

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Дегтярьов О. В., Альраващдех Р. С.

1. Вступ

В даний час сфера застосування магнітних вимірювань постійно розширюється. Дані вимірювання є затребуваними в багатьох галузях науки, техніки та промисловості, таких як електроенергетика, проектування, розробка та експлуатація електричних машин та апаратів, космічні дослідження, навігація, військова справа, електромагнітна сумісність та ін. Вирішення великого кола науково-практичних задач безпосередньо пов'язано з використанням вимірюваних значень таких магнітних величин, як напруженість магнітного поля, магнітний потік та дипольний магнітний момент. Вимірювання вказаних величин здійснюється за допомогою відповідних методів та засобів вимірювання.

Технічні об'єкти, що мають у своєму складі електро-радіообладнання, розглядаються як джерела зовнішніх магнітних полів (ЗМП). Такі технічні об'єкти формують електромагнітний стан в області навколишнього простору та здійснюють негативний вплив на функціонування інших об'єктів, чутливих до впливу ЗМП. Терміном ЗМП позначають магнітне поле, що виникає в області зовнішнього простору відносно поверхні технічного засобу, котре є джерелом ЗМП [1]. У зв'язку з цим актуальною стає задача вимірювання параметрів ЗМП, що створюється технічними засобами. Виникаючі при цьому проблеми електромагнітної сумісності, магнітної екології, навігації і магнітного захисту обладнання виходять за рамки можливостей окремих країн [2]. Для вирішення цих проблем Міжнародна асоціація захисту від випромінювання виробила рекомендації щодо застосування в європейських країнах допустимих і гранично допустимих рівнів напруженості ЗМП в виробничих і невиробничих умовах, на основі яких розробляються національні стандарти.

Однією із складових вирішення цих проблем є створення ефективних методів та засобів вимірювання регламентованих магнітних параметрів джерел ЗМП. Відповідно до нормативних документів такими регламентованими параметрами для джерел ЗМП є їх дипольні магнітні моменти, які на відміну від напруженості магнітного поля не залежать від координат точок спостереження. Дипольний магнітний момент ($M, A \cdot m^2$) є сукупною характеристикою ЗМП технічного об'єкту, через котрий можливо визначити напруженість поля в будь-якій точці простору, структуру та просторову конфігурацію ЗМП поля технічного засобу [3–6].

Тому виникає необхідність розв'язку взаємопов'язаних задач зі створення високоточних методів та систем вимірювання дипольних магнітних моментів. Це включає в себе відповідне аналітичне моделювання ЗМП, розробку методів та засобів його вимірювання, компенсацію мультипольних завад та зовнішніх електромагнітних завад [7, 8].

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – методи та засоби вимірювання параметрів ЗМП технічних об'єктів. Основною характеристикою методу та засобу вимірювання є точність вимірювання або похибка вимірювання, яка оберненопропорційна точності.

Точність вимірювання параметрів ЗМП об'єкта визначається характером джерела поля, вибором точок спостереження, ступенем відповідності запропонованої математичної моделі магнітного поля реальному ЗМП. Крім того, завдання контролю параметрів ЗМП ускладнюється наявністю нестационарних завад зовнішніх джерел.

Одним з найважливіших етапів процедури вимірювання є етап побудови або вибору моделі об'єкту вимірювання. Даний етап є надважливим при плануванні вимірювань, тому що помилки, які допущені на цьому етапі, виправити в подальшому неможливо. В ході вимірювань модель об'єкту можливо лише уточнити. Невідповідність вибраної моделі реальному об'єкту є джерелом похибки, яка за класифікацією відноситься до методичної складової загальної похибки вимірювань. Дана похибка присутня завжди, тому що неможливо побудувати або вибрати модель повністю адекватну об'єкту вимірювань. Чим точніше модель відображає об'єкт, тим менше методична складова похибки. Тому проблема вибору моделі джерела ЗМП потребує більш детального розгляду.

Одним із найбільш проблемних місць існуючих методів вимірювання магнітних моментів джерел ЗМП є наявність значної методичної похибки. Для магнітометричних методів її величина становить 10 %, для інтегральних 20–30 % [8, 9]. Це обумовлено недосконалістю теоретичних основ методу.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка та удосконалення метрологічного забезпечення магнітних вимірювань шляхом створення ефективних методів та засобів вимірювання параметрів ЗМП технічних об'єктів, котрі забезпечують підвищення точності вимірювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

1. Запропонувати математичну модель, що описує ЗМП створене технічним об'єктом.
2. Розробити метод вимірювання магнітних моментів ЗМП технічних об'єктів.
3. Виконати оцінку ефективності розробленого методу.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Існуючі методи вимірювання дипольного магнітного моменту можна розділити на:

- магнітометричні – так звані точкові, засновані на вимірюванні величини напруженості магнітного поля в одній або декількох точках простору;

- інтегральні, засновані на вимірюванні величини магнітного потоку [9–12].

В роботах [8, 9] наведені недоліки інтегрального методу. Це складність конструкції і великі розміри первинного вимірювального перетворювача при вимірюванні магнітного моменту великогабаритних об'єктів, а також значні похибки вимірювання (до 20–30 %). В роботах [13, 14] розглядаються точкові методи вимірювання. Їх відрізняє простота та невелика вартість первинних вимірювальних перетворювачів. Однак такі методи також мають невисоку точність (наприклад, методична похибка стандартизованого чотириточкового методу

складає 10 %), пов'язану з недостатньою селективністю дипольного магнітного моменту системою датчиків з повного спектру поля. Це обумовлено недосконалістю теоретичних основ методу.

Застосування точкових методів, які використовують в якості первинних вимірювальних перетворювачів індукційні датчики істотно спрощує реалізацію вимірювальних систем, що реалізують точкові методи. Це надає їм властивість мобільності, що дозволяє використовувати точкові магнітометричні пристрої через їх малий робочий об'єм для контролю ЗМП джерел в промислових умовах і на стаціонарних магнітометричних стендах [10].

В роботах [5, 6] досліджується характер розподілу магнітного поля. Встановлено необхідність поліпшення метрологічних характеристик, застосовуваних засобів вимірювання. В роботі [7] показано, що при розробці систем вимірювання магнітних параметрів важливе значення має підвищення точності вимірювання та компенсація завад зовнішніх джерел. В роботі [15] показано важливість вибору адекватної математичної моделі при теоретичному обґрунтуванні методів вимірювання параметрів магнітного поля. В роботах [11, 12] пропонуються альтернативні методи вимірювання магнітного моменту, але показано певні обмеження застосування цих методів для джерел магнітного поля різних розмірів.

Таким, чином необхідність підвищення точності вимірювання дипольних магнітних моментів вимагає:

- розробки ефективних точкових магнітометричних методів і нових більш завадозахищених вимірювальних пристроїв;
- методів оцінки методичної похибки і ступеня завадозахищеності вимірювальних пристроїв від магнітного поля зовнішніх джерел.

5. Методи досліджень

Для досягнення поставленої в дослідженні мети застосовувались методи аналітичного подання ЗМП та його моделювання, магнітометричні методи вимірювання напруженості магнітного поля, методи обробки результатів вимірювань. Теоретичні дослідження, які пов'язані із застосуванням математичних моделей, базуються на використанні методу мультипольного аналізу ЗМП, класичного методу уявлення ЗМП, методів розв'язку систем алгебраїчних рівнянь та методів матричної алгебри.

6. Результати дослідження

6.1. Результати розробки методу вимірювання параметрів зовнішнього магнітного поля технічних засобів

Будь-яке джерело ЗМП у кожний момент часу можливо уявити у вигляді сукупності скінченої кількості елементарних магнітних диполів, кожний з яких знаходиться у центрі малого елемента об'єму. Згідно принципу суперпозиції сума елементів елементарних диполів дорівнює еквівалентному дипольному моменту, який зміщений відносно початку прийнятої системи координат, яка зв'язана з джерелом ЗМП [1, 3].

Для подання класичним методом математичної моделі зовнішнього магнітного поля джерела з метою здійснення оцінки рівня напруженості його магнітного поля

достатньо з'ясувати характер функції. Ця функція описує розподіл складових напруженості поля еквівалентного зміщеного то довільно зорієнтованого у просторі магнітного диполя. Магнітне поле джерела у оточуючому його просторі поза провідників зі струмом, тобто в області простору, де щільність струму дорівнює нулю та $\text{rot}\vec{H} = 0$, можливо охарактеризувати за допомогою скалярного магнітного потенціалу U . При цьому вектор напруженості магнітного поля \vec{H} визначається як вектор, що дорівнює за величиною та направлено протилежно потенціалу $\vec{H} = -\text{grad}U$. Магнітний потенціал U є розв'язком рівняння Лапласа $\nabla^2 U = 0$ з відповідними граничними умовами, котрі завдані на замкненій зовнішній поверхні, що охоплює джерело зовнішнього магнітного поля [15]. Складові напруженості магнітного поля визначаються шляхом диференціювання магнітного потенціалу U за поточними координатами x, y, z . Класичний метод описує напруженість магнітного поля джерела через параметри його ексцентричного еквівалентного магнітного диполя, компоненти результуючого дипольного магнітного моменту джерела поля та координати ексцентричності магнітного диполя. Для джерела магнітного поля типу «чорний ящик» ці параметри є невідомими величинами та з цієї причини визначити класичним методом повне значення напруженості магнітного поля такого джерела у заданих точках зовнішнього простору вельми проблематично. В цьому випадку ЗМП можливо описати з достатньою точністю дипольною моделлю через магнітні параметри компонент еквівалентного дипольного магнітного моменту джерела поля, які визначаються для джерела типу «чорний ящик» експериментальним шляхом. Таким чином, магнітне поле зміщеного та довільно орієнтованого в просторі магнітного диполя джерела ЗМП, знайдене класичним методом, можливо описати із заданою точністю дипольною моделлю. У цьому випадку необхідно визначити експериментальним шляхом компоненти дипольного моменту M_x, M_y, M_z джерела ЗМП типу «чорний ящик». Потім розрахувати значення напруженості магнітного поля цього джерела у заданих зонах зовнішнього простору.

Мультипольну модель подання ЗМП [15, 16] можна отримати при розкладенні магнітного потенціалу U в ступеневий ряд відносно радіусу точки спостереження. Магнітний потенціал джерела ЗМП можливо описати сферичним гармонічним рядом Гауса (1) у вигляді суми мультиполів просторових гармонік дипольної, квадрупольної, октупольної і т. д. складових:

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

де R, φ, θ – сферичні координати точки спостереження;

g_{nm}, h_{nm} – постійні коефіцієнти ряду, що визначають величини зональних, тесеральних та секторіальних гармонік мультипольних магнітних моментів джерела ЗМП, $[A \cdot m^{n+1}]$;

n – порядковий номер просторової гармоніки ЗМП ряду Гауса;

m – порядковий номер елементарного мультиполя n -ої гармоніки;

$P_n^m(\cos\theta)$ – приєднані функції Лежандра.

Компоненти напруженості магнітного поля гармонічного ряду Гауса в сферичній системі координат знаходяться диференціюванням потенціалу з виразу (1) за координатами R, φ, θ :

$$H_R = -\frac{\partial U}{\partial R} = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) \cdot P_n^m(\cos\theta); \quad (2)$$

$$H_\varphi = -\frac{1}{R \sin\theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n m (g_{nm} \sin m\varphi - h_{nm} \cos m\varphi) \frac{P_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta}; \quad (3)$$

$$H_\theta = -\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \theta} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) \frac{\partial P_n^m(\cos\theta)}{\partial \theta}. \quad (4)$$

Постійні коефіцієнти g_{nm} та h_{nm} у виразах (2)–(4) мають певний фізичний сенс, оскільки вони дорівнюють магнітним моментам елементарних мультиполів m -го порядку просторової n -ої гармоніки. Коефіцієнти g_{10}, g_{11}, h_{11} дорівнюють компонентам дипольного магнітного моменту зональної ($n=1, m=0$) та секторіальної ($n=1, m=1$) гармонік дипольного поля $g_{11} = M_x, h_{11} = M_y, g_{10} = M_z$.

Мультипольна модель ЗМП є основою для створення методів та вимірювальних систем з так званим точковим розташуванням первинних вимірювальних перетворювачів. Ці методи призначені для опосередкованого вимірювання величин компонент дипольних магнітних моментів M_x, M_y, M_z .

Розробка методу та реалізуючої його вимірювальної системи засновано на реалізації точкового магнітометричного методу вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП за трьома ортогональними напрямками поблизу їх поверхні. Сутність запропонованого методу полягає в наступному: пропонується система з восьми двохкомпонентних індукційних давачів, розділених на дві групи по чотири давачі в кожній групі. Давачі розташовані навколо досліджуємого джерела ЗМП в екваторіальній площині XYZ ($\theta = 90^\circ$) на колах заданих радіусів R_1 та R_2 в точках зі значенням кутових координат $\varphi_i = (2i-1)45^\circ, \varphi_k = (2k-9)45^\circ$, де $i = 1 \dots 4, k = 5 \dots 8$ – номери давачів першої та другої групи давачів вимірювальної системи. Схема розміщення двохкомпонентних давачів 1–8 вимірювальної системи навколо джерела ЗМП, параметри якого вимірюються, зображено на рис. 1.

На рис. 1 показано:

M_x, M_y, M_z – вимірювані дипольні магнітні моменти джерела магнітного поля за трьома ортогональними напрямками X, Y, Z відповідно;

1...8 – двохкомпонентні давачі, поздовжні магнітні вісі котушок яких позначені стрілками, початок та кінець цих стрілок визначається по правилу правого гвинту пов'язаного з напрямком обмотки витків котушок давачів;

R_1, R_2 – радіуси кіл, на яких розміщені давачі 1–4 та 5–8 відповідно;

φ – кутова координата.

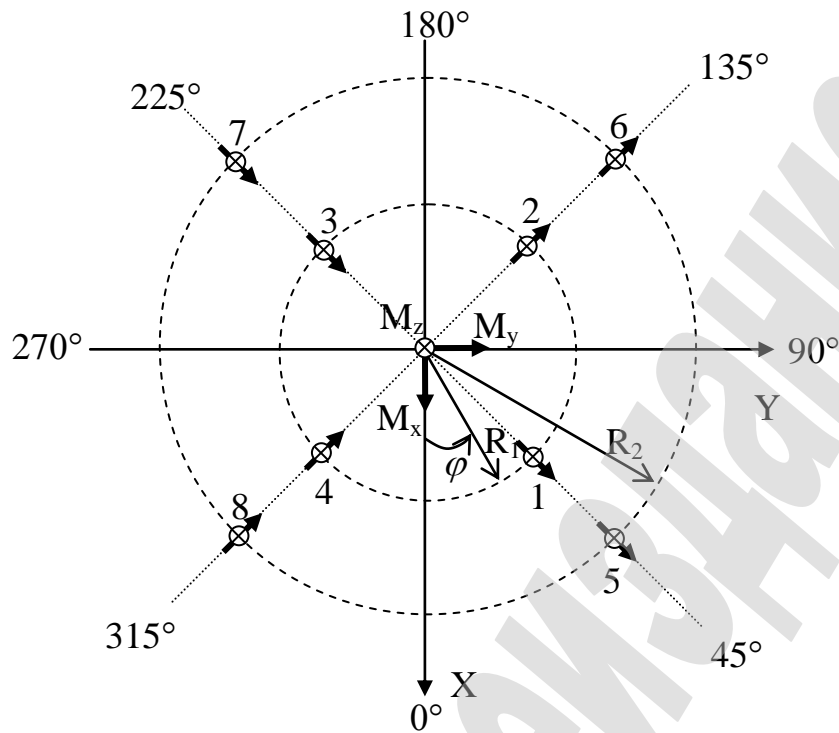


Рис. 1. Схема розташування датчиків вимірювальної системи навколо джерела зовнішнього магнітного поля

Напруженість магнітного поля H_R впливає на магнітні вісі котушок датчиків 1...4 та 5...8, що розташовані на колах радіусів R_1 та R_2 , та наводить в них електричні сигнали. Діюче значення електричних сигналів для вимірювальних каналів X, Y, Z описується виразами (5), (6).

$$E_{x(y)}(R_1) = \frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_1^{n+2}} (n+1) M_{x(y)n},$$

$$E_{x(y)}(R_2) = \frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_2^{n+2}} (n+1) M_{x(y)n}, \quad (5)$$

$$E_z(R_1) = -\frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_1^{n+2}} M_{zn},$$

$$E_z(R_2) = -\frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_2^{n+2}} M_{zn}, \quad (6)$$

де k_f – постійна котушок датчиків; M_{in} – результуючий магнітний момент елементарних мультиполів просторової n -ої гармоніки радіальної напруженості магнітного поля джерела за координатним напрямком X, Y, Z.

Розташування датчиків 1–8 навколо досліджуваного джерела ЗМП та узгоджена комутація їх котушок за корисним сигналом забезпечує відмежування

зональної та секторіальних гармонік дипольної складової магнітного поля, пропорційних вимірюваним компонентам дипольного моменту M_x, M_y, M_z джерела поля, від гармонік ЗМП парного порядку. Тому структура результуючого сигналу, наведеного радіальною, дотичною та осовою компонентами напруженості магнітного поля джерела у вимірювальних ланцюгах котушок системи датчиків, складається з корисного сигналу гармоніки $n = 1$ та мультипольних завад непарних гармонік (5), (6).

Структура результуючих електричних сигналів $E(R_1)$ та $E(R_2)$ каналів X, Y, Z складається з корисного сигналу першої гармоніки $n = 1$ та сигналів непарних гармонік $n = 3, 5, 7 \dots$, що вносять методичну похибку в результати вимірювання дипольного магнітного моменту. Тому для підвищення точності вимірювання дипольних магнітних моментів M_x, M_y, M_z необхідно перш за все виключити зі структури сигналів $E(R_1)$ та $E(R_2)$ найбільш вагому мультипольну заваду гармоніки $n = 3$. Аналітично це здійснюється шляхом вирішення системи рівнянь (5), (6). В результаті отримаємо алгоритм визначення результуючих сигналів E вимірювальних каналів X, Y, Z :

$$E = k_{1E}E(R_2) - k_{2E}E(R_2), \quad (7)$$

де k_{1E}, k_{2E} – коефіцієнти, значення яких при заданому співвідношенні радіусів R_2 / R_1 , на котрих розташовано групи давачів 1...4 та 5...8 по схемі на рис. 1 обчислюються за формулами:

$$k_{1E} = \frac{2}{(R_2^2 / R_1^2) - 1}, \quad k_{2E} = \frac{2(R_2^5 / R_1^5)}{(R_2^2 / R_1^2) - 1}. \quad (8)$$

Для відображення структури результуючого сигналу E каналів X, Y, Z гармонічним рядом підставимо значення сигналів $E(R_1)$ та $E(R_2)$, що описано виразами (5), (6), з урахуванням значення M_{in} у вираз (7) та отримаємо вирази виду:

$$E_x = \frac{8\sqrt{2}g_{11}}{k_f R^3} + \frac{4}{k_f} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n (R_2 / R_1)^{3-n} - 1}{R^{n+2} (R_2^2 / R_1^2) - 1} (n+1) \times \\ \times \sum_{m=1}^n g_{nm} \sin m 45^\circ \sin^3 m 90^\circ P_n^m (\theta = 90^\circ), \quad (9)$$

$$E_y = \frac{8\sqrt{2}}{k_f R^3} h_{11} + \frac{4}{k_f} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n (R_2 / R_1)^{3-n} - 1}{R^{n+2} (R_2^2 / R_1^2) - 1} (n+1) \times \\ \times \sum_{m=1}^n h_{nm} \cos m 45^\circ \sin^3 m 90^\circ P_n^m (\theta = 90^\circ), \quad (10)$$

$$E_z = \frac{8}{k_f R^3} g_{10} - \frac{4}{k_f} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n (R_2 / R_1)^{3-n} - 1}{R^{n+2} (R_2^2 / R_1^2) - 1} \times$$

$$\times \sum_{m=1}^n g_{nm} \cos m 45^\circ \sin^3 m 90^\circ \frac{\partial P_n^m(\theta = 90^\circ)}{\partial \theta}, \quad (11)$$

де $R = R_1$ – відстань, що приймається за базову при вимірюваннях дипольних магнітних моментів джерел ЗМП.

Аналіз виразів (9)–(11) показує, що структура сигналів E_x, E_y, E_z складається з корисних сигналів гармоніки $n=1$, що пропорційна коефіцієнтам $g_{11} = M_x, h_{11} = M_y, g_{10} = M_z$ та мультипольних завад непарних гармонік $n=5, 7, 9, \dots$, порядок елементарних мультипольних завад яких $m=0, 4, 8, 12, \dots$ менше n . В цьому випадку результуючі сигнали E_x, E_y, E_z (9)–(11) можна описати корисним сигналом E_{x1}, E_{y1}, E_{z1} дипольної складової магнітного поля з точністю до мультипольної завади гармоніки $n=5$, котра вносить основний внесок в методичну похибку вимірювання компонент дипольного магнітного моменту M_x, M_y, M_z джерел ЗМП. В підсумку отримаємо вирази:

$$E_x \approx E_{x1} = \frac{8\sqrt{2}g_{11}}{k_f R^3}, \quad E_y \approx E_{y1} = \frac{8\sqrt{2}h_{11}}{k_f R^3}, \quad E_z \approx E_{z1} = \frac{8g_{10}}{k_f R^3},$$

з яких виходить, що вимірювані дипольні магнітні моменти джерела магнітного поля визначаються виразами:

$$M_x = g_{11} = \frac{E_x k_f R^3}{8\sqrt{2}}, \quad M_y = h_{11} = \frac{E_y k_f R^3}{8\sqrt{2}}, \quad M_z = g_{10} = \frac{E_z k_f R^3}{8}.$$

Чутливість каналів X, Y, Z вимірювальної системи до корисного сигналу дипольної складової ЗМП джерела визначається виразами

$$S_x = \frac{8\sqrt{2}}{k_f}, \quad S_y = \frac{8\sqrt{2}}{k_f}, \quad S_z = \frac{8}{k_f}.$$

За результатами вимірювання компонент магнітного моменту M_x, M_y, M_z магнітного поля досліджуваного джерела типу «чорний ящик» можливо обчислити рівень напруженості магнітного поля джерела в будь-яких зонах навколишнього простору. Також можливо визначити просторову конфігурацію зовнішнього магнітного поля джерела скориставшись виразами (2)–(4) та зробив комп'ютерне моделювання [17].

Практична реалізація методу вимірювання дипольних магнітних моментів M_x, M_y, M_z джерел ЗМП здійснюється трьохканальною вимірювальною системою, структурна схема якої зображена на рис. 2.

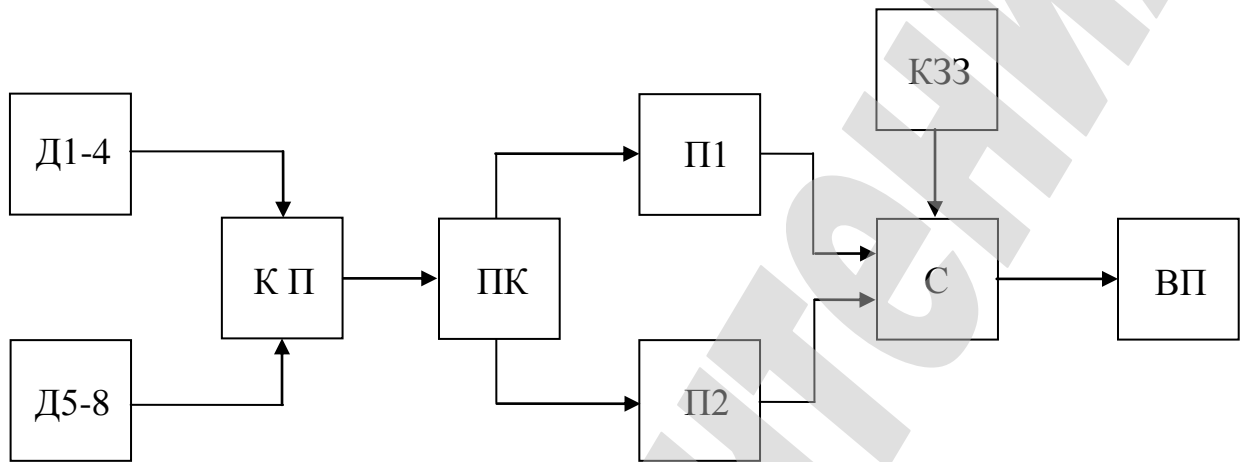


Рис. 2. Структурна схема трьохканальної вимірювальної системи вимірювання дипольних магнітних моментів: Д1-4 – давачі першої групи; Д5-8 – давачі другої групи; КП – комутуючий пристрій; ПК – перемикач каналів; П1, П2 – підсилювачі; С – суматор; КЗЗ – компенсатор зовнішньої завади; ВП – вимірювальний прилад

Електричні сигнали, наведені магнітним полем досліджуємого джерела, в колах радіальних та осьових котушок давачів надходять у комутуючий пристрій КП. КП формує результуючі електричні сигнали $E_x(R_1), E_x(R_2)$ у вимірювальному каналі X, $E_y(R_1), E_y(R_2)$ – у вимірювальному каналі Y, $E_z(R_1), E_z(R_2)$ – у вимірювальному каналі Z шляхом відповідної комутації радіальних та осьових котушок. Сформовані результуючі електричні сигнали вимірювальних каналів X, Y, Z надходять на трьохпозиційний перемикач каналів ПК, який встановлює заданий режим роботи трьохканальної вимірювальної системи на почергове вимірювання дипольних магнітних моментів M_x, M_y, M_z джерел ЗМП. Після встановлення заданого режиму вимірювання результуючі сигнали $E(R_1)$ та $E(R_2)$ вимірювального кола відповідного каналу вимірювальної системи поступають на підсилювачі П1 та П2 для підсилення їх згідно (7) у k_{1E} та k_{2E} разів відповідно (8). Потім підсилені сигнали $E(R_1)_E = k_{1E}E(R_1)$ та $E(R_2)_E = k_{2E}E(R_2)$ надходять спільно з компенсуючим сигналом U_k компенсатора зовнішньої завади та сигналом зовнішньої завади E_{II} , на вхід суматора С та вимірювальний прилад ВП для відображення результату вимірювань.

6.2. Оцінка ефективності розробленого методу вимірювання

Визначення значення методичної похибки розробленого методу та отримання її математичних виразів засноване на використанні мультипольної теорії подання ЗМП джерела та класичного методу подання магнітного поля джерела, що заснова-

не на теорії магнітного диполя. Це дає змогу отримати на основі порівняльного аналізу достовірні та зручні математичні вирази для методичної похибки при оцінці ефективності та визначенні метрологічних характеристик вимірювальної системи.

Визначимо значення методичної похибки для перших трьох непарних гармонік $n = 5, 7, 9$ (12)–(17) та результуючу методичну похибку (18), (19):

$$\delta_{x,y5} = \frac{E_{x,y5}}{E_{x,y1}} = \frac{255R_1^2}{32R_2^2} \left(\frac{k_{x,y}}{R/L_{x,y}} \right)^4, \quad (12)$$

$$\delta_{x,y7} = \frac{E_{x,y7}}{E_{x,y1}} = \frac{161R_1^4(1+R_2^2/R_1^2)}{32R_2^4} \left(\frac{k_{x,y}}{R/L_{x,y}} \right)^4, \quad (13)$$

$$\delta_{x,y9} = \frac{E_{x,y9}}{E_{x,y1}} = \frac{37215R_1^6(R_2^6/R_1^6-1)}{2048R_2^6(R_2^2/R_1^2-1)} \left(\frac{k_{x,y}}{R/L_{x,y}} \right)^8, \quad (14)$$

$$\delta_{z5} = \frac{E_{z5}}{E_{z1}} = -\frac{75R_1^2}{8R_2^2} \left(\frac{k_z}{R/L_z} \right)^4, \quad (15)$$

$$\delta_{z7} = \frac{E_{z7}}{E_{z1}} = \frac{245R_1^4(1+R_2^2/R_1^2)}{16R_2^4} \left(\frac{k_z}{R/L_z} \right)^6, \quad (16)$$

$$\delta_{z9} = \frac{E_{z9}}{E_{z1}} = -\frac{2835R_1^6(R_2^6/R_1^6-1)}{128R_2^6(R_2^2/R_1^2-1)} \left(\frac{k_z}{R/L_z} \right)^8, \quad (17)$$

де $E_{x,y,z1}$ – корисні сигнали каналів X, Y, Z вимірювальної системи, що створені дипольною складовою магнітного поля;

$$k_{x,y,z} = \frac{x_0(y_0, z_0)}{L_{x,y,z}} \leq \frac{1}{2} \text{ – коефіцієнт ексцентричності вимірюваного дипольного моменту } M_x, M_y, M_z;$$

M_x, M_y, M_z ;

$L_{x,y,z}$ – габаритний розмір джерела ЗМП за координатним напрямком X, Y, Z .

$$\delta_{x(y)p} = \frac{E_{x(y)p} - E_{x(y)1}}{E_{x(y)1}} = \frac{B_{x(y)} \cdot R_2^5 / R_1^5 - A_{x(y)}}{4\sqrt{2}(R_2^2 / R_1^2 - 1)} - 1, \quad (18)$$

$$\delta_{zp} = \frac{E_{zp} - E_{z1}}{E_{z1}} = \frac{B_z \cdot R_2^5 / R_1^5 - A_z}{R_2^2 / R_1^2 - 1} - 1, \quad (19)$$

де A_i, B_i – коефіцієнти, значення яких обчислюються при заданому $k_f, R_2 / R_1$ та $R / L_i = \text{var}, i = x, y, z$.

На основі виразів (12)–(17) та (18), (19) розраховано значення результуючої методичної похибки та її складових, при значенні $\frac{R_2}{R_1} = \sqrt[3]{2}$, та $k = \frac{1}{3}$. Так, при вимірюванні дипольних магнітних моментів M_x , M_y на відстані $R = (1,5 - 2)L_{x(y)}$ результуюча методична похибка $\delta_{x(y)p} = (0,381 - 1,154) \%$, а її основні складові – похибки п'ятої, сьомою та дев'ятої гармоніки відповідно дорівнюють:

$$\delta_{x(y)5} = (0,365 - 1,026) \%;$$

$$\delta_{x(y)7} = (0,011 - 0,062) \%;$$

$$\delta_{x(y)9} = (0,002 - 0,016) \%.$$

При вимірюванні осевого дипольного моменту M_z джерела магнітного поля на відстані $R = (1,5 - 2)L_z$ результуюча методична похибка становить $\delta_{zp} = (0,431 - 1,278) \%$, а її складові непарних гармонік $n = 5, 7, 9$ в цьому випадку будуть дорівнювати:

$$\delta_{z5} = (0,346 - 1,010) \%;$$

$$\delta_{z7} = (0,033 - 0,189) \%;$$

$$\delta_{z9} = (0,002 - 0,019) \%.$$

Аналіз показує, що точність вимірювання дипольних магнітних моментів M_x , M_y , M_z запропонованим методом перевищує в 8–21 раз стандартизований чотириточковий метод [10, 13, 14].

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відзначити отримані результати з досягнення високих метрологічних характеристик розробленого метода та вимірювальної системи. До цього слід віднести суттєве зниження методичної похибки вимірювання, збільшення чутливості вимірювальних каналів, можливість вимірювання декількох параметрів – магнітний момент, напруженість магнітного поля, просторова конфігурація. До переваг слід віднести можливість компенсації завад сторонніх джерел, невеликі габаритні розміри, низьку вартість застосовуваних індукційних давачів.

Також слід відмітити можливість широкого застосування розробленого методу вимірювання, а саме вирішення ряду практичних задач:

- з електромагнітної сумісності різного роду магніточутливого до зовнішнього магнітного поля обладнання;
- при розробці захисту від негативного впливу зовнішнього магнітного поля на навколишнє середовище;

– при створенні магнітометричних випробувальних стендів для контролю параметрів магнітного поля технічних засобів, до яких ставлять вимоги по зниженню рівня їх магнітного поля.

Weaknesses. Слабкі сторони даного дослідження пов'язані з певними складнощами при вимірюванні параметрів магнітного поля об'єктів великої подовженої форми. Також слід відмітити високі вимоги до точності встановлення датчиків згідно запропонованої схеми їх розташування, що може вплинути на точність вимірювань. Ця обставина накладає особливі вимоги до кваліфікації операторів.

Особливу увагу слід приділити вибору застосовуваних давачів. Оскільки застосовується вісім давачів, то пред'являються високі вимоги до ступеня однорідності їх метрологічних характеристик.

Opportunities. Перспективи подальших досліджень пов'язані з вдосконаленням метрологічних характеристик магнітометричних приладів, розробкою метрологічних засобів повірки, автоматизації вимірювань. Зокрема може бути досліджено вплив виключення з корисного сигналу просторових гармонік вищого порядку на величину методичної похибки. Це дозволить внести зміни по вдосконаленню вимірювальної системи.

Результати впровадження дослідження сприяють підвищенню якості результатів науково-дослідних робіт. Підвищують достовірність результатів контролю параметрів магнітного поля, що здійснюється у випробувальних лабораторіях та підприємствах.

Threats. Складнощі у впровадженні отриманих результатів дослідження пов'язані з наступними факторами. Необхідні додаткові витрати на проведення метрологічної атестації та наступні роботи з повірки. Для автоматизації вимірювань, скорочення об'єму розрахунків необхідні затрати на розробку відповідного програмного забезпечення.

8. Висновки

1. Запропоновано математичну модель, що описує зовнішнє магнітне поле, котре утворене технічними об'єктами. Застосування даної моделі забезпечує врахування геометричних властивостей джерела поля, дозволяє описувати параметри поля в зручній системі координат, забезпечує взаємозв'язок параметрів поля, дозволяє розрахувати поле в будь-якій точці простору.

2. Розроблено точковий магнітометричний метод вимірювання магнітних моментів дипольної складової напруженості зовнішнього магнітного поля джерела. Запропонована структурна схема вимірювальної системи, що реалізує розроблений метод. Характерними відмінностями даної схеми є наявність блоку, що забезпечує виключення гармоніки третього порядку з результуючого сигналу та наявність блоку, який виконує компенсацію завад сторонніх джерел.

3. Виконана оцінка ефективності розробленого методу. Визначено, що методична похибка вимірювання для компонент магнітного моменту M_x , M_y , M_z становить $\delta = 0,381 - 1,278$ %. Точність вимірювання на відстані двох габаритних розмірів підвищується на порядок у порівнянні з аналогом. Забезпечено підвищення чутливості вимірювальних каналів до корисного сигналу у 2 рази.

Література

1. Lupikov, V. S. Teoreticheskoe obosnovanie obiedinnoi dipol'noi modeli vneshnego magnitnogo polia elektrooborudovaniia [Text] / V. S. Lupikov // Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». – 2001. – Vol. 17. – P. 95–102.
2. Korepanov, V. Detection of VLF electromagnetic radiation of electronic equipment in every day use [Text] / V. Korepanov, F. Dudkin, R. Berkman // Proceedings of the 6th International Symposium «Metrology for Quality Control in Production», September 4–10, 1998. – Vienna, 1998. – P. 506–515.
3. Baida, E. I. K voprosu o vozmozhnosti raschiota elektromagnitnyh polei v elektricheskikh apparatah pri pomoshchi magnitnogo momenta [Text] / E. I. Baida // Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». – 2005. – Vol. 48. – P. 3–10.
4. Zvezhinskii, S. S. Perimetrovye maskiruemye magnetometricheskie sredstva obnaruzheniia [Text] / S. S. Zvezhinskii, A. I. Larin // Spetsial'naia tehnika. – 2001. – Vol. 4. – P. 15–34.
5. Matsubara, R. Distribution of magnetic field strength inside exciting coil of single sheet tester [Text] / R. Matsubara, Y. Takahashi, K. Fujiwara, Y. Ishihara, D. Azuma // AIP Advances. – 2018. – Vol. 8, No. 4. – P. 47209. doi:[10.1063/1.4993997](https://doi.org/10.1063/1.4993997)
6. Ma, B. Research of the axial strong magnetic field applied at the initial period of inertial stretching stage of the shaped charge jet [Text] / B. Ma, Z. Huang, Z. Guan, X. Zu, X. Jia, Q. Xiao // International Journal of Impact Engineering. – 2018. – Vol. 113. – P. 54–60. doi:[10.1016/j.ijimpeng.2017.11.002](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.002)
7. Charubin, T. Measurement System for Magnetic Field Sensors Testing with Earth's Magnetic Field Compensation [Text] / T. Charubin, M. Nowicki, R. Szewczyk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer International Publishing, 2017. – P. 613–618. doi:[10.1007/978-3-319-65960-2_76](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65960-2_76)
8. Holmes, J. J. Theoretical development of laboratory techniques for magnetic measurement of large objects [Text] / J. J. Holmes // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, No. 5. – P. 3790–3797. doi:[10.1109/20.952746](https://doi.org/10.1109/20.952746)
9. Slaev, V. A. Pervichnyi izmeritel'nyi preobrazovatel' dlia opredeleniia dipol'nogo magnitnogo momenta [Text] / V. A. Slaev, Yu. A. Urbanovich // Izmeritel'naia tehnika. – 1998. – Vol. 2. – P. 44–48.
10. Dobrodeev, P. Izmerenie parametrov dipol'no-kvadrupol'noi modeli istochnika magnitnogo polia tochechnymi datchikami [Text] / P. Dobrodeev // Proceedings of the II International Scientific Conference «Metrology in electronics – 97», October 13–16, 1997. – Kharkiv, 1997. – Vol. 1. – P. 182–184.
11. IEC 60404-14 Ed. 1.0 b:2002, Magnetic materials – Part 14: Methods of measurement of the magnetic dipole moment of a ferromagnetic material specimen by the withdrawal or rotation method [Text]. – Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), 2007. – 36 p.
12. Amrani, D. Determination of Magnetic Dipole Moment of Permanent Disc Magnet with Two Different Methods [Text] / D. Amrani // Physics Education. – 2015. – Vol. 31, No. 1. – P. 1–6.

13. Volohov, S. A. Metodicheskaia pogreshnost' izmerenii magnitnogo momenta [Text] / S. A. Volohov, L. F. Ivleva // Tehnicheskaiia elektrodinamika. – 1996. – Vol. 4. – P. 72–74.
14. Degtiarov, V. V. The main metrological characteristics of the means of space harmonical analysis [Text] / V. V. Degtiarov, O. V. Degtiarov // Ukrainian Metrological Journal. – 2003. – Vol. 1. – P. 38–41.
15. Buschow, K. H. J. Physics of Magnetism and Magnetic Materials [Text] / K. H. J. Buschow, F. R. de Boer. – Springer US, 2003. – 182 p. doi:[10.1007/b100503](https://doi.org/10.1007/b100503)
16. Getman, A. V. Spatial harmonic analysis of a magnetic field of a sensor plasma of spacecraft [Text] / A. V. Getman // Technical Electrodynamics. – 2013. – Vol. 6. – P. 20–23.
17. Kochnev, V. A. The technology of forward and inverse modeling for 3D and 2D magnetic data [Text] / V. A. Kochnev, I. V. Goz // ASEG Extended Abstracts 2003. International Geophysical Conference and Exhibition. – Moscow, 2003. – P. 64–67.