

УДК 621.317.44

Ракі Альравашдех

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

МЕТОД ТА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ОКТУПОЛЬНОГО МАГНІТНОГО МОМЕНТУ ЗОНАЛЬНОЇ ГАРМОНІКИ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

В результаті дослідження, на основі моделювання зовнішнього магнітного поля джерела у вигляді сукупності просторових гармонік – мультиполів, вперше розроблено точковий магнітометричний метод вимірювання октупольного магнітного моменту. Метод заснований на вимірюванні компонент напруженості поля, зокрема, для зональної гармоніки, в дванадцяти точках простору з певними координатами і визначенні за результатами вимірювань октупольного магнітного моменту з визначенням величини зональної гармоніки в будь-якій точці простору.

Ключові слова: зональна гармоніка, октупольний магнітний момент, напруженість магнітного поля, точковий магнітометричний метод, дипольний магнітний момент, квадрупольний магнітний момент.

Вступ

В різних галузях науки і техніки потрібно визначати параметри зовнішнього магнітного поля (ЗМП). Такі задачі виникають при необхідності оцінити вплив магнітного поля на магніточутливі пристрої, при ідентифікації об'єктів охоронними системами, в космічних дослідженнях необхідно володіти інформацією про просторову конфігурацію магнітного поля фізичних тіл. Сукупною характеристикою магнітного поля технічного об'єкту є магнітний момент, через котрий можливо визначити напруженість поля в будь-якій точці простору – один з найважливіших магнітних параметрів фізичних тіл, які є джерелом магнітного поля і, зокрема, дипольний, квадрупольний і октупольний магнітний моменти.

Постановка проблеми. Існуючі магнітометричні методи вимірювання магнітного моменту можна розділити на точкові, засновані на вимірюванні напруженості поля в одній або декількох точках простору, та інтегральні, засновані на вимірюванні магнітного потоку. До недоліків інтегральних методів відноситься складність конструкції і великі розміри первинного вимірювального перетворювача при вимірюваннях магнітного моменту великогабаритних об'єктів, а також значні похибки вимірювання. Точкові методи відрізняє простота первинних перетворювачів. Однак вони також мають ряд недоліків: невисоку точність, пов'язану з недостатньою селективністю необхідної складової магнітного моменту системою датчиків з повного спектру поля, що обумовлено недосконалістю теоретичних основ методу. У деяких областях науки та техніки, наприклад, космічних дослідженнях, необхідна інформація про значення не тільки дипольного, а також квадрупольного і октупольного магнітних моментів. Застосування інтегральних методів для вимірювання квадрупольного і октупольного магнітних моментів невідомо, а відомі точкові методи обмежуються вимірюванням лише дипо-

льного магнітного моменту. Тому розробка методів вимірювання квадрупольних та октупольних моментів є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Відомо, що існуючі точкові методи мають достатню селективність (дипольна складова), проте їх застосування обмежено вимірюваннями лише дипольного магнітного моменту, також вони характеризуються використанням великої кількості датчиків, що обумовлює певні складнощі при створенні вимірювальної системи і схильність до впливу завад [1 – 4]. Слід зазначити наявність певних недоліків нормативної та еталонної бази вимірювань магнітного моменту, особливо це стосується метрологічного забезпечення вимірювань квадрупольних і октупольного магнітних моментів [5, 6].

Мета дослідження. Метою дослідження є вдосконалення метрологічного забезпечення єдності магнітних вимірювань шляхом розробки сукупності методу та реалізуючого його засобу вимірювання магнітних моментів n -го порядку, зокрема, октупольного магнітного моменту джерел ЗМП, що дає змогу вирішити певні науково-практичні задачі різних галузей науки та техніки.

Результати дослідження

Магнітне поле технічного об'єкту в ближній зоні зовнішнього простору можна подати у вигляді мультипольної моделі [1, 2, 7, 8]. Для аналітичного опису ЗМП такою моделлю необхідно мати додаткову інформацію про значення октупольних магнітних моментів джерела поля. Тому в цьому дослідженні розглянуто сутність розробленого багатоточкового методу і реалізуючого його засобу вимірювання октупольних магнітних моментів зональних, тесеральних і секторіальних гармонік ЗМП порядку $n=3$.

Сутність запропонованого методу міститься в селективному виділенні зональної, тесеральних і секторіальних гармонік октупольної складової маг-

нітного поля, напруженість якої убуває пропорційно $1/R^5$, з повного спектра просторових гармонік ЗМП джерела поля шляхом вимірювання напруженості навколо джерела магнітного поля розподіленою у просторі системою датчиків і визначення за результатами вимірювання октупольних магнітних моментів зональної, тесеральних і секторіальних гармонік ЗМП третього порядку. Практична реалізація багаточислового магнітометричного методу вимірювання октупольних магнітних моментів здійснюється системою з 36 індукційних датчиків, що утворюють 7-канальну вимірювальну систему, схему розміщення системи первинних вимірювальних перетворювачів якої навколо досліджуемого джерела ЗМП зображено на рис. 1.



Рис. 1. Схема розміщення системи датчиків вимірювальної системи в площині XOY

Система первинних вимірювальних перетворювачів має двокомпонентні 1-4 і однокомпонентні датчики 5-8, які розміщені в екваторіальній площині на колах з радіусами R і R_1 відповідно, однокомпонентні осьові датчики 9-12 і 13-16, які розміщені в паралельних площинах $\pm Z$ на двох колах однакового радіусу R із співпадаючими осями, однокомпонентні осьові датчики 17-20, а також двокомпонентні 21-28 і 29-36, які розміщені в екваторіальній площині на колах з радіусами R і R_1 .

За рахунок запропонованих схемотехнічних рішень по розміщенню 36 датчиків навколо досліджуемого джерела і комутації їх котушок вимірювальна система має 7 каналів наступного призначення:

– канал Z3-0 для вимірювання октупольного моменту M_{g30} зональної гармоніки осьовими датчиками 5z-8z і 9z-16z, чутливість яких до напруженості магнітного поля дорівнює кратності 2:1;

– канал X3-1 для вимірювання октупольного моменту M_{g31} тесеральної гармоніки з індексом $m=1$, поле якої змінюється за законом $\cos \varphi$ радіа-

льними 21R-24R, 29R-32R і дотичними 25 φ -28 φ , 33 φ -36 φ котушками двокомпонентних датчиків 21-28 і 29-36, які розміщені на колах з радіусами R і R_1 ;

– канал Y3-1 для вимірювання октупольного моменту M_{h31} тесеральної гармоніки з індексом $m=1$, поле якої змінюється за законом $\sin \varphi$, дотичними 21 φ -24 φ , 29 φ -32 φ і радіальними 25R-28R, 33R-36R котушками двокомпонентних датчиків 21-36;

– канал X3-2 для вимірювання октупольного моменту M_{g32} тесеральної гармоніки з індексом $m=2$, поле якої змінюється за законом $\cos 2\varphi$, осьовими котушками 1z-4z двокомпонентних датчиків 1-4, які розміщені рівномірно на колі з радіусом R в точках з кутовою координатою $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$;

– канал Y3-2 для вимірювання октупольного моменту M_{h32} тесеральної гармоніки з індексом $m=2$, поле якої змінюється за законом $\sin 2\varphi$, осьовими котушками 17z-20z однокомпонентних датчиків 17-22, які розміщені рівномірно на колі з радіусом R в точках з кутовою координатою $\varphi = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$;

– канал X3-3 для вимірювання октупольного моменту M_{g33} секторіальної гармоніки, поле якої змінюється за законом $\cos 3\varphi$, радіальними котушками 1R, 3R і 25R-28R двокомпонентних датчиків 1,3 і 25-28, які розміщені на колі з радіусом R ;

– канал Y3-3 для вимірювання октупольного моменту M_{h33} секторіальної гармоніки, поле якої змінюється за законом $\sin 3\varphi$, радіальними котушками 2R, 4R і 21R-24R двокомпонентних датчиків 2,4 і 21-24, які розміщені на колі з радіусом R в точках з кутовою координатою $\varphi = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ$.

Сутність розробленого методу розглянемо на прикладі вимірювання зональної гармоніки октупольної складової ЗМП. Вимірювання осьового октупольного моменту M_{g30} зональної гармоніки октупольної складової ЗМП, магнітний потенціал якої

$$U_{30} = \frac{1}{32\pi R^4} g_{30} (3 \cos \theta + 5 \cos 3\theta),$$

здійснюється двома системами z-вих котушок 5z-8z і 9z-16z, які розташовані навколо джерела поля в дванадцяти точках (рис. 2, 3).

В цій системі осьові котушки з'єднані в октупольному полі зональної гармоніки, що пропорційне g_{30} , електрично послідовно згідно, а поміж себе ці датчики з'єднані зустрічно.

На магнітні осі z-вих котушок 5z-16z каналу Z3-0 вимірювальної системи впливають осьові компоненти напруженості ЗМП і наводять в них, корисні і заваднесучі сигнали. При цьому результуючий сигнал аналітично подається виразом у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{E}_z^{30} = & -\frac{8g_{10}}{k_f} \left[\frac{1}{R_1^3} - \frac{R^2 - 2z^2}{(R^2 + z^2)^{5/2}} \right] + \frac{4g_{30}}{k_f} \times \\ & \times \left[\frac{3}{R_1^5} - \frac{8z^4 - 24z^2R^2 + 3R^4}{(R^2 + z^2)^{9/2}} \right] + \dots = \\ & = \dot{E}_{z1}^{30} + \dot{E}_{z3}^{30} + \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

де \dot{E}_{z1}^{30} – сигнал завади, який утворюється дипольною складовою ЗМП, що пропорційна g_{10} ; \dot{E}_{z3}^{30} – корисний сигнал від осьового октупольного поля зональної гармоніки, що пропорційний g_{30} .

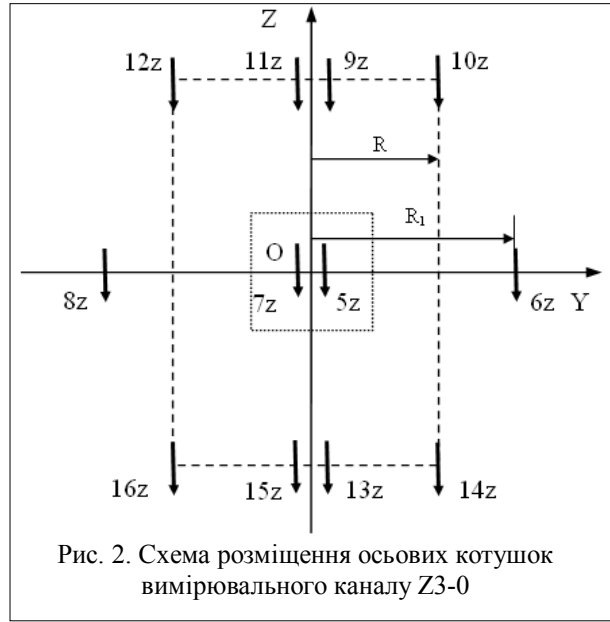


Рис. 2. Схема розміщення осьових котушок вимірювального каналу Z3-0

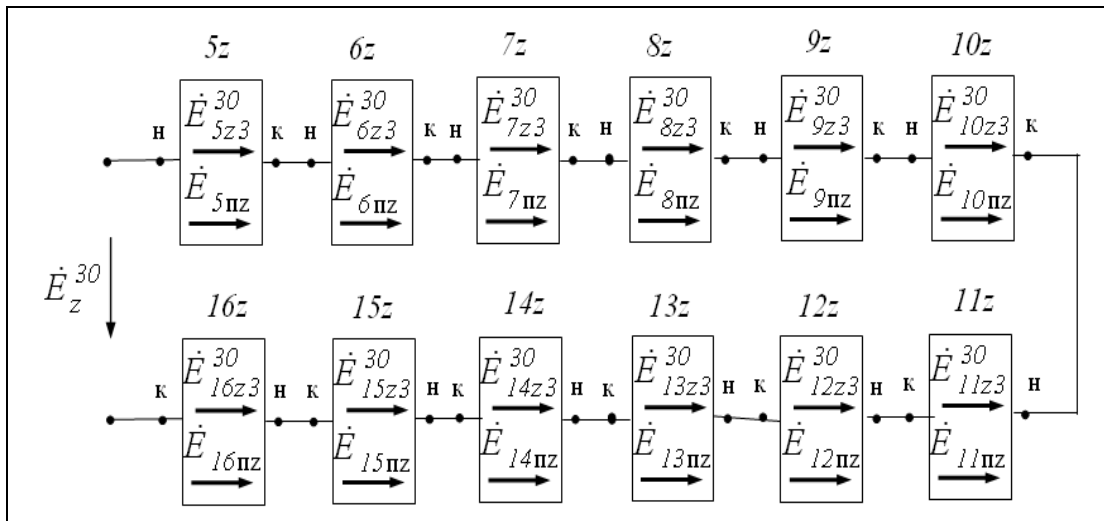


Рис. 3. Електрична схема з'єднання осьових котушок каналу Z3-0

Згідно виразу (1) в електричному сигналі \dot{E}_z^{30} каналу Z3-0 відсутні сигнали завад, які обумовлені мультиполями просторових гармонік ЗМП парного порядку. Тому похибка вимірювання результуючого сигналу \dot{E}_z^{30} виникає внаслідок дії заваднесучих гармонік ЗМП непарного порядку ($p=1, 5, 7, \dots$).

З виразу (1) виходить, що сигнал завади \dot{E}_{z1}^{30} дорівнюватиме нулю за виконання умови

$$\frac{1}{R^3} = \frac{R^2 - 2z^2}{(R^2 + z^2)^{5/2}}, \text{ що подамо у вигляді залежності}$$

$$\frac{R_1}{R} = \left[\frac{[1 + (z/R)^2]^{5/2}}{1 - 2(z/R)^2} \right]^{1/3}.$$

В цьому випадку результуючий сигнал на виході каналу Z3-0 вимірювальної системи приймає вигляд

$$\dot{E}_{z0}^{30} = \frac{4g_{30}}{k_f} \left[\frac{3}{R_1^5} - \frac{3R^2(R^2 - 8z^2) + 8z^4}{(R^2 + z^2)^{9/2}} \right] + \dots \quad (2)$$

Для залежності $R_1/R = f(z/R)$ приймемо $z/R = 0,3$ і знаходимо відповідне значення співвідношення $R_1/R = 1,15$, при яких сигнал завади $\dot{E}_{z3}^{30} = 0$. Після підставлення знайдених значень параметрів z і R_1 до виразу (2) отримаємо для вимірювального каналу Z3-0 наступний вираз

$$\dot{E}_{z0}^{30} = \dot{E}_{z1}^{30} + \dots = \frac{7}{2} \frac{g_{30}}{k_f R^5}, \quad (3)$$

чутливість каналу Z3-0: $S_z^{30} = 7/(2k_f)$, мЭ/мВ.

За результатами вимірювання \dot{E}_{z3}^{30} (3) визначаємо осьовий октупольний момент зональної гармоніки

$$g_{30} = \dot{M}_{g30} = \frac{2}{7} \dot{E}_z^{30} k_f R^5$$

і відповідно напруженість магнітного поля зональної гармоніки октупольної складової магнітного поля в довільних точках зовнішнього простору:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{R30} &= -\frac{\partial U_{30}}{\partial R} = \\ &= \frac{\dot{M}_{g30}}{8\pi R^5} (3 \cos \theta + 5 \cos 3\theta); \\ \dot{H}_{\varphi 30} &= -\frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial U_{30}}{\partial \varphi} = 0; \\ \dot{H}_{\theta 30} &= -\frac{1}{R} \frac{\partial U_{30}}{\partial \theta} = \frac{3\dot{M}_{g30}}{32\pi R^5} (\sin \theta + 5 \sin 3\theta). \end{aligned}$$

Висновки

1. У статті розглянуто сутність магнітометричного методу вимірювання октупольного магнітного моменту ЗМП технічних об'єктів, що є вперше розробленим.
2. Результати дослідження можуть бути використані при вирішенні задач електромагнітної сумісності об'єктів, дослідженні космічних об'єктів, в задачах ідентифікації об'єктів в охоронних системах, при створенні вимірювальних систем та випробувальних магнітометричних стендів.
3. Дослідження виявили необхідність розробки нових нормативних документів з урахування сучасних вимог різних галузей техніки та гармонізації їх з міжнародними нормативними документами, оскільки для точного опису магнітних полів технічних об'єктів, їх ідентифікації та позиціонування необхідне створення зразкових мір магнітних моментів вищих порядків.

МЕТОД И СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ОКТУПОЛЬНОГО МАГНИТНОГО МОМЕНТА ЗОНАЛЬНОЙ ГАРМОНИКИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Раки Альравашдех

В результате исследования, на основе моделирования внешнего магнитного поля источника совокупностью пространственных гармоник – мультиполей, впервые разработан точечный магнитометрический метод измерения октупольного магнитного момента. Метод основан на измерении компонент напряженности поля, в частности, для зональной гармоник, в двенадцати точках пространства с определенными координатами и определении по результатам измерений октупольного магнитного момента с определением величины зональной гармоник в любой точке пространства.

Ключевые слова: зональная гармоника, октупольный магнитный момент, напряженность магнитного поля, точечный магнитометрический метод, дипольный магнитный момент, квадрупольный магнитный момент.

METHOD AND SYSTEM FOR MEASURING ZONAL HARMONIC OF THE OCTUPOLE MAGNETIC MOMENT OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD

Raqi Alrawashdeh

The study based on the modeling of the external magnetic field source by a spatial harmonics – multiples. In result for the first time the point magnetometric method of measuring magnetic octupole moment is developed. The method is based on measuring the component of the magnetic field strength, in particular for zonal harmonics, in the twelve points of space with defined coordinates and determining from the measurements octupole magnetic moment with the determination of the magnitude of the zonal harmonics in any precise space.

Keywords: zonal harmonic, octupole magnetic moment, tension of magnetic-field, point magnetometer method, dipole magnetic moment, quadrupole magnetic moment.

Список літератури

1. Волохов С.А. Пространственный гармонический анализ внешнего магнитного поля технического объекта [Текст] / С.А. Волохов, П.Н. Добродеев // *Техническая электродинамика*. – 1996. – № 2. – С. 3-8.
2. Байда Е.И. К вопросу о возможности расчёта электромагнитных полей в электрических аппаратах при помощи магнитного момента [Текст] / Е.И. Байда // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. – 2005. – № 48. – С. 3-10.
3. Дегтярёв А.В. Двенадцатиточечный метод и трехмодульная измерительная система для пространственного гармонического анализа магнитного поля [Текст] / А.В. Дегтярёв // *Электротехника и электромеханика*. – 2006. – № 6. – С. 57-59.
4. Дегтярёв А.В. Двухмодульная система измерения зональной гармоник первого порядка магнитного поля технических объектов [Текст] / А.В. Дегтярёв // *Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ'2005) – Том VII – Международная конференция “Метрология и измерительная техника” (МКМИТ'2005)*. – X., 2005. – С. 156-159.
5. ГОСТ 8.231-84 Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения магнитного момента и магнитной восприимчивости [Текст]. – Введ. 01.08.83. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 5 с.
6. ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силового. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля [Текст]. – Введ. 01.07.93. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 5 с.
7. Buschow K.J.H. *Physics of Magnetism and Magnetic Materials* [Text] / K.J.H. Buschow, F.R. de Boer. – 2004. – P. 182.
8. Яновский Б.М. *Земной магнетизм* [Текст] / Б.М. Яновский. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. – 592 с.

Надійшла до редколегії 3.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Руженцев, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.