

А.В. ГЕТЬМАН, канд. техн. наук, зав. отделом, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

С.Г. ЗВЕРЕВ, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

Е.Г. КРАМЧАНИН, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Розглянуті моделі магнітного поля технічних об'єктів та відповідні системи для вимірювання просторових характеристик магнітного поля. Виявлено, що найбільш широкі метрологічні можливості притаманні системам, які вимірюють функціональну залежність магнітного поля відносно положення технічного об'єкту.

Рассмотрены модели магнитного поля технических объектов и соответствующие системы, измеряющие пространственные характеристики магнитного поля. Выведено, что наиболее широкие метрологические возможности свойственны системам, измеряющим функциональную зависимость магнитного поля относительно положения технического объекта.

Введение. В высокотехнологичных отраслях промышленности предъявляются требования к уровню магнитного поля, создаваемого техническим объектом [1]. Согласно этим требованиям нормированию подлежит уровень магнитного поля в пространстве вокруг объекта. Например, стандарт Европейского космического агентства ECSS-E-20A ограничивает величину магнитной индукции оборудования и блоков космических аппаратов на расстоянии 0,1 м от их поверхности. При этом окончательный контроль нормированных уровней поля проводят на специализированных магнитоизмерительных стендах, позволяющих измерять пространственные характеристики магнитного поля, такие как: магнитный момент, мультиполи, пространственные гармоники магнитного потенциала. Тем самым, контроль пространственных характеристик магнитного поля (МП) является неотъемлемой частью технологии создания технических объектов (ТО) с нормированным уровнем поля.

В этой связи представляет практический интерес анализ существующих в мире систем контроля пространственного распределения МП ТО и определение тенденций, характерных новейшим средствам измерений пространственных характеристик МП.

С этой целью в работе проведен обзор используемых аналитических моделей магнитного поля ТО и метрологических возможностей средств измерения соответствующих пространственных характеристик поля.

Исходные положения. Для исследования и анализа пространственной структуры МП ТО традиционно применяются методы, в основе которых лежит одна из трех аналитических моделей ТО, как источника постоянного магнитного поля.

– Модель магнитного момента \vec{M} технического объекта позволяет представить магнитную индукцию \vec{B} , создаваемую ТО, в виде векторного соотношения [2]

$$\vec{B} = -\frac{\mu\mu_0}{4\pi} \nabla \frac{(\vec{M}\vec{r})}{|\vec{r}|^3}, \quad (1)$$

а также определяет связь с векторным потенциалом \vec{A} с помощью формулы

$$\vec{A} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{(\vec{M} \times \vec{r})}{|\vec{r}|^3}, \quad (2)$$

где \vec{r} – расстояние от источника магнитного момента до точечного датчика магнитной индукции.

Модель служит для упрощенного представления внешнего магнитного поля, создаваемого ТО на расстояниях более трех его габаритных размеров, а также позволяет рассчитать величину механического момента, возникающего при взаимодействии ТО с внешним однородным полем.

– Мультиполярная модель использует аналитически точное представление [3] внешнего магнитного поля вне минимальной сферы, охватывающей ТО, в виде суммы магнитных полей точечных источников – мультиполей M_k :

$$\vec{B} = -\mu\mu_0 \nabla \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k!} \frac{\partial^k}{\partial l_1 \partial l_2 \dots \partial l_k} \frac{M_k}{|\vec{r}|} \right), \quad (3)$$

где l_k – оси полюсов мультиполей.

Вторая форма записи удобна для представления поля в сферической системе координат [4] через мультиполярные коэффициенты g_n^m и h_n^m

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

где r , θ и ϕ – сферические координаты точки представления поля.

Поэтому мультипольная модель наиболее часто используются для описания магнитного поля технических объектов, имеющих одинаковые или близкие габаритные размеры (хорошо охватываются сферической поверхностью), а так же в земном магнетизме [5].

– Также как и предыдущие модели, применение пространственных гармоник [6] строится на решении уравнения Лапласа для скалярного потенциала магнитного поля вне областей с электрическим током. При этом модель позволяет применять для выделения односвязных областей скалярного потенциала магнитного поля координатные поверхности, характерные для десяти криволинейных систем координат, в частности поверхности: цилиндра, вытянутого сфероида, сферы, сплюснутого сфероида, что дает возможность [7] адаптировать ее практически к любому ТО (табл. 1).

В плане применения для описания МП ТО эта модель является наиболее универсальной, поскольку позволяет: во-первых, описывать МП как вне, так и внутри объемов, занятых электрическим током, а так же внутри ферромагнитных масс ТО; во-вторых, проводить описание с максимальным приближением к поверхности областей с током за счет рационального выбора аналитической координатной поверхности в соответствующей системе координат.

Независимо от конкретно используемой модели, средства измерений пространственных характеристик МП ТО могут быть разделены по непосредственно измеряемой величине на две группы: на системы точечных датчиков МИ, и на системы контуров со специальной пространственной конфигурацией. Измеряемой величиной в таких системах является, соответственно, либо магнитная индукция, либо магнитный поток. При этом измерительная система должна отделять МП, создаваемое ТО, от суммарного помехонесущего поля земного и техногенного происхождения.

По физическому принципу создания МП ТО, его можно разделить на три составляющие:

- магнитное поле остаточной намагниченности ферромагнитных элементов ТО;
- магнитное поле индуцированной намагниченности ферромагнитных элементов ТО;
- магнитное поле электрических токов ТО.

Таблица 1 – Пространственные гармоники в криволинейных системах координат

| Координаты | Пространственная гармоника |
|-----------------------------|---|
| 1. Цилиндрические | ρ, φ, z $\tilde{U}_m(\rho, z, \varphi, \lambda) = \tilde{K}_m(\lambda \rho) e^{i\lambda z + im\varphi}$ |
| 2. Сферические | r, θ, φ $\tilde{U}_{n,m}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{r^{n+1}} P_n^m(\cos\theta) e^{im\varphi}$ |
| 3. Вытянуто-сфероидальные | $\xi, \eta, \varphi; c$ $\tilde{U}_{n,m}(\xi, \eta, \varphi, c) = Q_n^m(\xi) P_n^m(\eta) e^{im\varphi}$ |
| 4. Сплюснута-сфероидальные | $\xi, \eta, \varphi; c$ $\tilde{U}_{n,m}(\xi, \eta, \varphi, c) = Q_n^m(i\xi) P_n^m(\eta) e^{im\varphi}$ |
| 5. Эллиптического цилиндра | $v, \mu, z; \lambda, c$ $\tilde{U}_n^{(+)}(v, \mu, z, \lambda, c) = M e_n^{(1)}(v, c_0 \lambda^2) S e_n(\mu, c_0 \lambda^2) e^{i\lambda z}$ $\tilde{U}_n^{(-)}(v, \mu, z, \lambda, c) = N e_n^{(1)}(v, c_0 \lambda^2) S e_n(\mu, c_0 \lambda^2) e^{i\lambda z}$ |
| 6. Параболического цилиндра | $p, q, z; c, \lambda$ $\tilde{U}_n(p, q, z, \lambda, c) = D_n(p \sqrt{2c \lambda }) D_{-n-1}(q \sqrt{2c \lambda }) e^{i\lambda z}$ |
| 7. Параболические | $\delta, \gamma, \varphi; c$ $\tilde{U}_m(\delta, \gamma, \varphi, c, t) = J_m(t\delta) K_m(t\gamma) e^{im\varphi}$ |
| 8. Эллипсоидальные | $\mu, \nu, \rho; a$ $\tilde{U}_{m,n}(\mu, \nu, \rho; a) = F_n^m(\alpha, k) E_n^m(\beta, k) E_n^m(\gamma, k)$ |
| 9. Конические | $r, \mu, \nu; b$ $\tilde{U}_{m,n}(r, \mu, \nu; b) = \frac{1}{r^{n+1}} E_n^m(\alpha, k) E_n^m(\beta, k)$ |
| 10. Параболоидальные | $\alpha, \beta, \gamma; \lambda c$ $\tilde{U}_{s_n}(\alpha, \beta, \gamma, \lambda c) = S e_n(\alpha, \lambda c) S e_n(\beta, \lambda c) S e_n(\gamma, -\lambda c)$ |

Для отдельного исследования этих составляющих на магнитоизмерительных стендах используются системы токовых колец, создающих заданное (в том числе "нулевое") магнитное поле в объеме исследуемого ТО. В "нулевом" внешнем МП исследуют МП ТО, создаваемое остаточной намагниченностью, а "включая" и "выключая" внешнее МП или электрические токи ТО, исследует суммарное с индуцированной или токовой составляющей МП, соответственно.

Системы на основе точечных датчиков магнитной индукции. Наиболее распространенными и наиболее простыми являются системы, построенные на основе стационарно установленных пар датчиков магнитной индукции. Дифференциальное включение пары датчиков при расположении их на сфере, например, как показано на рис. 1, позволяет, в определенной мере, защитить систему от внешнего поля помехи [8].

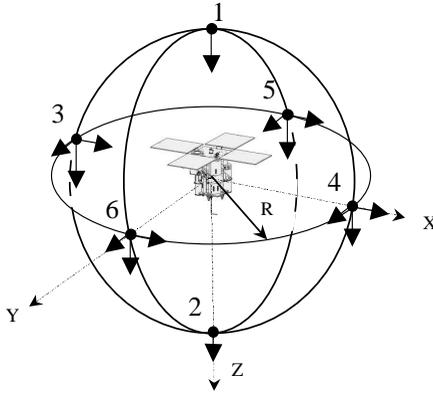


Рис. 1. Измерительная система из 14-ти датчиков на стенде НТЦ МТО НАН Украины

Метод измерения такими системами состоит в одноразовом, но разновременном сравнении магнитных полей суммарного сигнала пар датчиков от магнитного поля исследуемого объекта и эталонного источника, помещаемых в центр системы. Тем самым величины компонент магнитного момента или квадрупольного магнитного момента объекта получают опосредованно сумме (разнице) величин индукций, зафиксированных датчиками с учетом расстояния от них до центра системы (объекта). Сам объект при этом полагают точечным – достаточно малым источником по сравнению с размерами измерительной системы. Кроме того, полагают, что в пространственном распределении магнитного поля ТО отсутствуют составляющие поля от мультиполей старше квадруполя (или их вклады в измеряемую индукцию пренебрежимо малы). Конечно, эти два требования далеко не всегда соответствуют реальному пространственному распределению МП ТО, что является причиной возникновения погрешности при таком методе измерения магнитного момента и квадрупольного магнитного момента.

С развитием компьютерных технологий в качестве альтернативного подхода к исследованию пространственной структуры МП ТО получили применение системы из датчиков магнитной индукции, позволяющие проводить измерение функциональной зависимости МП от положения ТО относительно датчиков.

Согласно постулату Галилея, изменения положения источника поля относительно системы координат, связанной с датчиками магнитной индукции, можно добиться либо поворачивая ТО относительно системы датчиков, либо линейно перемещая объект относительно неподвижной измерительной системы.

Первый вариант с поворотом ТО вокруг оси поворотной платформы реализован в NASA (рис. 2) [9] для контроля магнитного момента космического аппарата (КА).



Рис. 2. Магнитоизмерительный стенд в NASA (США)

Второй вариант с перемещением объекта относительно системы из 39-ти стационарных датчиков применяется в Лаборатории судового магнетизма (Франция) для определения вытянуто-сфероидальных гармоник МП при моделировании намагниченности судов [10].

В обоих вариантах исполнения систем производится большое количество измерений магнитной индукции и относительной координаты при перемещении. Сложной математической обработкой получаемых массивов данных добиваются определения измеряемых величин пространственных характеристик МП, при минимизированной методической погрешности по сравнению с системами, использующими одноразовое измерение. Технические сложности, связанные с прецизионностью настройки системы и позиционированием ТО относительно датчиков, компенсируются универсальностью в плане измерений различных пространственных характеристик МП, а также наилучшей на сегодня заявленной точностью.

Системы на основе измерительных контуров специальной конфигурации. Для прямого расчета величины пространственных характеристик МП, представленных в выражениях (1-4), необходимо произвести их пространственное интегрирование, что с учетом геометрии ТО является нетривиальной математической задачей. Поэтому естест-

венным выглядит подход, использующий для нахождения величин пространственных характеристик МП его интегральную характеристику – магнитный поток. При этом для выделения вклада в магнитный поток составляющей, создаваемой определяемой характеристикой МП, используют специальную пространственную конфигурацию измерительного контура. Учитывая необходимость защиты от поля помехи процесса измерений, на практике применяют пары встречно коммутированных контуров, соответственно размещенных в пространстве [11].

По типу измерений такие системы также можно разделить на два вида: системы с одноразовым сравнением магнитного потока ТО с магнитным потоком эталонного источника; и системы, собирающие большое количество данных измерений магнитного потока и относительной координаты перемещения ТО.

При этом системам с одноразовым измерением величины магнитного потока, характерны недостатки аналогичные тем, которые присущи системам точечных датчиков. Прежде всего, это зависимость методической погрешности от размеров и магнитной структуры ТО. Однако в экономическом плане стационарная контурная измерительная система выглядит более привлекательно, чем система из дорогостоящих феррозондовых датчиков.

В современных контурных системах опосредованный принцип измерения пространственных характеристик МП основан на математической обработке данных измерений о магнитном потоке при перемещении ТО внутри системы. По виду движения ТО такие системы можно также разделить на вращательные и с линейным перемещением.

Так в Institute of Space and Astronautical Science (рис. 3) для измерения магнитного момента космических аппаратов используют контурную систему, внутрь которой помещают и вращают на торсионном подвесе спутник [12].

В ГП "КБ "Южное" для измерения магнитных моментов КА применяют контурную систему, фиксирующую магнитную сигнатуру – зависимость магнитного потока от координаты при линейном перемещении КА через измерительный контур [13]. Тот же принцип использует установка измерения пространственных гармоник [14] на стенде НТЦ МТО НАН Украины (рис. 4).

Однако основным недостатком всех контурных систем измерения пространственных характеристик МП является инструментальная погрешность вебберметров – дрейф нуля, которая не только снижает точность измерений, но и количественно ограничивает набор определяемых пространственных гармоник МП ТО.



Рис. 3. Контурная измерительная система в ISAS (Япония)

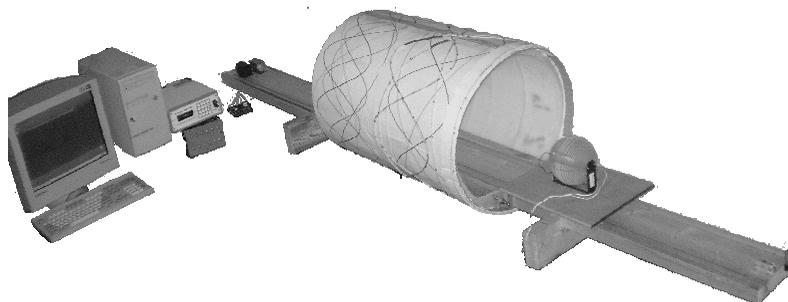


Рис. 4. Установка для измерения сферических и сфероидальных гармоник

Выводы. Проведенный анализ средств измерения пространственных характеристик магнитного поля показал количественно лучшие метрологические характеристики систем, ориентированных на измерение функциональной зависимости магнитного поля от положения технического объекта относительно системы, а также их качественное преимущество, состоящее в возможности измерения целого набора пространственных характеристик, присущих различным моделям магнитного поля ТО. Если учесть тот факт, что такими компьютеризированными системами на сегодня укомплектованы ведущие магнитоизмерительные стенды, то можно говорить о современной тенденции в измерении пространственных характеристик МП с помощью систем, ориентированных на измерение и математическую обработку больших массивов

данных о магнитном поле вблизи ТО. Такие системы должны прийти на смену системам с одноразовым измерением магнитного поля, как несоответствующим современным требованиям.

Список литературы: 1. *Розов В.Ю.* Системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергонасичених об'єктів: Автореф. дис. ...доктора техн. наук / ІЕД НАНУ. – К., 2002. – 40 с. 2. *Smythe W.* Static and Dynamic Electricity. – ISBN: 0891169172, Publisher: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 623 p. 3. *Стрэттон Дж. А.* Теория электромагнетизма. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с. 4. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 774 с. 5. *Паркинсон У.Д.* Введение в геомагнетизм. – М.: Мир, 1986. – 528 с. 6. *Holmes John J.* Theoretical Development of Laboratory Techniques For Magnetic Measurement of Large // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, № 5. – P. 3790-3797. 7. *Гетьман А.В.* Особенности исследования магнитного поля технического объекта вблизи его поверхности // Техническая электродинамика. – 2006. – Тематический выпуск. Ч. 6. Проблеми сучасної електротехніки. – С. 9-12. 8. *Волохов С.А., Ивлева Л.Ф.* Методическая погрешность измерений магнитного момента // Технічна електродинаміка. – 1996. – № 4. – С. 72-74. 9. http://www.jarl.or.jp/English/5_Fuji/ejiki.htm. 10. *Chadebec O., Rouve L-L., Coulomb J-L.* New method for a fast and easy computation of stray fields created by wound rods // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – Vol 38. – P. 1005-1010. 11. *Волохов С.А., Добродеев П.Н., Ивлева Л.Ф., Кильдишев А.В.* Метрологическое обеспечение измерений магнитных параметров судового оборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению (ISC'98). – Том 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 28-34. 12. <http://mscweb.gsfc.nasa.gov/549web/5493web/EMCFacilities.htm>. 13. *Драновский В.И., Зигунов В.Н., Ростовская А.А., Чередниченко Э.А.* Измерение и компенсация магнитного момента спутника // Сб. "Космическая стрела". – М.: Наука, 1974. – С. 147-161. 14. *Розов В.Ю., Гетьман А.В.* Структура контурных динамических систем для практического гармонического анализа магнитного поля технических объектов // Техническая электродинамика. Тематический выпуск. Ч. 3. Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – С. 97-100.

Поступила в редколлегию 16.02.2009