

8. Y.Cui, R.Dupere, A.Burger, D. Johnstone, K.C. Mandal, S.A. Payne. Acceptor levels in GaSe:In crystals investigation by deep-level transient spectroscopy and photoluminescence. J. Appl.Phys., 103,P. 013710 (2008).
9. R. Ahluwalia, Nathaniel Ng, D.J. Srolovitz. Surface morphology effects on polarization switching in nanoscale ferroelectrics. Nanotechnology, 20, P. 445709 (2009).
10. Турик А.В, Радченко Г.С, Чернобабов А.И, Турик С.А, Супрунов В.В.Диэлектрические спектры неупорядоченных сегнетоактивных систем: поликристаллы и композиты. ФТТ.-2006.-Т. 48.-В.6.-С.1088-1090.
11. G.Z.Liu, C. Wang, C.-C.Wang, J.Qiu, M.He, J.Xing, K.-J.Jin, H.-B.Lu, G.-Z.Yang. Effects of interfacial polarization on the dielectric properties of BiFeO₃ thin film capacitors Appl.Phys. Lett., 92,P. 122903 (2008).
12. Меджидов А.Б., Мурадов Р.М., Мехтиева С.И., Алиев И.М. Емкостные характеристики Ni-GeO-GaSe структур при освещении. Изв.АН Азерб., сер. ФТМН .-2003.-Т.23.-№ 2.-С.128-134.
13. V.Erdinc, H. Akkus. Ab-initio study of the electronic structure and optical properties of KNO₃ in the ferroelectric phase.Phys.Scr. 79 ,P. 025601(2009).
14. I.I.Grigorchak, V.V. Netyaga, Z.D.Kovalyuk. J. Phys.: Condens. Matter, 9, L191 (1997).
15. Бахтинов А.П., Ковалок З.Д., Сидор О.Н., Катеринчук В.Н., Литвин О.С.Формирование нанобразований на поверхности слоистого полупроводника InSe в процессе термического окисления // ФТТ.- 2007.-Т.49.- В.8.- С.1497–1503.
16. В.А.Зуев, В.Г.Попов. Фотоэлектрические МДП-приборы.-М.:Сов. радио.,1983.-175с.

Представлені результати просторового гармонічного аналізу магнітного поля датчика нейтрального компонента плазми, на основі якого проведена оцінка створеної їм магнітної завади в зоні установки бортового магнітометра космічного апарата Січ-2

Ключові слова: магнітний момент, просторова гармоніка, сигнатура магнітного потоку

Представлены результаты пространственного гармонического анализа магнитного поля датчика нейтрального компонента плазмы, на основе которого проведена оценка создаваемой им магнитной помехи в зоне установки бортового магнитометра космического аппарата Сич-2

Ключевые слова: магнитный момент, пространственная гармоника, сигнатура магнитного потока

The results of a spatial harmonic analysis of a magnetic field of a sensor a neutral component of plasma are represent, on the basis of which the magnetic disturbance, created by it, in a place of installation of board's magnetometer of a space craft Сич-2 is appraise

Key words: magnetic moment, spatial harmonic, signature of magnetic flux

УДК 621.317.4

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДАТЧИКА НЕЙТРАЛЬНОГО КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ

А. В. Гетьман

Кандидат технических наук

Заведующий отделом №20

Научно-технический центр магнетизма технических

объектов НАН Украины

ул. Индустриальная, 19, г. Харьков, Украина, 61109

Контактный тел.: (0572) 99-11-75

E-mail: ntcmt@ukrpost.ua

1. Введение

Современной тенденцией создания космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли является минимизация их массогабаритных характеристик. Это достигается за счет повышения плотности компоновки и минимизации габаритов аппаратуры

спутника. В свою очередь повышение плотности компоновки обостряет проблему магнитной совместимости «начинки» космического аппарата (КА). Кроме того, в плане обеспечения точности ориентации спутника на орбите важной задачей является минимизация магнитной помехи, создаваемой аппаратурой

спутника в области бортового магнитометра, обеспечивающего систему ориентации данными о магнитном поле Земли. Поэтому необходим точный учет всех составляющих магнитной индукции, создаваемой всей аппаратурой КА [1].

В этой связи актуальным являются вопросы повышения точности моделирования магнитного поля комплектующих КА в привязке к набору нормируемых магнитных характеристик.

В работе проведен пространственный гармонический анализ магнитного поля датчика нейтрального компонента плазмы, входящего в состав научной аппаратуры КА Сич-2, с целью определения универсального набора нормируемых магнитных характеристик бортовой аппаратуры, необходимого для обеспечения магнитной чистоты на ранних стадиях проектирования КА.

2. Постановка задачи

В комплексе научной аппаратуры «Потенциал», устанавливаемой на КА Сич-2, используется датчик кинетических параметров нейтрального компонента космической плазмы (датчик НКП). Принцип работы датчика основан на использовании силового воздействия магнитного поля на электрически нейтральный компонент космической плазмы. При этом для создания внутреннего магнитного поля в датчике НКП применены постоянные магниты.

С целью уменьшения вклада внешнего магнитного поля датчика НКП в магнитную помеху, при разработке датчика в конструкции его магнитоактивной части применены антисимметричная ориентация постоянных магнитов и ферромагнитный экран. В результате чего магнитный момент M датчика НКП был уменьшен до следующих величин его декартовых проекций:

$$M_x = +0,087 \text{ А}\cdot\text{м}^2; M_y = -0,084 \text{ А}\cdot\text{м}^2; M_z = +0,042 \text{ А}\cdot\text{м}^2. (1)$$

Результаты (1) были получены экспериментально на магнитоизмерительном стенде НТЦ МТО НАНУ. Этих данных достаточно для расчета величины магнитной индукции B , создаваемой датчиком НКП в зоне установки бортового магнитометра, на основе модели дипольного источника по формуле [2]

$$\vec{B} = -\frac{\mu\mu_0}{4\pi} \nabla \left(\frac{\vec{M}\vec{R}}{|\vec{R}|^3} \right), (2)$$

где \vec{M} – вектор магнитного момента магнитного диполя;

\vec{R} – вектор расстояния от источника к точке наблюдения магнитного поля, определяемый на основании рис. 1.

При использовании дипольной модели декартовые проекции магнитной индукции, создаваемой остаточным магнитным моментом датчика НКП в зоне бортового магнитометра, рассчитанные по формуле (2) имеют значения:

$$B_x = -203 \text{ нТл}; B_y = +196 \text{ нТл}; B_z = +196 \text{ нТл}. (3)$$

3. Экспериментальное определение пространственных гармоник магнитного поля датчика НКП

Учитывая сложность пространственной структуры магнитного поля датчика НКП: антисимметрия магнитоактивной части, помещенной в ферромагнитный экран, естественно предположить, что пространственное распределение магнитного поля на расстояниях сравнимых с габаритным размером датчика НКП, существенно отличается от дипольного представления поля.

Кроме того, интерес к пространственному распределению магнитного поля датчика НКП обусловлен его расположением внутри КА в непосредственной близости от феррозондов бортового магнитометра. Это обосновывает применение для расчета магнитной индукции помехи более точной, чем дипольная, модели внешнего магнитного поля датчика НКП, основанной на сферических гармониках скалярного потенциала магнитного поля [3]:

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

где r, θ, ϕ – локальные сферические координаты точки наблюдения магнитного поля, отсчитываемые от центра масс датчика НКП;

g_n^m и h_n^m – амплитудные коэффициенты пространственных гармоник, причем справедливо

$$M_x = 4\pi g_1^1, M_y = 4\pi h_1^1, M_z = 4\pi g_1^0. (5)$$

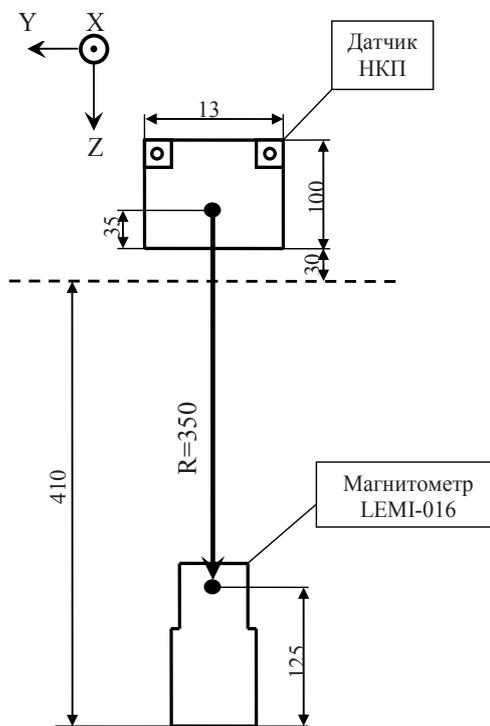


Рис. 1. Взаимное расположение датчика НКП и бортового магнитометра

С учетом геометрии задачи, согласно рис. 1, формулы расчета магнитной индукции, создаваемой датчиком НКП в зоне установки бортового магнитометра, примут более простой вид:

$$B_x = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P'_n(1)}{r^{n+2}} g_n^1 = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P'_n(1)}{(0,35)^{n+2}} g_n^1, \quad (6)$$

$$B_y = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P'_n(1)}{r^{n+2}} h_n^1 = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P'_n(1)}{(0,35)^{n+2}} h_n^1, \quad (7)$$

$$B_z = \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{r^{n+2}} g_n^0 = \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{(0,35)^{n+2}} g_n^0, \quad (8)$$

Поскольку бортовой магнитометр установлен непосредственно под датчиком НКП (по оси Z), то далее будем рассматривать только Z-вую проекцию магнитной индукции B_z , создаваемую датчиком НКП в зоне бортового магнитометра.

Ввиду практической ограниченности возможности получения достоверных данных об амплитудных коэффициентах пространственных гармоник с большими значениями n (более 3), для дальнейшей рассмотрения ограничимся первой тройкой коэффициентов g_1^0, g_2^0, g_3^0 .

Для экспериментального определения амплитудных коэффициентов g_1^0, g_2^0, g_3^0 гармоник магнитного поля датчика НКП были проведены измерения магнитной сигнатуры – проходной характеристики магнитного потока Φ , сцепленного с круговой измерительной обмоткой радиуса R_0 . Принцип измерения [4] иллюстрирует рис. 2.

Измерения магнитной сигнатуры при перемещении через круговую обмотку были проведены дважды: при ориентации оси Z датчика НКП по направлению движения (рис. 3) и при противоположно направленной оси Z датчика НКП (рис. 4).

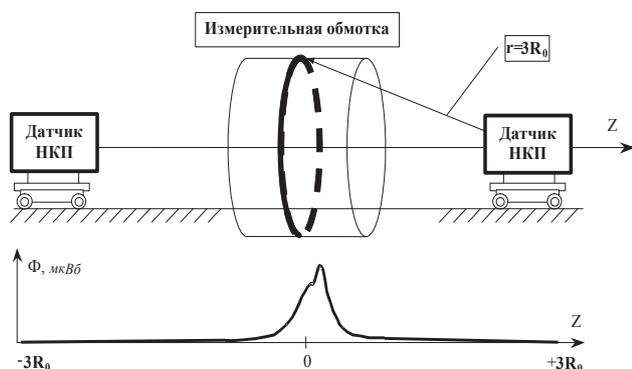


Рис. 2. Получение сигнатуры магнитного потока датчика НКП при его перемещении через измерительный контур

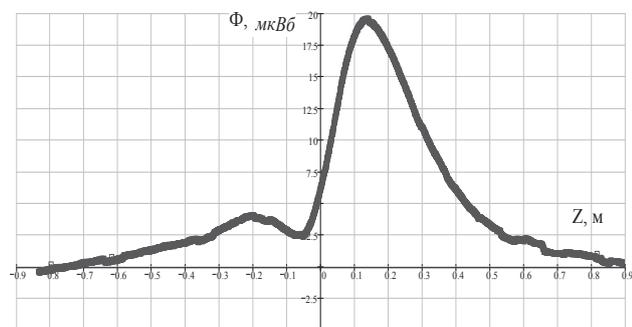


Рис. 3. Зафиксированная сигнатура магнитного потока датчика НКП (ось Z совпадает с направлением перемещения)

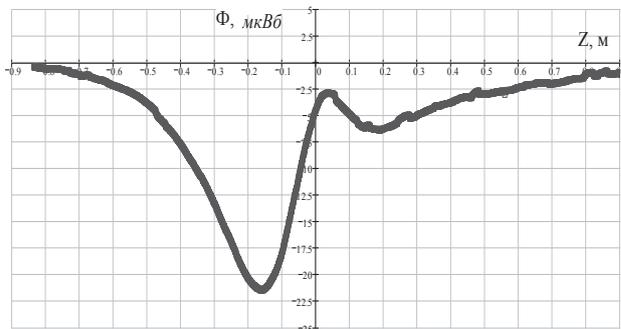


Рис. 4. Зафиксированная сигнатура магнитного потока датчика НКП (ось Z противоположна направлению перемещения)

В результате математической обработки зафиксированных магнитных сигнатур были получены значения амплитудных коэффициентов пространственных гармоник магнитного поля датчика НКП, на основе формулы

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(z) \cdot f_n(z) dz = g_n^0, \quad (9)$$

где $f_n(z)$ – селектирующая функция для гармоники степени n [5];

z – значения координаты центра масс датчика НКП в системе отчета измерительной установки при измерениях.

Результаты расчета амплитудных коэффициентов пространственных гармоник для двух измерений и их усредненные значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Амплитудные коэффициенты пространственных гармоник

№ измерения	Амплитудный коэффициент пространственной гармоники		
	$g_1^0, \text{A}\cdot\text{м}^2$	$g_2^0, \text{A}\cdot\text{м}^3$	$g_3^0, \text{A}\cdot\text{м}^4$
1	0.00401	0.00151	0.00024
2	0.00419	0.00131	0.00025
среднее значение	0.0041	0.00141	0.00025

На основании (8) для магнитной индукции каждой из трех гармоник и суммарного поля получены формулы:

$$B_z^1 = \mu_0 \frac{2 \cdot g_1^0}{(0,35)^3}, \quad B_z^2 = \mu_0 \frac{3 \cdot g_2^0}{(0,35)^4},$$

$$B_z^3 = \mu_0 \frac{4 \cdot g_3^0}{(0,35)^5}, \quad B_z = \sum_{i=1}^3 B_z^i, \quad (10)$$

Используя усредненные значения амплитудных коэффициентов пространственных гармоник из табл. 1, был проведен расчет магнитной индукции, создаваемой датчиком НКП в направлении оси Z в зоне установки бортового магнитометра, результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Магнитная индукция (Z-вая проекция) трех пространственных гармоник датчика НКП

Магнитная индукция (проекция на ось Z) пространственной гармоники, нТл			Суммарная магнитная индукция трех пространственных гармоник, нТл
B_z^1	B_z^2	B_z^3	$\sum_{i=1}^3 B_z^i$
+237	+352	+247	+836

Сравнивая результаты расчета Z-вой проекции магнитной индукции в (3) и из табл. 2, можно сделать следующие выводы:

- магнитное поле датчика НКП в зоне бортового магнитометра не может быть представлено с удовлетворительной погрешностью только на основе данных о его магнитном моменте;
- относительный вклад дипольной гармоники (поля магнитного момента) в магнитную индукцию, создаваемую датчиком НКП в зоне бортового магнитометра, составляет порядка 20-30 %;
- вклад каждой из старших гармоник (g_2^0 и g_3^0) превышает вклад дипольной гармоники (поле магнитного момента) в зоне установки бортового магнитометра.

Таким образом, одно лишь требование, ограничивающее значение магнитного момента датчика НКП, 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.

В частности, необходимо выдвижение требований в ТЗ, ограничивающих не только магнитный момент (дипольную гармонику) комплектующих КА, но и ограничивающих модули амплитудных коэффициентов квадрупольной g_2^m и октупольной g_3^m гармоник магнитного поля.

4. Выводы

На основе проведенного в работе анализа показано, что для обеспечения магнитной чистоты КА, в частности уменьшения магнитной помехи в зоне установки бортового магнитометра, при предъявлении требований к комплектующим КА, необходимо выдвижение требований ограничивающих максимальные значения следующих магнитных характеристик: модуля магнитного момента, амплитуд квадрупольной и октупольной гармоник магнитного поля.

Литература

1. Розов В., Гетьман А., Петров С., Ерисов А., Меланченко А., Хорошилов В., Шмидт И. Магнетизм космических аппаратов // Техническая электродинамика. – 2010.- Тематический выпуск. Ч. 2. Проблемы сучасної електротехніки. –С. 144-147.
2. Шимони К. Теоретическая электротехника. -М.: Мир, 1964. -774 с.
3. Гетьман А.В. Определение пространственных гармоник магнитного поля вблизи поверхности технического объекта // Электричество. – 2005. –№1. –С. 55-60.
4. Розов В.Ю., Гетьман А.В. Структура контурных динамических систем для практического гармонического анализа магнитного поля технических объектов // Техническая электродинамика. – 2008.- Тематический выпуск. Ч. 3. Проблемы сучасної електротехніки. –С. 97-100.
5. Гетьман А.В. Определение амплитуд пространственных гармоник магнитного поля контурными измерительными системами // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. –№5. – С. 28-31.