

УДК 621.3.013:389

Вимірювання дипольних магнітних моментів технічних об'єктів

В. В. Дегтярьов

Надійшла до редакції 02.10.00

На основі мультипольної моделі зовнішнього магнітного поля запропоновано шістнадцятиточковий магнітометричний метод вимірювання дипольних моментів технічних об'єктів, що зменшує вплив завадонесучих мультиполів і зовнішніх електромагнітних завад на точність вимірювань.

Точність вимірювання дипольного магнітного моменту супутника безпосередньо пов'язана з вирішенням навігаційних задач і в кінцевому рахунку впливає на визначення траєкторії і орієнтацію супутника, через те що навіть невеликі за величиною, але постійно наявні недипольні складові магнітного потенціалу приводять до появи суттєвих похибок [1]. Тому підвищення точності зазначених вимірювань визначає необхідність розробки магнітометричних методів і засобів вимірювання магнітних параметрів джерела поля, які захищені від впливу завадонесучих мультиполів вимірюваного джерела і, крім того, — від нестационарних електромагнітних полів, що створюються зовнішніми джерелами.

Вимірювання дипольних магнітних моментів засновано на мультипольній моделі зовнішнього магнітного поля (ЗМП) джерела, яка аналітично подається гармонічним рядом Гаусса [2] в циліндричній системі координат:

$$U = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (R^2 + z^2)^{-(n+1)/2} \times \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m [z(R^2 + z^2)^{-1/2}], \quad (1)$$

де g_{nm} , h_{nm} — постійні коефіцієнти ряду, що дорівнюють магнітним моментам мультиполів m -го по-

рядку просторової гармоніки порядку n ; $P_n^m [z(R^2 + z^2)^{-1/2}]$ — приєднані поліноми Лежандра.

Для просторової гармоніки першого порядку ($n = 1$) коефіцієнти g_{11} , h_{11} , g_{10} дорівнюють компонентам дипольного магнітного момента джерела ЗМП на ортогональні осі X , Y , Z : $g_{11} = M_x$, $h_{11} = M_y$, $g_{10} = M_z$.

Мультипольна концепція магнітного поля джерела дозволяє застосувати точковий магнітометричний метод з метою виділення дипольної складової магнітного поля зі спектру мультиполів просторових гармонік ЗМП вищого порядку ($n \geq 2$), що приводить в кінцевому рахунку до необхідності створення точкових магнітометричних пристроїв першого порядку для вимірювання складових дипольних моментів джерел ЗМП.

На точність вимірювання дипольних моментів технічних об'єктів впливають мультиполя вищих порядків вимірюваного ЗМП — квадруполь, октуполь та інші, які є завадами і приводять до появи мультипольної складової методичної похибки.

Зниження цієї похибки може бути досягнуто за рахунок виключення сигналів завад, що створюються мультиполями гармонік парного порядку і мультиполями октупольної складової магнітного поля шляхом вибору оптимальної сітки контрольних точок і розташування певного числа первинних індукційних перетворювачів точкового типу (дат-

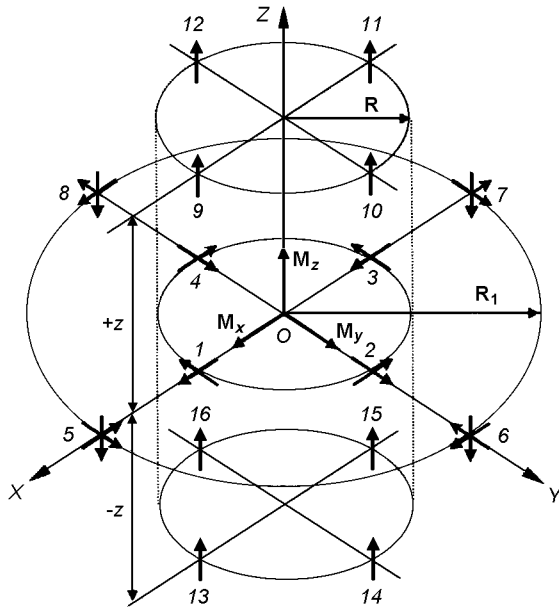


Схема розміщення точкових датчиків 1 — 16 навколо вимірюваного джерела ЗМП (див. текст)

чиків) навколо досліджуваного джерела ЗМП.

Пропонується шістнадцятиточковий магнітометричний метод вимірювання компонентів M_x , M_y , M_z дипольної складової ЗМП джерела с точністю до завданесучої гармоніки п'ятого порядку. Схема розміщення точкових датчиків навколо вимірюваного джерела ЗМП і орієнтація їх магнітних осей відносно вимірюваних складових M_x , M_y , M_z зображена на рисунку. Тут X , Y , Z — осі прийнятої системи координат, початок якої суміщений з геометричним центром вимірювального пристрою; стрілками позначено орієнтацію магнітних осей котушок датчиків, початок і кінець яких відповідають початку і кінцю обмотки індукційних котушок датчиків.

Як видно, пристрій виконано з шістнадцяти датчиків, поділених на три системи: дві по чотири датчики і вісім датчиків в третій. Системи двокомпонентних датчиків 1 (R , 0° , 0), 2 (R , 90° , 0), 3 (R , 180° , 0), 4 (R , 270° , 0) і друга система трикомпонентних датчиків 5 (R_1 , 0° , 0), 6 (R_1 , 90° , 0), 7 (R_1 , 180° , 0), 8 (R_1 , 270° , 0) розміщені в екваторіальній площині ($z = 0$) рівномірно на колах радіусів R і R_1 відповідно ($R_1/R = 1.15$). Вісім однокомпонентних датчиків третьої системи 9 (R , 0° , $+z$), 10 (R , 90° , $+z$), 11 (R , 180° , $+z$), 12 (R , 270° , $+z$) і 13 (R , 0° , $-z$), 14 (R , 90° , $-z$), 15 (R , 180° , $-z$), 16 (R , 270° , $-z$) розміщені в площинах $\pm z$ на двох аксіальних колах радіуса R ,

чутливість до напруженості магнітного поля цих датчиків удвічі менша, ніж чутливість осьових котушок датчиків 5—8. Котушки кожної з систем датчиків з'єднані відносно вимірюваного дипольного поля послідовно узгоджено, відносно одна одну — зустрічно.

ВИМІРЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ РАДІАЛЬНОГО ДІПОЛЬНОГО МОМЕНТА

Відносно вимірюваного дипольного поля, пропорційного g_{11} , радіальні і дотичні котушки вимірювального каналу X з'єднані електрично послідовно узгоджено, тому корисні сигнали, які наводяться в цих котушках вимірюваним дипольним полем, підсумовуються.

На магнітні осі радіальних $1R$, $3R$, $5R$, $7R$ і дотичних 2φ , 4φ , 6φ , 8φ котушок датчиків 1—8, що здійснюють вимірювання M_x , впливають відповідно радіальна і дотична складові напруженості ЗМП джерела, які знаходяться шляхом диференціювання потенціалу $U(1)$ за координатами R і φ .

Для аналізу запропонованого шістнадцятиточкового магнітометричного методу достатньо обмежити гармонічні ряди радіальної і дотичної складових напруженості ЗМП членами до $n = 3$, які в цьому випадку для точок екваторіальної площини описуються такими виразами:

— радіальна складова напруженості ЗМП

$$\begin{aligned}
 H_R(z=0) &= -\frac{\partial U}{\partial R} = \\
 &= \frac{1}{4\pi R^3} \{2(g_{11}\cos\varphi + h_{11}\sin\varphi) + \\
 &+ \frac{3}{R} \left[-\frac{1}{2}g_{20} + 3(g_{22}\cos 2\varphi + h_{22}\sin 2\varphi) \right] + \\
 &+ \frac{6}{R^2} [-g_{31}\cos\varphi - h_{31}\sin\varphi + 10(g_{33}\cos 3\varphi + h_{33}\sin 3\varphi)] \}; \quad (2)
 \end{aligned}$$

— дотична складова напруженості ЗМП

$$\begin{aligned}
 H_\varphi(z=0) &= -\frac{\partial U}{R\partial\varphi} = \\
 &= \frac{1}{4\pi R^3} \{ (g_{11}\sin\varphi - h_{11}\cos\varphi) + \\
 &+ \frac{6}{R} (g_{22}\sin 2\varphi - h_{22}\cos 2\varphi) + \frac{3}{R^2} \left[-\frac{1}{2} (g_{31}\sin\varphi - \right. \\
 &\left. - h_{31}\cos\varphi) + 15(g_{33}\sin 3\varphi - h_{33}\cos 3\varphi) \right] \} + \dots \quad (3)
 \end{aligned}$$

Ці складові впливають на магнітні осі котушок каналу X і наводять електричні сигнали:

— в системі котушок $1R$, 2φ , $3R$, 4φ датчиків

1—4, що розміщені на колі радіуса R

$$E'_x = \frac{1}{k_f} (H_{R1} + H_{\varphi 2} - H_{R3} - H_{\varphi 4}) =$$

$$= \frac{6g_{11}}{k_f R^3} + \frac{15(-g_{31} + 2g_{33})}{k_f R^5} + \dots = E'_{x1} + E'_{x3} + \dots; \quad (4)$$

— в системі котушок $5R, 6\varphi, 7R, 8\varphi$ датчиків 5—8, що розміщені на колі радіуса R_1

$$E''_x = \frac{1}{k_{f1}} (H_{R5} + H_{\varphi 6} - H_{R7} - H_{\varphi 8}) =$$

$$= \frac{6g_{11}}{k_{f1} R_1^3} + \frac{15(-g_{31} + 2g_{33})}{k_{f1} R_1^5} + \dots = E''_{x1} + E''_{x3} + \dots, \quad (5)$$

де k_f, k_{f1} — постійні по напруженості магнітного поля датчиків 1—4 і 5—8 відповідно; E'_{x1}, E''_{x1} — корисні сигнали, які пропорційні коефіцієнту g_{11} дипольної складової магнітного поля; E'_{x3}, E''_{x3} — сигнали завод, що пропорційні коефіцієнтам g_{31}, g_{33} октупольної складової магнітного поля.

Результуючий електричний сигнал на виході вимірювального каналу X дорівнює різниці сигналів (4), (5) вказаних систем котушок, що з'єднані послідовно стрічно

$$E_x = \frac{6g_{11}}{k_f R^3} \left(\frac{k_s R^3}{R_1^3} - 1 \right) + \frac{15}{k_f R^5} (-g_{31} + 2g_{33}) \times$$

$$\times \left(k_s \frac{R^5}{R_1^5} - 1 \right) + \dots = E_{x1} + E_{x3} + \dots, \quad (6)$$

де $k_s = k_f/k_{f1} = S_1/S$; S, S_1 — чутливості до напруженості магнітного поля радіальних і дотичних котушок датчиків 1—4 і 5—8 відповідно.

В сигналі E_x відсутні сигнали завод, що створюються мультиполями парних заводонесучих гармонік. За умови $R_1 = k_s^{1/5} R$ сигнал завод E_{x3} , який створюється октупольною складовою магнітного поля ($n = 3$), дорівнює нулю. В цьому випадку результуючий електричний сигнал на виході вимірювального каналу X буде дорівнювати

$$E_x = \frac{6g_{11}}{k_f R^3} (k_s^{2/5} - 1) + \dots = E_{x1} + \dots \quad (7)$$

За виміряним значенням електричного сигналу E_x визначається x -складова дипольного моменту джерела ЗМП:

$$g_{11} = M_x = \frac{1}{6} E_x k_f R^3 / (k_s^{2/5} - 1).$$

Результуючий сигнал E_x вимірюється з похибкою, яка зумовлена непарними заводонесучими гармоніками ЗМП вищих порядків, з яких гар-

моніка п'ятого порядку вносить основний вагомий вклад в мультипольну складову методичної похибки вимірювання.

Компоненти напруженості магнітного поля заводонесучої гармоніки п'ятого порядку впливають на магнітні осі радіальних і дотичних котушок вимірювального каналу X і утворюють сигнал заводи, який дорівнює

$$E_{x5} = \frac{210}{k_f R^7} \frac{1 - k_s^{2/5}}{k_s^{2/5}} \left(\frac{1}{8} g_{51} - \frac{3}{2} g_{53} + 99g_{55} \right),$$

де

$$g_{51} = \frac{5}{8} M_x x_0^4, \quad g_{53} = -\frac{5}{192} M_x x_0^4, \quad g_{55} = \frac{1}{384} M_x x_0^4;$$

x_0 — координата ексцентричності магнітного моменту M_x відносно прийнятої системи координат по осі X .

Мультипольна складова методичної похибки вимірювання M_x за умови $k_s = 2$ дорівнює

$$\delta_x = \frac{E_{x5}}{E_{x1}} 100 \% = -10 \left(\frac{k_x}{R/L_x} \right)^4 100 \%, \quad (8)$$

де $k_x = x_0/L_x \leq 0.5$ — коефіцієнт ексцентричності дипольного моменту M_x ; L_x — габаритний розмір джерела ЗМП за координатним напрямком X .

Аналогічним чином визначається корисний електричний сигнал, що наводиться в котушках $1\varphi, 2R, 3\varphi, 4R$ і $5\varphi, 6R, 7\varphi, 8R$ вимірювального каналу Y , який за умови $R_1 = k_s^{1/5} R$ буде дорівнювати

$$E_y = \frac{6h_{11}}{k_f R^3} (k_s^{2/5} - 1) + \dots = E_{y1} + \dots$$

Сигнал заводи, що наводиться радіальною H_{R5} і дотичною $H_{\varphi 5}$ компонентами п'ятої гармоніки ЗМП у вказаних котушках каналу Y , дорівнює

$$E_{y5} = \frac{210}{k_f R^7} \frac{1 - k_s^{2/5}}{k_s^{2/5}} \left(\frac{1}{8} h_{51} + \frac{3}{2} h_{53} + 99h_{55} \right),$$

де

$$h_{51} = \frac{5}{8} M_y y_0^4, \quad h_{53} = \frac{5}{192} M_y y_0^4, \quad h_{55} = \frac{1}{384} M_y y_0^4;$$

y_0 — координата ексцентричності моменту M_y по осі Y .

Мультипольна похибка вимірювання M_y визначається виразом ($k_s = 2$)

$$\delta_y = \frac{E_{y5}}{E_{y1}} 100 \% = -10 \left(\frac{k_y}{R/L_y} \right)^4 \cdot 100 \%, \quad (9)$$

$k_y = y_0/L_y \leq 0.5$ — коефіцієнт ексцентричності ди-

польного моменту M_y ; L_y — габаритний розмір джерела ЗМП по координатному напрямку Y .

З аналізу виразів (8), (9) випливає, що при розміщенні датчиків на контрольній відстані двох габаритних розмірів джерела ЗМП для $k_x = k_y = 1/3$ складова методичної похибки вимірювання M_x і M_y дорівнює 0.77 %.

ВИМІРЮВАННЯ ОСЬОВОГО ДІПОЛЬНОГО МОМЕНТА M_z

Вимірювання складової M_z здійснюється z -котушками трикомпонентних 5—8 і однокомпонентних 9—16 датчиків, магнітні осі яких орієнтовані паралельно координатній осі Z . На магнітні осі котушок $5z - 8z$ і $9z - 16z$ каналу Z впливає осьова складова напруженості магнітного поля вимірюваного джерела $H_z = -\partial U / \partial z$. Результуючий сигнал на виході каналу Z дорівнює:

$$E_z = -\frac{8g_{10}}{k_f} \left[\frac{1}{R_1^3} + \frac{2z^2 - R^2}{(R^2 + z^2)^{5/2}} \right] + \frac{4g_{30}}{k_f} \left[\frac{3}{R_1^5} - \frac{3R^2(R^2 - 8z^2) + 8z^4}{(R^2 + z^2)^{9/2}} \right] + \dots = E_{z1} + E_{z3} + \dots$$

де E_{z1} — результуючий корисний сигнал; E_{z3} — результуючий сигнал завади від гармоніки порядку $n = 3$.

З останнього виразу випливає, що за умови

$$\frac{8z^4 - 24z^2R^2 + 3R^4}{(R^2 + z^2)^{9/2}} = \frac{3}{R_1^5}$$

сигнал завади E_{z3} , що створюється октупольною складовою магнітного поля, буде дорівнювати нулю. Запишемо останній вираз у вигляді функції $R_1/R = f(z/R)$:

$$\frac{R_1}{R} = \left[\frac{8}{3} \left(\frac{z}{R} \right)^4 - 8 \left(\frac{z}{R} \right)^2 + 1 \right]^{-1/5} \left[1 + \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right]^{9/10},$$

для якої за умови $z/R = 0.22$, що відповідає співвідношенню $R_1/R = 2^{1/5}$, сигнал $E_{z3} = 0$.

В цьому випадку результуючий сигнал E_z вимірювального каналу Z буде дорівнювати

$$E_z = \frac{1.14g_{10}}{k_f R^3} + \dots = E_{z1} + \dots,$$

звідки $g_{10} = M_z = 0.88E_z k_f R^3$.

Електричний сигнал E_z вимірюється з похибкою, що обумовлена заводонесучою п'ятою гармонікою ЗМП, яка наводить в осьових котушках вимі-

рювального каналу Z сигнал завади

$$E_{z5} = \frac{1}{k_f R^7} (-3.65g_{50} + 0.45g_{54}),$$

де $g_{50} = 5M_z z_0$, $g_{54} = 0$ — коефіцієнти, які дорівнюють магнітним моментам п'ятої гармоніки при зміщенні момента M_z на координату z_0 по осі Z .

Похибка вимірювання M_z дорівнює

$$\delta_z = \frac{E_{z5}}{E_{z1}} \cdot 100 \% = 16 \left(\frac{k_z}{R/L_z} \right)^4 \cdot 100 \%,$$

де $k_z = z_0/L_z \leq 0.5$ — коефіцієнт ексцентричності дипольного моменту M_z ; L_z — габаритний розмір джерела ЗМП по координатному напрямку Z .

Аналіз останнього виразу виявляє, що на контрольній відстані $R = 2L_z$ для $k_z = 1/3$ мультипольна похибка вимірювання дипольного моменту M_z дорівнює 1.23 %.

ВИСНОВКИ

1. Запропонований магнітометричний метод вимірювання дипольних магнітних моментів технічних об'єктів і вимірювальний пристрій, що його реалізує, забезпечують селективне виділення дипольної складової магнітного поля зі спектру мультиполів ЗМП з точністю до п'ятої гармоніки.

2. За рахунок оптимального вибору сітки точок розміщення магніточутливих датчиків навколо вимірюваного джерела ЗМП досягається локалізація завади, що створюється мультиполями парних гармонік ЗМП і непарної гармоніки третього порядку, внаслідок чого підвищується точність вимірювання.

3. Шістнадцятиточковий заводозахищений вимірювальний пристрій може бути використаний для вимірювання дипольних моментів технічних об'єктів, до яких ставляться вимоги щодо обмеження рівня напруженості магнітного поля.

1. Сарычев В. А., Овчинников М. Ю. Магнитные системы ориентации искусственных спутников Земли. — М., 1985.—104 с.—(Итоги науки и техники. Сер. Исследование космического пространства; Т. 23).
2. Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1978.—592 с.

MEASUREMENT OF MAGNETIC DIPOLE MOMENTS OF ENGINEERING OBJECTS

V. V. Dehtiar'ov

We propose a 16-point magnetometric method for measuring dipole moments of engineering objects. The method is based on a multipole model of the external magnetic field, which diminishes the effect of interfering multipoles and external electromagnetic disturbances on the accuracy of measurements.