

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОЛЯ ЗАВАДИ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО МОМЕНТУ ЗОНАЛЬНОЇ ГАРМОНІКИ КВАДРУПОЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ПОЛЯ ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА

**В. В. ДЕГТЯРЬОВ**

Аналіз зовнішнього магнітного поля (ЗМП), що створюється технічним об'єктом в ближній зоні навколишнього простору, пов'язаний з необхідністю проведення вимірювань не тільки дипольних магнітних моментів, значення яких нормовані для промислових зразків електрообладнання [1], але й квадрупольних моментів, за значеннями яких визначається рівень напруженості мультиполя другого порядку. Використання для аналізу ЗМП технічного об'єкта в ближній зоні мультипольної теорії, згідно якої поле в зовнішньому просторі подається як сума окремих просторових мультиполів — диполя, квадруполя, октуполя і т.ін, дозволяє вирішити питання підвищення точності вимірювання параметрів ЗМП в цілому. Такий підхід зумовлений необхідністю застосування адекватної моделі ЗМП джерела в зоні простору, що досліджується і безумовно вимагає урахування впливу параметрів мультиполя другого порядку. Контроль квадрупольних магнітних моментів джерел ЗМП здійснюється точковими магнітометричними пристроями в умовах наявності електромагнітних завад сторонніх джерел. Через те що поле завади неоднорідне, виникає похибка за рахунок неповної компенсації впливу зовнішньої завади на датчики магніточутливого пристрою. Вказана похибка в цілому характеризує ступінь завадозахищеності точкового пристрою при вимірюванні квадрупольних магнітних моментів за умов наявності електромагнітних полів завад зовнішніх джерел. Тому питання оцінки вказаної похибки уявляють практичний інтерес щодо застосування точкових магнітометричних пристроїв не тільки в умовах стаціонарних магнітометричних стелів, але й в умовах експлуатації джерел ЗМП.

В зоні зовнішнього простору скалярний магнітний потенціал, що створюється довільним джерелом, можна подати у вигляді гармонічного ряду [2]:

$$U = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{R}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\cos\theta), \quad (1)$$

де  $R, \varphi, \theta$  — сферичні координати;  $g_{nm}, h_{nm}$  — постійні коефіцієнти ряду, які дорівнюють мультипольним магнітним моментам сферичних гармонік;  $P_n^m(\cos\theta)$  — приєднані поліноми Лежандра;  $n$  — номер просторової гармоніки;  $m$  — номер елементарного мультиполя гармоніки  $n$ -го порядку.

Згідно (1) магнітний потенціал квадрупольної складової магнітного поля описується виразом:

$$U_{20} = \frac{1}{4\pi R^3} g_{20} P_2^0(\cos\theta),$$

де  $g_{20}$  — коефіцієнт, який дорівнює осьовому квадрупольному магнітному моменту джерела зовнішнього магнітного поля ( $g_{20} = M_{20}$ );  $P_2^0(\cos\theta)$  — поліном Лежандра другого порядку ( $n = 2$ ) для елементарного мультиполя порядку  $m = 0$ :

$$P_2^0(\cos\theta) = \frac{1}{4} (1 + 3\cos 2\theta).$$

Для джерела ЗМП, що містить ексцентричний довільно орієнтований в робочому просторі джерела дипольний момент, осьовий квадрупольний магнітний момент буде:

$$M_{20} = -M \cos\alpha x_0 - M \cos\beta y_0 + 2M \cos\gamma z_0,$$

де  $M$  — еквівалентний дипольний магнітний момент джерела ЗМП;  $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$  — спрямовуючі косинуси магнітного диполя  $\vec{M}$ ;  $x_0, y_0, z_0$  — координати зміщення еквівалентного дипольного моменту джерела відносно початку прийнятої системи координат.

Вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту  $M_{20}$  здійснюється технічним засобом із використанням системи магніточутливих датчиків. Наявність зовнішньої електромагнітної завади в робочій зоні магнітометричного вимірювального пристрою дає значну похибки вимірювання. Тому виконати якісні вимірювання в ряді випадків, коли завада перевищує корисний сигнал, не уявляється можливим. Застосування пасивних методів захищеності вимірювального каналу магнітометричного пристрою від впливів нестаціонарних зовнішніх електромагнітних полів шляхом стрічного увімкнення котушок магніточутливих датчиків забезпечує достатню для практичних вимог точність вимірювання. Тому виникає потреба в оцінці похибки вимірювання, що зумовлена наявністю електромагнітної завади.

Розглянемо методику визначення похибки вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту джерела ЗМП одноканальним завадозахищеним пристроєм другого порядку ( $n = 2$ ).

Такий пристрій містить систему з чотирьох магніточутливих датчиків, які розміщені навколо досліджуваного джерела ЗМП в екваторіальній площині на колі радіусом  $R$  в точках із значеннями кутової координати, де  $\varphi_i = (i - 1)90^\circ, i = 1 \dots 4$  — номер датчика. Магнітні вісі котушок датчиків вимірювального пристрою радіальні до кола радіусом  $R$ , тому на ці котушки впливає радіальна компонента квадрупольної постійної складової

магнітного поля, яка знаходиться диференціюванням потенціалу  $U_{20}$  по координаті  $R$ :

$$H_{R_{20}} = -\frac{\partial U_{20}}{\partial R} = \frac{3g_{20}}{4\pi R^4} P_2^0(\cos\theta).$$

Радіальні котушки з'єднані по квадрупольному магнітному полю, що пропорційне  $M_{20}$ , електрично послідовно згідно, проте по зовнішній електромагнітній заваді — стрічно. Тому протифазні сигнали завод, що наводяться зовнішнім полем в радіальних котушках вимірювального пристрою, віднімаються, внаслідок чого результуючий сигнал завади на виході вимірювального каналу буде значно зменшений. Цей сигнал завади наводить адитивну похибку

$$\delta_{\Pi_{20}} = \frac{E_{\Pi_{20}}}{E_{20}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

де  $E_{20}$ ,  $E_{\Pi_{20}}$  — результуючий корисний сигнал і сигнал завади відповідно.

Визначимо корисний сигнал і сигнал завади, що наводяться в радіальних котушках магніточутливих датчиків з метою здійснення якісної і кількісної оцінки адитивної похибки вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту джерела ЗМП при наявності зовнішньої електромагнітної завади.

Результуючий корисний сигнал на виході вимірювального каналу, який дорівнює сумі корисних сигналів, що наведені квадрупольною постійною складовою магнітного поля в радіальних котушках магніточутливих датчиків, визначається формулою:

$$E_{20} = \frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_{i_{20}} = -\frac{6M_{20}}{k_f R^4}, \quad (3)$$

де  $k_f$ , мЭ/мВ — постійна магніточутливих датчиків щодо напруженості магнітного поля;  $H_{i_{20}}$  — значення радіальної компоненти напруженості квадрупольної складової магнітного поля в  $i$ -й точці екваторіальної площини ( $\theta = 90^\circ$ ):

$$H_{i_{20}|_{\theta=90^\circ}} = -\frac{3M_{20}}{8\pi R^4}.$$

Рівень сигналу завади, що наводиться зовнішнім електромагнітним полем в радіальних котушках вимірювального пристрою, залежить від місцеположення заводонесучого джерела і орієнтації його магнітного діполя відносно прийнятої системи координат, початок якої суміщений з геометричним центром системи датчиків магнітометричного пристрою.

Розглянемо вирішення загальної задачі, коли джерело зовнішньої завади розміщено в екваторіальній площині на колі радіусом  $R_n$ , а вісь його магнітного діполя  $M_n$  складає з магнітними осями котушок  $1R$ ,  $3R$  кут  $\alpha$ .

В цьому випадку на магнітні осі котушок  $1R$ ,  $3R$  впливає  $x$ -ва складова напруженості заводонесучого магнітного поля:

$$H_{1(3)x} = -\frac{M_n}{4\pi} [(R_n \cos \alpha_{(+)} R)^2 + R_n^2 \sin^2 \alpha]^{-5/2} \times$$

$$\times \{ \cos \alpha [-2(R_n \cos \alpha_{(+)} R)^2 + R_n^2 \sin^2 \alpha] - 3R_n (R_n \cos \alpha_{(+)} R) \sin^2 \alpha \},$$

на котушки  $2R$ ,  $4R$  впливає  $y$ -ва складова поля:

$$H_{2(4)y} = -\frac{M_n}{4\pi} [R_n^2 \cos^2 \alpha + (R_n \sin \alpha_{(+)} R)^2]^{-5/2} \times \\ \times \{ -3 \cos^2 \alpha R_n (R_n \sin \alpha_{(+)} R) + \sin \alpha [R_n^2 \cos^2 \alpha - 2(R_n \sin \alpha_{(+)} R)^2] \}.$$

Тоді результуючий сигнал завади буде:

$$E_{\Pi_{20}} = \frac{1}{k_f} (H_{1x} + H_{2y} - H_{3x} - H_{4y}) = \frac{M_n}{k_f R^3} A_{20}(\lambda, \alpha), \quad (4)$$

де  $\lambda = R_n/R$ ;  $A_{20}(\lambda, \alpha)$  — коефіцієнт, значення якого визначається формулою:

$$A_{20}(\lambda, \alpha) = -[(\lambda \cos \alpha - 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha]^{-5/25} \times \\ \times \{ \cos \alpha [-2(\lambda \cos \alpha - 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha] - 3\lambda \sin^2 \alpha (\lambda \cos \alpha - 1) \} - \\ - [(\lambda^2 \cos^2 \alpha + (\lambda \sin \alpha - 1)^2)]^{-5/2} \{ -3\lambda \cos^2 \alpha (\lambda \sin \alpha - 1) + \sin \alpha \times \\ \times [\lambda^2 \cos^2 \alpha - 2(\lambda \sin \alpha - 1)^2] \} + [(\lambda \cos \alpha + 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha]^{-5/25} \times \\ \times \{ \cos \alpha [-2(\lambda \cos \alpha + 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha] - 3\lambda \sin^2 \alpha (\lambda \cos \alpha + 1) \} + \\ + [\lambda^2 \cos^2 \alpha + (\lambda \sin \alpha + 1)^2]^{-5/2} \{ -3\lambda \cos^2 \alpha (\lambda \sin \alpha + 1) + \sin \alpha \times \\ \times [\lambda^2 \cos^2 \alpha - 2(\lambda \sin \alpha + 1)^2] \}.$$

Аналіз залежності  $A_{20}(\lambda, \alpha)$  виявляє, що за умови  $\alpha = 0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  і  $\lambda = \text{const}$  коефіцієнт  $A_{20}(\lambda, \alpha)$  досягає максимальної величини і, як видно з (4), сигнал завади в цьому випадку буде:

$$E_{\Pi_{20}} = \frac{2M_n}{k_f R^3} A_{20}(\lambda), \quad (5)$$

де  $A_{20}(\lambda)$  — коефіцієнт, максимальне значення якого

$$A_{20}(\lambda) = \frac{2(3\lambda^2 + 1)}{(\lambda^2 - 1)^3} - \frac{3\lambda}{(\lambda^2 + 1)^{5/2}}.$$

Після підстановки до виразу (2) корисного сигналу (3) і сигналу завади (5) для адитивної похибки вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту отримаємо:

$$\delta_{\Pi_{20}} = \frac{M_{\Pi_{20}}}{6M_{20}} \frac{R/L_x}{k_x} A_{20}(\lambda) \cdot 100 \%, \quad (6)$$

де  $M_{\Pi_{20}} = 2M_{\Pi_{20}x_0}$  — еквівалентний квадрупольний магнітний момент джерела зовнішньої завади;  $k_x \leq L_x/2$ ,  $L_x$  — габаритний розмір досліджуваного джерела ЗМП по координатному напрямку  $X$ .

Аналіз виразу (6) виявляє, що за умови  $M_{\Pi_{20}}/M_{20} = 100$ ,  $R/L_x = 2$  і  $k_x = 1/2$ ,  $\lambda = 20$  адитивна похибка вимірювання квадрупольного моменту  $M_{20}$  складає 0,13 %.

При цьому значенні похибки нижня межа вимірюваного осьового квадрупольного магнітного моменту визначається формулою

$$M_{20}^H = \frac{M_{\Pi_{20}}}{6\delta_{\Pi_{20}}} \frac{R/L_x}{k_x} A_{20}(\lambda)$$

і при значенні заводонесучого еквівалентного квадрупольного моменту  $1 \text{ Ам}^3$  дорівнює  $0,01 \text{ Ам}^3$ .

Таким чином, визначено похибку вимірювання осьового квадрупольного моменту, яка зумовлена дією неоднорідних полів зовнішніх завод, а також пороговий рівень вимірюваного моменту, який пов'язаний із моментом зовнішнього джерела ЗМП.

Розглянутий одноканальний чотириточковий магнітометричний пристрій має високу ступінь завадозахищеності від зовнішніх електромагнітних полів і може бути використаний для вимірювання осьових квадрупольних моментів різних технічних об'єктів в промислових умовах за наявності нестационарної зовнішньої електромагнітної завади.

1. ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. — Введ. 01.07.93. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 5 с.
2. Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. — 592 с.

Харків. техн. ун-т радіоелектроніки

Надійшла до редакції  
01.02.2001

21–26 мая  
2001 г.

## «ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДОВ»

г. Москва

### 3-я Международная конференция

#### ТЕМАТИКА

Диагностика линейной части магистральных газо- и нефтепроводов  
Диагностика промышленных трубопроводов  
Диагностика промышленного оборудования  
Диагностика запорной арматуры  
Диагностика оборудования компрессорных, насосных и распределительных станций  
Прочность и оценка остаточного ресурса трубопроводов и оборудования  
Проблемы продления ресурса оборудования и объектов  
Проблемы защиты от коррозии  
Организация мониторинга

Новые разработки в области диагностических средств  
Новые технологии в эксплуатации компрессорных станций  
Внедрение методов и средств технической диагностики, опыт эксплуатации  
Проблемы экологического мониторинга  
Обучение и сертификация персонала  
Сертификация средств контроля  
Стандартизация в области НК и ТД

*В рамках конференции состоится выставка приборов и оборудования, услуг и материалов для диагностики трубопроводов*

#### ОРГАНИЗАТОРЫ ВЫСТАВКИ

*Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике  
Правительство Москвы  
Министерство топлива и энергетики РФ  
Министерство науки и технологии РФ  
Российская академия наук*

*ОАО «Газпром»  
ОАО «Лукойл»  
ОАО «Сибнефтепровод»  
Государственная академия нефти и газа  
ПО «Спецнефтегаз»  
ЗАО «МНПО Спектр»*



По вопросам участия просьба обращаться в оргкомитет по адресу:  
Россия 119048, Москва, ул. Усачева, 35, оргкомитет конференции  
Тел.: (095) 245 57 68 (Филинов В. Н.), (095) 245 51 83 (Войнева Л. Б.), (095) 245 31 94 (Гребенкина Т. Ф.),  
(095) 245 57 17 — выставка (Туробов Б. В.). Факс (095) 224 68 88; E-mail: spectr@co.ru