной индукции равна  $B_x = -4,5$  нТ, т.е. направлена противоположно X-ой проекции ММ датчика DN. При дальнейшем удалении от датчика DN соотношение вкладов меняется, и, как хорошо видно на рис. 4, в области установки научного магнитометра ( $r=2,98$  м) вклад дипольной гармоники в X-ую проекцию магнитной индукции становится основным, что оправдывает в этом случае использование для расчета магнитного поля дипольной модели датчика DN.

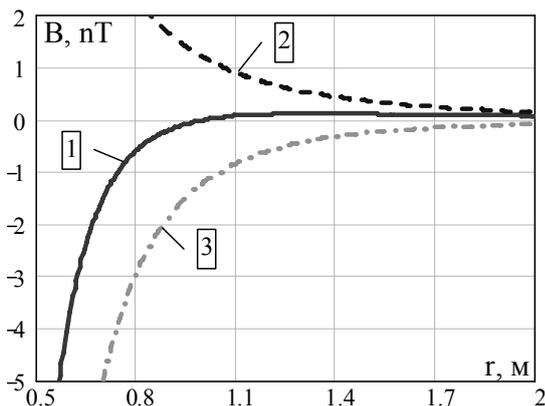


Рис. 4

метрическим центром экрана, что приводит к различной в его верхней и нижней частях намагниченности, создаваемой полем смещенного аксиального диполя. Эта несимметричная наведенная намагниченность смещенным диполем также является причиной создания экраном магнитного поля, состоящего из аксиальных гармоник старших степеней, в том числе и октупольной. Однако по изложенным выше соображениям учет вкладов этих гармоник рационально проводить на расстояниях меньше пяти габаритных размеров источника.

Очевидно, что применение в составе датчика DN более тщательно подобранной четверки магнитов с суммарным ММ порядка  $2 \div 3 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  эквивалентно уменьшит величину аксиальной дипольной гармоники датчика DN до  $0,4 \div 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

Таким образом, одно лишь требование, ограничивающее значение магнитного момента датчика DN, не обеспечивает минимизацию магнитной индукции в зоне установки бортового магнитометра. Поэтому для решения задачи обеспечения магнитной чистоты КА должны предъявляться требования по дополнительным магнитным характеристикам к комплектующим и узлам КА.

**Выводы.** Для описания с удовлетворительной погрешностью магнитного поля, создаваемого датчиком нейтрального компонента плазмы в зоне бортового магнитометра, необходимо учитывать магнитную индукцию от пространственных гармоник старших степеней.

При проведении работ по обеспечению магнитной чистоты КА целесообразно предъявление по ТЗ требований к комплектующим КА, ограничивающих максимальные значения следующих маг-

$$g_1^1 = M_x = +0,006 \text{ А} \cdot \text{м}^2; \quad h_1^1 = M_y = +0,007 \text{ А} \cdot \text{м}^2; \\ g_1^2 = M_z = +0,012 \text{ А} \cdot \text{м}^2; \quad g_2 = M_{\text{кв.}} = -0,008 \text{ А} \cdot \text{м}^3. \quad (5)$$

На основании (4) и (5) был проведен графический анализ вкладов в X-ю проекцию магнитной индукции датчика от дипольной и квадрупольной гармоники в зависимости от расстояния до датчика DN – рис. 4, где обозначено: магнитная индукция (X-ая проекция): 1 – датчика DN (суммарная); 2 – вклад дипольной гармоники; 3 – вклад квадрупольной гармоники. Особенностью гармонического состава X-ой проекции магнитной индукции, создаваемой датчиком DN в области установки бортового магнитометра ( $r=0,58$  м), является преобладающий вклад квадрупольной гармоники.

Сравнивая величины мультипольных коэффициентов сферических гармоник (мультипольных магнитных моментов) постоянных магнитов без экрана (1-2) и с экраном (5), можно отметить сравнительно небольшую (около 5) эффективность экранирования для аксиальной дипольной гармоники по сравнению с существенным экранированием (более 80 раз) аксиальной квадрупольной гармоники. Столь заметное различие, очевидно, может быть вызвано следующим. Точка «приложения» квадрупольного ММ – место положения эквивалентного системе из четырех магнитов аксиального квадруполя совпадает с геометрическим центром экрана, в то время как суммарный эквивалентный диполь смещен (в нашем случае ММ нижней пары на  $0,06 \text{ А} \cdot \text{м}^2$  больше ММ верхней пары) вниз, т.е. магнитный центр магнитов не совпадает с геометрическим центром экрана, что приводит к различной в его верхней и нижней частях намагниченности, создаваемой полем смещенного аксиального диполя.

нитных характеристик: модуля магнитного момента, мультипольных коэффициентов квадрупольной и, вероятно, октупольной гармоник магнитного поля.

1. *Гетьман А.В.* Определение пространственных гармоник магнитного поля вблизи поверхности технического объекта // Электричество. – 2005. – №1. – С. 55–60.
2. *Розов В.Ю., Гетьман А.В.* Структура контурных динамических систем для практического гармонического анализа магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 3. – С. 97–100.
3. *Розов В., Гетьман А., Петров С., Ерисов А., Меланченко А., Хорошилов В., Шмидт И.* Магнетизм космических аппаратов // Техн. електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч.2 – С. 144–147.
4. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 774 с.
5. *Smythe W.* Static and Dynamic Electricity. – Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 623 p.
6. *ECSS-E-HB-20-07A* "Space engineering: Electromagnetic compatibility handbook" ESA-ESTEC. – Noordwijk, The Netherlands: Requirements & Standards Division, 2012. – 228 p.

УДК 621.317.4

#### ПРОСТОРОВИЙ ГАРМОНІЧНИЙ АНАЛІЗ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДАТЧИКА ПЛАЗМИ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

**А.В.Гетьман**, канд.техн.наук

**Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України,**

**вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна.**

**e-mail: [getmanav@mail.ru](mailto:getmanav@mail.ru)**

*Проведено просторовий гармонічний аналіз магнітного поля, що створює магнітоактивна частина датчика нейтрального компонента плазми із складу наукової апаратури космічного апарату «Мікросат», на основі якого проведена оцінка магнітної завади, яку створює датчик в зоні установки бортового магнітометра. Бібл. 6, рис. 4.*

**Ключові слова:** магнітне поле, магнітний момент, просторова гармоніка, сигнатура магнітного потоку.

#### SPATIAL HARMONIC ANALYSIS OF A MAGNETIC FIELD OF A SENSOR PLASMA OF SPACECRAFT

**A.V.Getman**

**Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects National Academy of Sciences of Ukraine,  
Industrialnaia st., 19, PO Box 72, Kharkov, 61106, Ukraine.**

**e-mail: [getmanav@mail.ru](mailto:getmanav@mail.ru)**

*The spatial harmonics analysis of the magnetic field, what created by the magnetized part of the sensor of the neutral component of the plasma from the scientific instruments of the spacecraft "Mikrosat", was performed. Based on this analysis, produced the assessment magnetic noise by the sensor in the area onboard magnetometer. References 6, figures 4.*

**Key words:** magnetic field, magnetic moment, spatial harmonic, signature of magnetic flux.

1. *Getman A.V.* Determination spatial harmonic of magnetic field near of technical object // Elektrichestvo. – 2005. – №1. – Pp. 55–60. (Rus)
2. *Rozov V., Getman A.* Structure of dynamics contours systems for practical harmonic analyses of magnetic field of technical object // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniky". – 2008. – Chapter 3. – Pp. 97–100. (Rus)
3. *Rozov V., Getman A., Petrov S., Erisov A., Melanchenko A., Khoroshilov V., Shmidt I.* Magnetism of spaceship // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniky". – 2010. – Chapter 2. – Pp. 144–147. (Rus)
4. *Shimoni K.* Theoretical electrical engineering. –Moskva: Mir, 1964. – 774 p. (Rus)
5. *Smythe W.* Static and Dynamic Electricity. – Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 623 p.
6. *ECSS-E-HB-20-07A* "Space engineering: Electromagnetic compatibility handbook" ESA-ESTEC. – Noordwijk, Netherlands: Requirements & Standards Division, 2012. – 228 p.

Надійшла 21.03.2013

Received 21.03.2013