

9. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій: ДСТУ ISO/IEC 17025:2006.
10. Прослеживаемость измерений и испытательного оборудования до национальных стандартов: ЕА-4/07М.
11. Политика ILAC по прослеживаемости результатов измерений: ILAC P10:01/2013. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ilac.org/documents/>.
12. Создание в Украине материальной базы метрологического обеспечения измерения мощности ультразвука в мегагерцовом (медицинском) диапазоне частот в водной среде / В.П. Чалый, Т.М. Ильницькая, В.В. Паракуда, И.Г. Кизливский // Метрологія гідроакустических измерений: Всерос. науч.-техн. конф.: материалы. – Менделеево: ФГУП “ВНИИФТРИ”, 2013. – С. 265–272.
13. Koch Christian. Final report on key comparison CCAUV.U-K3 for ultrasonic power / Christian Koch, Klaus-Vitold Jenderka. – [Электронный ресурс] // Metrologia. – 2014. – 51 Tech. Suppl. 09001 – 75 p. – Режим доступа: http://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/AUV/U-K3/CCAUV.U-K3.pdf.
14. Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements: IEC 61161:2006. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006. – 97 p.
15. Чалый В. Створення еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі / В. Чалый, Т. Ильницька // Метрологія та прилади. – 2012. – № 3. – С. 16–25.
16. Метрологія. Локальна повірочна схема для засобів вимірювання потужності ультразвуку у водному середовищі: ЛПУ 10-01-2011. – К.: Держспоживстандарт України, 2011.
17. Единство и прослеживаемость измерений. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://metro.ru/HTML/metrology/vvedenie/obespechenie_EI.html.
18. Что означает прослеживаемость? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nreferat.ru/referat/metrologiya-osnovnye-ponyatiya>.

УДК 621.317.4

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.В. Петров, *заместитель директора по научно-техническим вопросам Института технических проблем магнетизма (ИТПМ) НАН Украины, г. Харьков*

А.В. Ерисов, *старший научный сотрудник ИТПМ НАН Украины, г. Харьков*



С.В. Петров



А.В. Ерисов

Введение

При создании малогабаритных космических аппаратов требуется нормирование их собственного магнитного момента, взаимодействие которого с магнитным полем Земли вызывает изменение положения космического аппарата на орбите [1, 2]. Указанное требование вызывает необходимость экспериментального измерения фактических значений магнитных моментов как отдельных образцов аппаратуры, так и космических аппаратов в целом. Такие измерения должны выполняться с максимально возможной точностью [3].

Основная часть

Наиболее распространенные методы определения магнитных моментов основаны на измерении векторов индукции \vec{B}_k магнитного поля в определенных k точках сферической поверхности, внутри которой расположена испытываемая аппаратура, и последующем расчете вектора магнитного момента.

Предложен улучшенный вариант измерительной установки, обеспечивающий повышение точности измерений магнитных моментов аппаратуры космического назначения.

An improved variant of the measuring installation providing the increasing of the measurements accuracy of magnetic moments of the equipment of aerospace purpose is proposed.

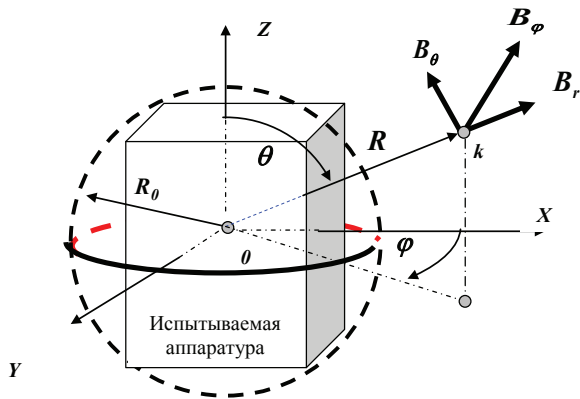


Рис. 1. Определение магнитного момента путем измерения индукции в заданных точках пространства

При этом точность определения магнитного момента будет определяться точностью измерения индукции магнитного поля в заданных точках, количеством точек измерения и возможностями алгоритма их обработки.

Методической основой таких измерительных установок является представление индукции \vec{B} магнитного поля, создаваемого испытуемой аппаратурой за пределами сферической поверхности радиуса R_0 , в которую вписывается эта аппаратура (рис. 1), в виде сходящейся суммы ряда сферических пространственных гармоник [4]:

$$B_r = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{n+1}{4\pi R^{n+2}} \{g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi\} P_n^m(\cos \theta); (1)$$

$$B_\theta = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{1}{4\pi R^{n+2}} \{g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi\} \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta}; (2)$$

$$B_\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{m}{4\pi R^{n+2}} \{g_n^m \sin m\varphi - h_n^m \cos m\varphi\} \frac{P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta}, (3)$$

где B_r , B_θ , B_φ – составляющие индукции магнитного поля в k -й точке с координатами R_k , θ_k , φ_k при начале системы сферических координат, совпадающем с центром сферы радиуса R_0 ; g_n^m , h_n^m – коэффициенты, характеризующие испытуемый объект как источник магнитного поля; $P_n^m(\cos \theta)$ – присоединенные полиномы Лежандра.

Коэффициенты g_1^0 , g_1^1 и h_1^1 в соотношениях (1)–(3) интерпретируются как соответствующие компоненты M_z , M_x и M_y вектора магнитного момента испытуемого объекта, ориентированные по осям X , Y и Z соответственно.

Измерительные установки размещают на специально оборудованных стендах. На рис. 2 показан магнитоизмерительный стенд Института технических проблем магнетизма НАН Украины. Здание и все конструкции стенда выполнены из немагнитных материалов. Стенд оснащен специальной системой обмоток для компенсации магнитного поля Земли, а также необходимым технологическим оборудованием и средствами измерения.

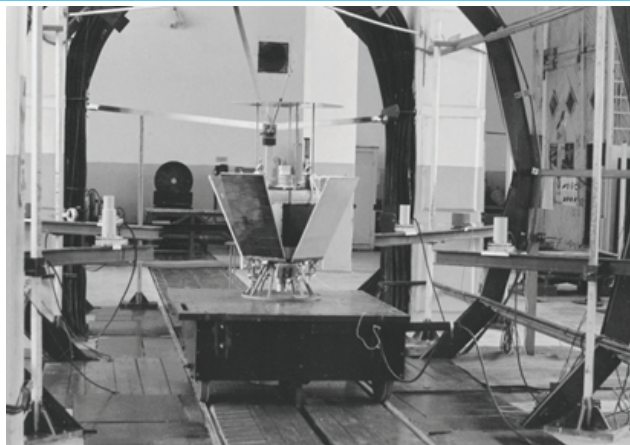


Рис. 2. Измерение магнитных характеристик космического аппарата МС-1-ТК "Микрон" на стенде ИТПМ НАН Украины

На рис. 3 показана часто используемая на практике измерительная установка [5], содержащая 4 датчика магнитного поля. Для такой измерительной установки определение каждой из компонент вектора магнитного момента производится по результатам измерения 4-мя датчиками магнитной индукции в направлении соответствующей оси координат.

Например, для измерения компоненты M_x датчики устанавливаются в четырех точках (см. рис. 3) горизонтальной плоскости ($\theta = \frac{\pi}{2}$) на расстоянии R .

При этом делается допущение, что источник магнитного поля является точечным и расположен в геометрическом центре испытуемой аппаратуры. Для такого случая индукция магнитного поля в точках измерения будет определяться исключительно первой ($n = 1$) сферической пространственной гармоникой, а высшие пространственные гармоники будут отсутствовать.

С учетом этого допущения и соотношений (1)–(3) значения индукции $\vec{B}_1 \dots \vec{B}_4$ магнитного поля, измеряемые датчиками 1–4, будут определяться из соотношений

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_3 = \frac{M_x}{2\pi R^3};$$

$$\vec{B}_2 = \vec{B}_4 = \frac{M_x}{4\pi R^3}.$$

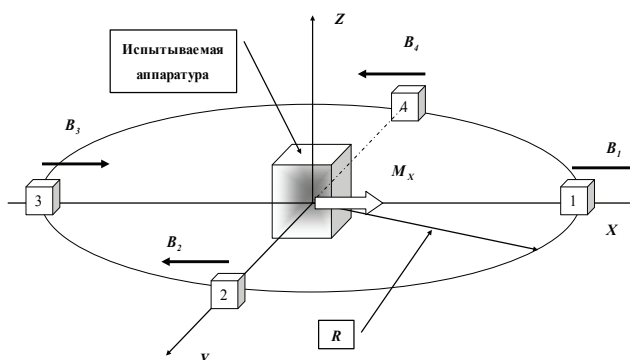


Рис. 3. Измерительная установка на основе 4-х датчиков магнитной индукции

Датчики включаются таким образом, что их сигналы суммируются, а суммарное значение измеренной индукции B_s будет равно

$$B_s = B_{s(n=1)} = B_1 + B_3 + B_2 + B_4 = \frac{3}{2\pi R^3} M_x \quad (4)$$

Из соотношения (4) величина магнитного момента M_x определится как

$$M_x = \frac{2\pi R^3}{3} B_s$$

Погрешность измерения магнитного момента M_x вызвана тем, что в реальной аппаратуре источники магнитного поля расположены не в центре. Поэтому кроме индукции, определяемой первой гармоникой, в измеренной величине B_s содержатся неучтенные составляющие:

$$B_s = B_{s(n=1)} + B_m + B_{\text{пом}},$$

где $B_{s(n=1)}$ – индукция магнитного поля, определяемая первой пространственной гармоникой магнитного поля испытываемой аппаратуры; B_m – индукция магнитного поля, обусловленная высшими ($n \geq 2$) пространственными сферическими гармониками испытываемого объекта; $B_{\text{пом}}$ – индукция магнитного поля, обусловленная источниками магнитных помех на испытательном поле, величина которых фиксируется датчиками 1–4.

С учетом этого измеренный магнитный момент можно представить как

$$M_x = M_x^* + \delta_m + \delta_{\text{пом}},$$

где M_x^* – истинная величина магнитного момента в направлении оси x ; δ_m – погрешность определения магнитного момента, определяемая высшими пространственными гармониками объекта порядка $n \geq 2$; $\delta_{\text{пом}}$ – погрешность определения магнитного момента, определяемая индукцией $B_{\text{пом}}$ магнитной помехи на испытательной установке.

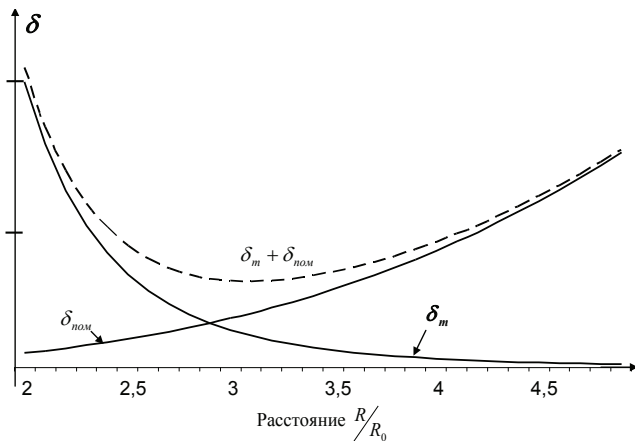


Рис. 4. Зависимости погрешностей δ_m и $\delta_{\text{пом}}$ от расстояния до датчиков

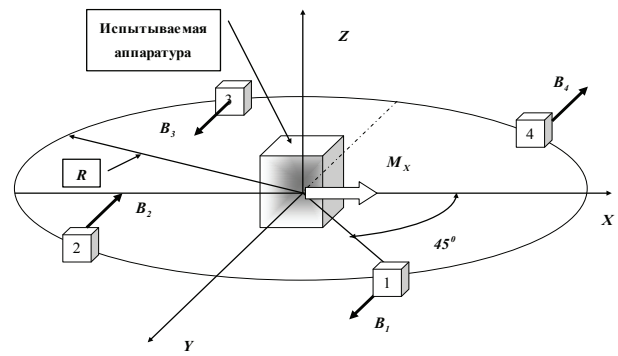


Рис. 5. Расположение датчиков магнитной индукции, обеспечивающее повышение точности измерений

Снижение погрешности δ определения магнитного момента M_x сводится к минимизации погрешностей δ_m и $\delta_{\text{пом}}$.

Структура уравнений ряда (1)–(3) такова, что с увеличением расстояния R от испытываемого объекта относительный вклад индукции B_m , вызванной высшими пространственными гармониками магнитного поля, будет уменьшаться, как это показано на рис. 4.

Значения высших пространственных гармоник определяются расположением источников магнитного поля в объеме аппаратуры, которое, как правило, неизвестно при проведении измерений. Поэтому измерение индукции магнитного поля желательно выполнять на максимальном удалении от центра установки, что позволяет снизить погрешность δ_m .

Для уменьшения погрешности $\delta_{\text{пом}}$, наоборот, требуется приближение датчиков к испытываемой аппаратуре, то есть выбор как можно меньшего значения расстояния R . В этом случае возрастает индукция собственного магнитного поля аппаратуры и вклад помехи $B_{\text{пом}}$ в измеряемый сигнал B_s будет снижаться, как это показано на рис. 3. В то же время при приближении измерительных датчиков к испытываемой аппаратуре возрастает помеха B_m от высших пространственных гармоник магнитного поля (рис. 4).

Снижение негативного влияния высших пространственных гармоник на результаты определения магнитного момента может быть достигнуто путем изменения расположения измерительных осей датчиков относительно испытываемой аппаратуры, что позволит обеспечить дополнительную фильтрацию указанных гармоник.

Анализ выражений (1)–(3) показывает, что для имеющейся измерительной установки (рис. 3) величина B_m определяется значениями индукции нечетных пространственных гармоник, начиная с третьей гармоники ($n = 3, 5, \dots$). Четные ($n = 2, 4, 6, \dots$) пространственные гармоники при таком расположении и включении датчиков не влияют на величину суммарной измеренной индукции B_s . Поэтому первой значащей гармоникой индукции B_m будет третья ($n = 3$) гармоника.

Для уменьшения влияния высших пространственных гармоник на результаты измерений предлагается изменить расположение измерительных дат-

чиков относительно испытываемой аппаратуры. Предлагаемое расположение измерительных датчиков при измерении компоненты магнитного момента M_x приведено на рис. 5.

Для такой измерительной установки значения индукции $\vec{B}_1 \dots \vec{B}_4$ магнитного поля первой ($n = 1$) пространственной гармоники испытуемого объекта, которые измеряются каждым из датчиков 1–4, определяются соотношением

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_2 = \vec{B}_3 = \vec{B}_4 = \left(B_{r(\varphi=\frac{\pi}{4})} + B_{\varphi(\varphi=\frac{\pi}{4})} \right) \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{3M_x}{8\pi R^3}.$$

Величина суммарной измеренной индукции $B_{s(n=1)}$, как и в предыдущем случае, будет равна

$$B_s = B_{s(n=1)} = 4 \cdot \frac{3M_x}{8\pi R^3} = \frac{3}{2\pi R^3} M_x.$$

Анализ соотношений (1)–(3) показывает, что для предлагаемого расположения датчиков величина B_m будет определяться значениями индукции нечетных пространственных гармоник, начиная с пятой гармоники ($n = 5, 7, 9 \dots$).

Поэтому первой значащей гармоникой, вносящей вклад в погрешность B_m , будет пятая ($n = 5$) пространственная гармоника магнитного поля испытуемой аппаратуры. Следовательно, погрешность измерений уменьшается на величину, определяемую третьей пространственной гармоникой.

Таким образом, предлагаемое расположение измерительных датчиков позволяет обеспечить более высокие метрологические показатели при измерении магнитных моментов аппаратуры космического назначения.

УДК 621.319.7.001

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОРПУСАМИ АВИАНИКИ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

В.В. Князев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", г. Харьков

И.А. Постельник, младший научный сотрудник НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", г. Харьков



В.В. Князев



И.А. Постельник

Представлен преобразователь напряженности электрического поля с оптической линией передачи информации для диапазона частот от 0,1 до 5 ГГц. Предложена методика использования этого преобразователя. Представлены результаты измерения эффективности экранирования реальным корпусом. Доказана высокая эффективность использования предложенной методики и преобразователя.

The transformer with the tension of the electric field with the optical transmission line for the range of frequen-

Выводы

Предложен улучшенный вариант измерительной установки, обеспечивающий повышение точности измерений магнитных моментов аппаратуры космического назначения.

Предлагаемый вариант измерительной установки может быть реализован с минимальными финансовыми затратами на базе существующих средств измерения индукции магнитного поля.

Список литературы

1. Нормирование и измерение собственного магнитного поля космических аппаратов / В. Розов, С. Петров, А. Ерисов, А. Меланченко // Космические технологии: настоящее и будущее: III Междунар. конф.: тез. докл. – Днепропетровск, 2011. – С. 45.
2. Kildishev A.V. Measurement of the spacecraft main magnetic parameters / A.V. Kildishev, S.A. Volokhov, J.D. Saltykov // AUTOTESTCON'97: Conference Proceedings. IEEE SYSTEMS READINESS TECHNOLOGY CONFERENCE, September 22–25, 1997, Anaheim, California. – P. 669–675.
3. Дудкин Ф.Л. Оценка требований к платформам микро- и наноспутников в контексте длительных измерений магнитного поля Земли / Ф.Л. Дудкин, Д.Ф. Дудкин // Космический проект "Ионосат-Микро" / под ред. С. А. Засухи, О. П. Федорова. – К.: Академперіодика, 2013. – С. 53–65.
4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Т. 1 / Б.М. Яновский. – Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1964. – 445 с.
5. Электрооборудование силовое. Методы измерения параметров низкочастотного периодического магнитного поля: ГОСТ Р 50012.