

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-вимірвальних технологій
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Вдосконалення метрологічного забезпечення вимірювань магнітних величин
(тема)

Виконав: студент II курсу, групи ЗЯМ-22-2

Бурнашев Р.С.
(прізвище, ініціали)

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Забезпечення якості»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Дегтярьов О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Захаров І.П.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Забезпечення якості»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» січня _____ 2024__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Бурнашеву Роману Султанбековичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення метрологічного забезпечення
вимірювань магнітних величин

затверджена наказом по університету від 03 листопада 2023 р. № 1294 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт вимірювань: напруженість магнітного поля, градієнт, магнітний момент, просторова конфігурація. Діапазон: 0-100 А/м, 0-50 Ам². Аналітичне уявлення зовнішнього магнітного поля технічних об'єктів – мультипольне подання та класичне уявлення зовнішнього магнітного поля. Метод вимірювання 4-12 – точкового аналізу. Система первинних перетворювачів: трикомпонентні індукційні перетворювачі. Апаратне забезпечення: персональний комп'ютер «Logic Power», 2.4 ГГц, ОЗУ 16 Гб, Програмне забезпечення: ОС Windows.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити:

4.1 Аналітичне уявлення зовнішнього магнітного поля. 4.2 Схема розміщення первинних перетворювачів. 4.3. Метод просторового гармонічного аналізу. 4.4. Структурна схема вимірювальної системи. 4.5. Схема електрична принципова.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5.1 Назва кваліфікаційної роботи. 5.2 Мета та задачі роботи. 5.3 Аналітичне уявлення зовнішнього магнітного поля. 5.4. Схема розміщення первинних перетворювачів. 5.5. Метод просторового гармонічного аналізу. 5.6. Структурна схема вимірювальної системи. 5.7. Схема електрична принципова. 5.8. Програмні інструменти підтримки розробки. 5.9. Метрологічне забезпечення.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	03.11.2023 – 12.11.2023	
2	Розробка програми випробувань	13.11.2023 – 20.11.2023	
3	Розробка методики випробувань	21.11.2023 – 30.11.23	
4	Розробка протоколу випробувань	01.12.2023 – 10.12.2023	
5	Написання пояснювальної записки	11.12.2023 – 23.12.2023	
6	Виконання графічної частини	24.12.2023 – 09.01.2024	
7	Представлення закінченої кваліфікаційної роботи на кафедрі	10.01.2024	

Дата видачі завдання 03 листопада 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Дегтярьов О.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи містить 18 сторінок, 9 рисунків, 9 таблиць, перелік посилань з 42 назв.

ЗОВНІШНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, МАГНІТНИЙ МОМЕНТ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ТОЧКОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ

Об'єкт дослідження – засіб вимірювальної техніки, що призначено для просторового гармонічного аналізу зовнішніх магнітних полів технічних об'єктів.

Мета роботи – удосконалення метрологічного забезпечення магнітних вимірювань шляхом створення засобу вимірювальної техніки для просторового гармонічного аналізу зовнішніх магнітних полів, що забезпечує контроль параметрів магнітного поля – магнітний момент та напруженість, котрі характеризують джерело поля у низькочастотній області.

Методи дослідження – використані методи аналітичного уявлення магнітного поля, магнітометричні методи вимірювання напруженості магнітного поля та методи статистичної обробки результатів вимірювань.

Для досягнення поставленої мети запропоновано розподілену у просторі систему індукційних перетворювачів, що реалізує точковий метод вимірювання. Запропоновано структурну схему вимірювальної системи. Розроблено електричну принципову схему, основу якої складає мікроконтролер. Отримані результати можуть бути використані при створенні малогабаритних магнітометричних випробувальних стендів для контролю параметрів магнітного поля.

ABSTRACT

The explanatory note to degree work contains 80 pages, 9 figures, 9 tables, reference list for 18 items.

EXTERNAL MAGNETIC FIELD, MEASURING SYSTEM, THE INTERFACE,
THE MAGNETIC MOMENT, THE MICROCONTROLLER, DOT METHOD
OF MEASUREMENT

Object of research – the means of measuring technics intended for the spatial harmonious analysis of external magnetic fields of technical objects.

The work purpose – perfection of metrological maintenance magnetic measurements by creation of means of measuring technics for the spatial harmonious analysis of external magnetic fields of the means, providing the control of such parametres of an external magnetic field, as a dipole magnetic moments of a source and intensity of a magnetic field which use for the characteristic of a source of a field in low-frequency area.

Research methods – are used methods of analytical representation of a magnetic field, магнитометрические methods of measurement of intensity of a magnetic field and methods of statistical processing of results of measurements.

For object in view achievement the system of induction converters realising a dot method of measurement distributed in space is offered. The block diagramme of measuring system is offered. The electric basic scheme which basis is made operating "kernel" by microcontroller is developed. The received results can be used at creation small-sized магнитометрических test beds for the control of parametres of a magnetic field.

ЗМІСТ

С.

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів	7
Вступ.....	8
1 Параметри зовнішнього магнітного поля та методи їх вимірювання.....	9
2 Аналіз методів і засобів вимірювання дипольних магнітних моментів джерел зовнішнього магнітного поля.....	19
3 Розробка методу та системи вимірювання параметрів зовнішнього магнітного поля об'єктів.....	26
3.1 Метод та вимірювальна система для вимірювання дипольних магнітних моментів.....	27
3.2 Вимірювання параметрів секторіальних гармонік дипольної складової магнітного поля.....	29
3.3 Вимірювання параметрів зональної гармоніки дипольної складової магнітного поля.....	40
3.4 Розробка структурної схеми трьох каналної вимірювальної системи вимірювання дипольних магнітних моментів.....	47
3.5 Методична похибка вимірювання дипольних магнітних моментів.....	52
4 Розробка елементів методики калібрування магнітометра.....	73
Висновки.....	77
Перелік посилань.....	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЗМП – зовнішнє магнітне поле

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки

ДММ – дипольний магнітний момент

ДСТУ – державний стандарт України

ЕМС - електромагнітна сумісність

ТО - технічні об'єкти

ВСТУП

Прогрес у галузях електроніки, радіотехніки та електротехніки, насиченість виробництва та побуту технологіями, що ґрунтуються на досягненнях цих галузей, призводять до загострення проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС). Останнім часом рівень насиченості електрообладнанням збільшився настільки, що без вирішення проблеми забезпечення ЕМС стала неможливою його безпечна експлуатація.

Проблема ЕМС виникає скрізь, де експлуатуються електронні, радіоелектронні та електротехнічні засоби надалі іменовані як технічні об'єкти (ТО) і охоплює майже всі сфери життєдіяльності суспільства. Проблема ЕМС обумовлює безліч актуальних практичних завдань, що потребують вирішення: задачі оцінки рівня електромагнітної обстановки в зонах промислових підприємств та інших установ різного профілю, задачі екологічної сертифікації та екологічного моніторингу загалом [1].

З виходом Директиви 89/336 «Про узгодження законодавчих актів країн-членів Євросоюзу щодо електромагнітної сумісності» в країнах Євросоюзу вводяться єдині стандарти на ЕМС і розробляється система сертифікації для обов'язкового підтвердження відповідності цим стандартам. В результаті в Європі заборонено продаж технічних засобів, які не мають цього сертифікату відповідності. У цьому зростає роль вітчизняних випробувальних центрів, лабораторій та інших метрологічних підрозділів, діяльність яких спрямовано проведення відповідних вимірів [2].

Тому, проведення робіт зі створення нових засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) у галузі магнітних вимірювань і зокрема вимірювальної системи (ІВ) для контролю параметрів зовнішнього магнітного поля (ЗМП) ТО об'єктів, що забезпечують оптимальне вирішення розглянутих завдань, є актуальним і практично затребуваним.

1 ПАРАМЕТРИ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

Під параметрами зовнішнього магнітного поля прийнято розуміти скалярні, векторні і тензорні величини, що характеризують магнітне поле і інваріантні щодо системи координат. До них відносяться вектор напруженості магнітного поля, магнітний потік, вектор магнітної індукції, вектор магнітного моменту, градієнт вектора магнітної індукції (тензор), градієнт модуля магнітної індукції (вектор) і ін. Зазвичай безпосередньо вимірюваними параметрами магнітного поля є скалярні величини: магнітний потік, модуль вектора магнітної індукції $|B|$ або його складові B_i , похідні цих величин, функціонально пов'язані з зазначеними векторами і тензорними величинами і дають можливість визначити топографію і ступінь неоднорідності магнітного поля, а також характер його зміни в часі [3].

Більшість методів вимірювань параметрів ЗМП базується на двох основних проявах ЗМП: силової (енергетичної) взаємодії ЗМП з макро- або мікроскопічними струмами і електромагнітній індукції.

Основні методи вимірювань параметрів постійного (—) і змінного (~) магнітних полів [80]:

1) магнітомеханічні:

(0-10 Гц $\sim 10^{-11}$ - 10^{-6} Тл і $\sim 10^{-9}$ - 10^{-6} Тл (—), $\delta = 0,01$ -5 %);

2) Магніторезонансні:

– ядерного магнітного резонансу (0-20 кГц, $\sim 10^{-11}$ - 10^{-2} Тл і 10^{-11} - 10^2 Тл (—), $\delta = 0,0001$ -0,02 %);

– електронного парамагнітного резонансу ($\sim 10^{-2}$ Тл (—), $\delta = 0,01$ -0,1 %);

– магніторезонансні з оптичним накачуванням (0-20 кГц, $\sim 10^{-11}$ - 10^{-4} Тл і 10^{13} - 10^4 Тл (—), $\delta = 0,5$ %);

3) Гальваномагнітні:

– на ефекті Холла (0-200 кГц, $\sim 10^{-6}$ - 10^2 Тл и 10^{-6} - 10^2 Тл (—), $\delta = 0,2$ -2,5 %);

– на ефекті Гаусса (0-20 кГц, $\sim 10^{-1}$ - 10^2 Тл и 10^{-1} - 10^2 Тл (_),
 $\delta = 0,5$ - $2,5$ %);

4) Індукційні:

– безпосередньо індукційні (20 Гц-30 МГц, $\sim 10^{-9}$ - 10^2 Тл
 и 10^{-5} - 10^2 Тл (_), $\delta = 0,5$ - $2,5$ %);

– надпровідникові на ефекті Джозефсона (0-1 кГц, $\sim 10^{-13}$ - 10^{-6} Тл и 10^{-13} - 10^{-6}
 Тл (_), $\delta = 0,1$ - 5 %);

– магнітооптичні на ефекті Фарадея (0,05-60 кГц, $\sim 10^{-3}$ - 10^2 Тл
 и 10^{-3} - 10^2 Тл (_), $\delta = 0,2$ - $2,5$ %).

Наведена класифікація має в своїй основі те чи інше фізичне явище або ефект, тобто принцип вимірювання. Вимірювання напруженості і магнітних моментів орієнтоване на використання індукційних перетворювачів в силу їх простоти виготовлення, лінійності характеристики і чутливості до зміни напрямку поля, тому розглянемо індукційні методи.

Принцип вимірювання, покладений в основу розробки методу вимірювання магнітних моментів джерел ЗМП та вимірювальної системи, що реалізує цей метод заснований на використанні розподіленої у просторі системи первинних вимірювальних перетворювачів індукційного типу. Технологічне виконання останніх принципового значення не має, так як алгоритм реалізації робочої формули рівняння вимірювання забезпечує той чи інший метод вимірювання і створена на його основі система з числа n_i первинних вимірювальних перетворювачів, що займають в просторі певну конфігурацію. Тому важливим є аналіз відомих методів вимірювання, що відносяться до методів просторового гармонічного аналізу.

Індукційні методи вимірювань параметрів магнітних полів.

Індукційний метод, заснований на явищі електромагнітної індукції, широко використовуються для вимірювання параметрів ЗМП, а також лежить в основі більшості засобів вимірювань магнітних властивостей матеріалів. Відповідно до закону електромагнітної індукції ЕРС, індукована в контурі, визначається формулою

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1)$$

де n – кількість витків контуру;

Φ – магнітний потік крізь поверхню, обмежену контуром.

Як видно з виразу (1.1), природною вхідною величиною засобів вимірювальної техніки, заснованих на індукційному методі, є швидкість зміни магнітного потоку, що пронизує індукційний вимірювальний перетворювач, який зазвичай виконується у вигляді багатовиткової котушки (вимірювальної котушки) або феромагнітного сердечника з однією або декількома обмотками. Основні види індукційних перетворювачів розглянуті в роботі [79]. Для визначення значення магнітного потоку вихідний сигнал перетворювача необхідно інтегрувати. Тому прилади, засновані на індукційному методі, зазвичай містять інтегратор струму або ЕРС, метрологічні характеристики якого мають вирішальний вплив на точність вимірювання потоку.

Індукційний метод можна використовувати для вимірювання параметрів змінних і постійних магнітних полів, оскільки магнітний потік, що пронизує контур індукційного перетворювача, може змінюватися як через зміну в часі параметрів перетворювача, так і внаслідок зміни в часі параметрів перетворювача. Такими параметрами є кут α між нормаллю до площини витків і вектора магнітної індукції, площа контуру S , відносна магнітна проникність сердечника μ коефіцієнт розмагнічування сердечника N .

Для однорідного магнітного поля вираз (1.1) можна переписати у вигляді:

$$e = -n \left(Y \frac{dB}{dt} + B \frac{dY}{dt} \right), \quad (1.2)$$

де $Y = S\mu \cos \alpha / [1 + N(\mu - 1)]$ – узагальнений параметр перетворювача.

Перевагами засобів вимірювань, заснованих на індукційному методі, є лінійність функції перетворення в широкому діапазоні вимірювань, висока стабільність характеристик, мала температурна похибка, застосовність для вимірювання параметрів як постійних, так і змінних МП в широкому діапазоні частот, малі габарити перетворювача. Крім того, індукційний метод є єдиним методом, який дає можливість безпосередньо вимірювати не тільки магнітний потік у вільному просторі, але також і потік, що проходить всередині суцільних об'єктів, що широко використовується для вимірювання магнітних параметрів різних пристроїв і матеріалів. Для вимірювання параметрів постійного МП застосовується індукційно-імпульсний метод прямого перетворення, заснований на вимірюванні імпульсу ЕРС або струму, що виникає при зміні потоку $\Delta\psi$, що зчеплений з обмоткою перетворювача, яка виконується у вигляді стаціонарної або поворотною вимірювальної котушки:

$$\Delta\psi = n\Delta\Phi = \int_{t_1}^{t_2} e dt. \quad (1.3)$$

В якості інтегруючого приладу застосовується веберметр. Для підвищення точності вимірювань, наприклад при атестації засобів магнітного потоку і магнітної індукції, при дослідженні стабільності і температурних характеристик магнітних систем з постійними магнітами, застосовуються диференційний і нульовий індукційно-імпульсний методи, засновані на порівнянні імпульсів струму або ЕРС, один з яких обумовлений вимірюваним магнітним потоком, а інший – відомим потоком, створюваним мірою.

При вимірюванні параметрів змінного МП використовуються нерухомі індукційні перетворювачі з постійними параметрами ($Y = \text{const}$). ЕРС, індукована в обмотці такого перетворювача, визначається виразом:

$$e = -nY \frac{dB}{dt}. \quad (1.4)$$

При $\alpha = 0$ та синусоїдальній формі кривої магнітної індукції
($B = B_m \sin \omega t$):

$$e = n\omega Y B_m \cos \omega t . \quad (1.5)$$

Якщо використовується перетворювач без феромагнітного сердечника,

$$e = n\omega S B_m \cos \omega t . \quad (1.6)$$

Оскільки індуквана ЕРС пропорційна частоті ω змінного МП, то для отримання вихідної напруги, яка пропорційна вимірюваному параметру МП, необхідно у вимірювальному ланцюгу мати функціональний перетворювач, коефіцієнт перетворення якого обернено пропорційний частоті. В якості такого перетворювача доцільно використовувати операційний інтегруючий підсилювач, що працює в режимі активної аперіодичної ланки. Якщо знехтувати ємністю і індуктивністю перетворювача, а також МП, створюваним струмом, що проходить по котушці, то напруга, що знімається з такого підсилювача в певному діапазоні частот, не буде залежати від частоти.

Для створення засобів вимірювальної техніки з широким частотним діапазоном перш за все необхідно мати широкосмугові перетворювачі, що володіють високою власною резонансною частотою, тобто малою індуктивністю і ємністю, що досягається раціональною конструкцією, зокрема застосуванням секціонованих обмоток, кожна з яких розташовується на своєму осерді. Іншими способами збільшення частотного діапазону є зменшення ємності сполучної лінії шляхом розташування вхідного підсилювача поблизу перетворювача, використання вхідних каскадів з еквівалентною негативною ємністю, застосування вимірювальних ланцюгів врівноважуючого перетворювача з частотно-залежним зворотнім зв'язком. Одним із способів розширення частотного діапазону є застосування багатосекцій-

ного перетворювача, секції якого підключаються до окремих функціональних перетворювачів, вихідні сигнали яких упорядковано відповідно до частотних діапазонів. Це дає можливість не тільки збільшити повний частотний діапазон приладу, але також підвищити його чутливість оскільки зі зменшенням смуги пропускання на окремих частотних піддіапазонах відбувається зниження рівня шуму.

З усього розмаїття вимірювань магнітних параметрів технічних та фізичних об'єктів важливе місце займають вимірювання величини магнітного моменту та його мультипольних складових. Дані вимірювання є актуальними та затребуваними в багатьох галузях науки, техніки та виробництва (електроенергетика, проектування, розробка та експлуатація електричних машин, космічні дослідження, навігація, військова справа, електромагнітна сумісність) (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Величини магнітних моментів для різних об'єктів [4].

№	Об'єкт	M, Ам ²
1	2	3
1.	Об'єкти атомної фізики: Електрон іон натрію атом хлору..... атом натрію.....	$9,3 \times 10^{-24}$ $3,4 \times 10^{-24}$ $2,3 \times 10^{-23}$ $1,7 \times 10^{-23}$
2.	Об'єкти контролю спец. систем охорони периметрів звичайна середньостатистична людина без поклажі та інструментів з поклажею і інструментами (рюкзак, викрутка, пасатижі) озброєний: - пістолет ПМ..... - автомат АК-47..... - гранатомет РПГ-7..... - кулемет РПК.....	0,045 0,1-0,2 0,1 0,6 1,4 2,7
3.	Ядерний вибух (підземний, одна кілотонн)	10^7

Закінчення таблиці 1.1

1	2	3
4.	Транспортні засоби: велосипед..... мотоцикл..... легковий автомобіль «Москвич»..... грузовий автомобіль (ГАЗ, ЗИЛ, МАЗ). гвинтокрил пасажирський літак морський та річковий транспорт	4 20 30 330 500 3000 500000
5.	Силове електрообладнання: P≤100 кВт..... P≤1000 кВт..... P≤20000 кВт.....	≤ 125 ≤ 1000 ≤ 14000
6.	Енергонасичені об'єкти з феромагнітним корпусом: V=300 м ³ V=4000 м ³ V=10000 м ³	20000 400000 1500000
7.	Планети: Марс..... Меркурій..... Земля..... Сатурн..... Юпітер..... Нейтронна зірка SGR 1806-20...	2,8×10 ¹⁸ 5×10 ¹⁹ 8,3×10 ²² 41,5×10 ²⁴ 16,6×10 ²⁶ 18×10 ³⁷

Магнітний момент, магнітний дипольний момент (M) – основна векторна величина, що виражає магнітне поле елементарного контуру зі струмом, дорівнює добутку площі, що охоплюється контуром і сили струму в ньому, спрямована перпендикулярно площині контуру, так, що при погляді в сторону вектора електричний струм рухається за годинниковою стрілкою. Відносно макроскопічних тіл магнітний момент приймається векторної сумою всіх елементарних струмів в них.

В міжнародній системі одиниць фізичних величин (SI) одиниця вимірювання магнітного моменту – $[M] = A \cdot m^2$. Порядок зберігання, відтворення та передачі розміру одиниці фізичної величини регламентується ГОСТ 8.231-84 (дата останніх змін 13.07.2017).

Розрахунки полів в електричних машинах та апаратах, що базуються на теорії електромагнітного поля, являють собою достатньо складну задачу, яка базу-

ється на рішенні нестационарних рівнянь електромагнітного поля у неоднорідному та нелінійному середовищі. Тому існує ряд методів, що дозволяють істотно спростити рішення задачі з розрахунку електромагнітних полів при деяких припущеннях. Одним з таких методів є розрахунок електромагнітного поля за допомогою магнітного моменту.

Змінний магнітний момент більшості видів електрообладнання створюється струмами ділянок контурів силового ланцюга та намагніченими об'ємами магнітних систем електричних машин, трансформаторів та феромагнітними масами шаф розподільчих пристроїв (силових щитів) та напівпровідникових перетворювачів.

У відповідності з нормативним документом [5] задачею контролю магнітних параметрів джерела ЗМП є вимірювання його дипольних магнітних моментів за трьома ортогональними напрямками, що дає змогу легко оцінити рівень ЗМП джерела в заданих точках зовнішнього простору. Значення компонентів дипольних магнітних моментів технічного засобу на основній частоті (M_1) і гармоніках, кратних їй (M_m), в діапазоні частот 5-10000 Гц в сталих робочих режимах технічного засобу, що виміряні методами, встановленими в [7], не повинні перевищувати величин, обчислених за формулами, наведеними в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Норми компонент дипольного магнітного моменту технічних засобів

Вид технічного засобу	Формули для обчислення компонент магнітного моменту, $A \cdot m^2$	
	Перша гармоніка основної частоти	m -я гармоніка основної частоти
Електричні машини змінного струму з числом полюсів: $2p=2$ $2P>2$	$M_1 = 1,0 \cdot P$ $M_1 = 0,36 \cdot P \sin \pi / p$	$M_m = M_1 m^{-3}$ $M_m = M_1 m^{-3}$
Електричні машини постійного струму	$M_1 = 0,024 P \sin \pi / p$	$M_m = M_1 m^{-1,6}$
Силові трансформатори	$M_1 = 0,14 Q$	$M_m = M_1 m^{-1,4}$
Статичні перетворювачі	$M_1 = 0,26 I_d$	$M_m = M_1 m^{-1,3}$
Комутаційна апаратура	$M_1 = 0,33 I$	$M_m = M_1 m^{-1,3}$
Примітки: Умовні позначення: P – номінальна потужність, кВт; Q – повна потужність, кВ·А, I_d – номінальний випрямлений струм, А; I – номінальний струм, А; p – число пар полюсів електричної машини; m – номер гармоніки.		

Значення компонент дипольних магнітних моментів технічних засобів $M_{m \text{ сум}}$ в $A \cdot m^2$, що містять в якості комплектуючих технічних засобів, наведені в табл.1.2, на основній частоті та гармоніках, кратних їй, в діапазоні частот 5-10000 Гц в сталих робочих режимах технічного засобу, що виміряні методами, встановленими в [7], не повинні перевищувати величин, розрахованих за формулою

$$M_{m \text{ доп}} = \left| \sum_{k=1}^N M_{mk}^2 \right|^{0,5}$$

де N – кількість приладів, що входять в технічний засіб;

m – номер гармоніки ($m = 1, 2, \dots$).

За результатами вимірювання компонент дипольного магнітного моменту можливо легко визначити аналітичним шляхом значення напруженості магнітного поля джерела у його робочому режимі на об'єкті у заданих зонах зовнішнього простору, які необхідні для вирішення ряду практичних задач з електромагнітної сумісності джерел ЗМП та різних магніточутливих пристроїв, розташованих у зоні впливу ЗМП.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ДИПОЛЬНИХ МАГНІТНИХ МОМЕНТІВ ДЖЕРЕЛ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

У відповідності з нормативним документом [9] задачею контролю магнітних параметрів джерела ЗМП є вимірювання його дипольних магнітних моментів за трьома ортогональними напрямками, що дає змогу легко оцінити рівень ЗМП джерела в заданих точках зовнішнього простору. Це дає можливість оцінити негативний вплив магнітного поля розсіювання, котре створено електрорадіообладнанням у робочих режимах, на магніточутливі пристрої, автоматизовані системи керування, інформаційно-вимірювальні системи, апаратуру навігації, позиціонування та ін. [11,13,16].

У сфері магнітних вимірювань для вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП широке застосування набули індукційні методи, в принципі вимірювання яких використовується явище електромагнітної індукції, коли параметр магнітного поля перетворюється в електричний сигнал. Перевагою індукційних методів є лінійна функція перетворення у широкому діапазоні вимірювань, висока стабільність характеристик індукційних перетворювачів та низька температурна похибка у широкому діапазоні частот [8,9,10].

Існуючі індукційні методи поділяються на інтегральні та точкові.

Застосування інтегральних методів пов'язано з використанням в якості первинних вимірювальних перетворювачів магнітного поля в електричний сигнал контурних вимірювальних обмоток, що охоплюють джерело ЗМП, параметри якого вимірюються [8]. Дані обставини є істотним недоліком, оскільки вимірювальні системи з контурними обмотками складні у виготовленні, громіздкі і вимагають значного робочого об'єму. Тому застосування їх обмежене у вигляді стаціонарних магнітометричних стендів, в той час як в більшості випадків виникає необхідність здійснювати контроль ЗМП джерел в умовах їх експлуатації і на заводах-

виробниках різного типу електрообладнання, до якого пред'являються вимоги по рівню ЗМП.

Застосування точкових методів, які використовують в якості індукційних датчиків перетворювачі у вигляді котушок з феромагнітними сердечниками або без них, істотно спрощує вимірювальні системи з точковими датчиками, надає їм властивість мобільності, що, в кінцевому рахунку, дозволяє використовувати точкові магнітометричні пристрої через їх малий робочий об'єм для контролю ЗМП джерел в промислових умовах, а також і на стаціонарних магнітометричних стендах.

Вимірювання компонент дипольного магнітного моменту джерела ЗМП одним давачем не дали достатньої точності через нестаціонарні промислові завади зовнішніх джерел в зоні випробувального стенду, рівень яких може істотно перевищувати магнітне поле, що досліджується [8]. Так, при вимірюванні на відстані трьох габаритних розмірів джерела ЗМП методична похибка складає 70 %. З цієї причини цей метод не знайшов застосування у практиці вимірювання дипольних моментів джерел ЗМП.

Двоточковий метод [14, 16] також не забезпечує достатньої точності вимірювання дипольних магнітних моментів. Цей метод реалізується вимірювальним пристроєм з двох датчиків, які розташовано поблизу джерела ЗМП симетрично відносно початку прийнятої системи координат. За корисним сигналом та мультипольними завадами непарних гармонік котушки двох датчиків вимірювального пристрою з'єднані електрично згідно, у той час як за мультипольними завадами парного порядку вони з'єднані зустрічно. У результаті цього вимірювальний пристрій з двох датчиків здійснює відмежування від завадонесучих просторових парних гармонік ЗМП джерела. Похибка двоточкового методу при вимірюванні дипольних магнітних моментів на відстані трьох габаритних розмірів джерела ЗМП складає 17,5 %. Похибка у результати вимірювання вноситься, головним чином, мультипольною завадою третьої гармоніки. Таким чином, двоточковий метод та реалізуючий його вимірювальний пристрій через значну мультипольну похибку має обмеження. Це призвело до необхідності вести дослідження в напрямку ство-

рення багатоточкових магнітометричних методів і відповідних вимірювальних систем, призначених для вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП із заданою та достатньою для практичних вимог точністю.

Першою розробкою в цьому напрямку став чотириточковий метод та відповідна система вимірювання. Цей метод реалізується системою з чотирьох трикомпонентних датчиків, розташованих навколо джерела в екваторіальній площині ($\theta = 90^\circ$) рівномірно на колі контрольного радіуса R , рівного не менше півтора габаритним розмірам джерела ЗМП щодо його геометричного центру (рис.2.1).

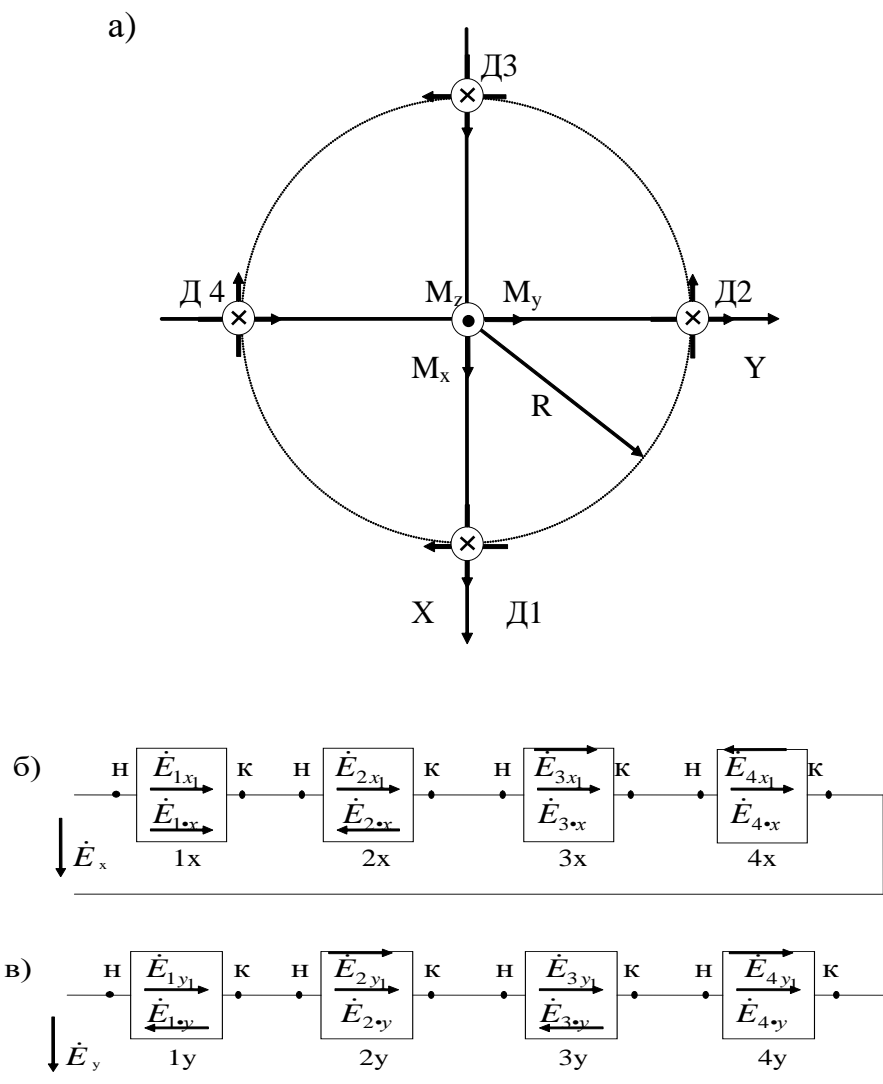


Рис.2.1 Схема розташування давачів вимірювального пристрою (а) та електричні схеми з'єднання котушок вимірювальних каналів X (б), Y (в) і Z (г). Сферичні координати точок, в яких встановлені датчики Д1-Д4, рівні

$$\begin{aligned} & \text{Д1} (R, \varphi = 0, \theta = 90^\circ), \text{ Д2} (R, \varphi = 90^\circ, \theta = 90^\circ), \\ & \text{Д3} (R, \varphi = 180^\circ, \theta = 90^\circ), \text{ Д4} (R, \varphi = 270^\circ, \theta = 90^\circ). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Датчики виконані у вигляді трьох ортогональних котушок з прямолінійними феромагнітними сердечниками або без них. Котушки трьох вимірювальних каналів пристрою електрично з'єднані згідно з вимірюваної дипольної складової ЗМП, в той час як по магнітному полю завад від зовнішніх джерел котушки каналів X і Y з'єднані зустрічно, а котушки каналу Z – згідно, (рис. 2.1, б,в,г.).

Радіальні та дотичні котушки датчиків орієнтовані магнітними вісями за двома ортогональними напрямками - у напрямку орієнтації компонент радіального дипольного магнітного моменту. Котушки вимірювальних каналів X та Y з'єднані електрично згідно за корисним сигналом секторіальної гармоніки дипольної складової ЗМП. У той же час радіальні та дотичні котушки з'єднані зустрічно за зовнішньою електромагнітною завадою. Завдяки цьому канали X та Y даної вимірювальної системи є завадозахищені. Осьові котушки вимірювального каналу Z орієнтовані паралельно полярної вісі прийнятої системи координат, тобто орієнтовані у напрямку осьового дипольного моменту джерела ЗМП. Осьові котушки з'єднані електрично згідно за корисним сигналом, який створюється зональною гармонікою дипольної складової ЗМП, та зовнішньою електромагнітною завадою, внаслідок чого канал Z вимірювальної системи є не завадозахищеним.

Даний метод та реалізуючий його вимірювальний пристрій за рахунок розміщення датчиків у заданих координатах та певної їх комутації забезпечує відмежування від мультипольних завад парного порядку та від мультипольної завади третьої гармоніки. За рахунок цього точність вимірювання підвищується в півтори рази в порівнянні з вимірювальною системою з двох датчиків. Наприклад, на відстані трьох габаритних розмірів джерела ЗМП значення похибки чотириточкового методу при вимірюванні компонент радіального дипольного магнітного моменту дорівнює 8 %, осьового дипольного моменту – 12 %, внаслідок чого чотириточковий метод має певні обмеження при вимірюванні дипольних магнітних моментів джерел ЗМП.

Таким чином, чотириточковий магнітометричний пристрій має не високу точність вимірювання і не задовольняє ряду практичних вимогам. Слід зазначити, що в датчиках цього вимірювального пристрою наводиться сигнал завади, обумовлений мультиполем вищого порядку, що обумовлює методичну похибку вимірювання. Так як для вимірюваного джерела ЗМП типу "чорний ящик" заздалегідь невідомий склад і рівень вищих мультиполів, значення методичної похибки залишається невизначеним, що є певною перешкодою при створенні засобів вимірювань [15].

Відомі також і інші багатоточкові методи та реалізуючи їх вимірювальні системи, датчики яких розташовані в певних точках циліндричної поверхні [9,11,14,16]. Найбільш ефективною з таких вимірювальних систем є система з шістнадцяти датчиків, розділених на дві групи (рис. 2.2) [4]. Перша група датчиків складається з чотирьох трикомпонентних та чотирьох двокомпонентних датчиків, x -ві та y -ві котушки котрих мають різну чутливість до напруженості магнітного поля. Ці датчики розташовані навколо джерела ЗМП у екваторіальній площині на двох колах різних радіусів. Друга група датчиків складається з восьми однокомпонентних датчиків, чутливість осьових котушок яких до напруженості осьової компоненти магнітного поля у два рази менше чутливості осьових котушок першої групи датчиків. Вимірювальна система з шістнадцяти датчиків включає вплив мультипольних завад включно до завади п'ятої гармоніки. У результаті точність вимірювання дипольних магнітних моментів на відстані трьох габаритних розмірів джерела ЗМП підвищується на порядок у порівнянні з вимірювальною системою з чотирьох датчиків. Недоліком цієї вимірювальної системи є громіздкість, складність її реалізації та низька чутливість до корисних сигналів.

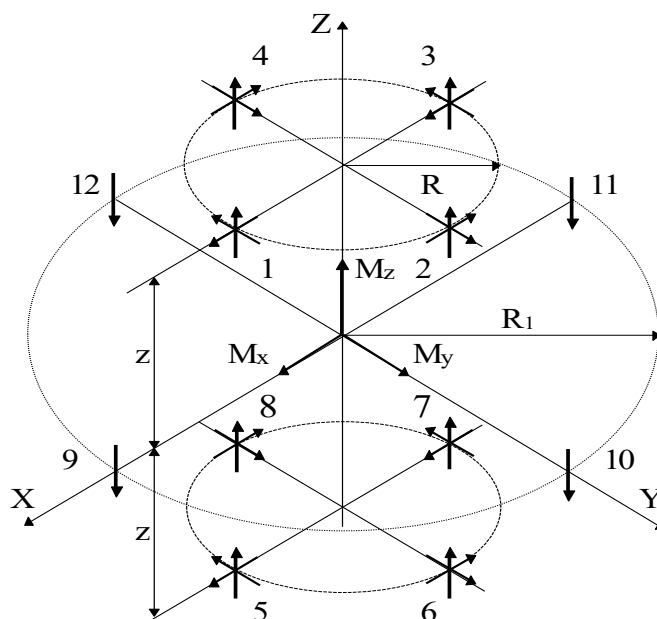


Рисунок 2.2 – Схема розташування датчиків на циліндричній поверхні і екваторіальній площині

У табл. 2.1 наведені дані порівняльного аналізу метрологічних та технічних характеристик (у загальному вигляді) методів вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП. Наведені дані свідчать про те, що існуючі методи вимірювання магнітного моменту мають ряд недоліків, тому задача розробки ефективних магнітометричних методів та систем вимірювання дипольних магнітних моментів, які повинні бути високоточні, мати високу селективність, мати високу чутливість до корисного сигналу, бути завадозахищеними, малогабаритними та мобільними є вельми актуальна.

Необхідність підвищення точності вимірювання вимагає розробки ефективних точкових магнітометричних методів і нових більш завадозахищених вимірювальних пристроїв, а також методів оцінки методичної похибки і ступеня завадозахищеності вимірювальних пристроїв від магнітного поля зовнішніх джерел. Найбільш перспективними є точкові магнітометричні методи та реалізуючи їх вимірювальні системи з індукційними датчиками.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз метрологічних характеристик методів вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП

Метрологічні та технічні характеристики	Методи вимірювання магнітного моменту			
	інтегральний	Дво-точковий (сферична система координат)	Чотири-точковий (сферична система координат)	Шістнадцяти-точковий (циліндрична система координат)
Методична похибка, %	≤ 20	17,5	10	1,5
Чутливість до корисного сигналу	$2s$	s	$2s$	$2s$
Відношення корисного сигналу до зовнішньої завади	$> m$	m	m	$10m$
Площа (об'єм) робочої зони магнітометричного стенду	V	4S	2S	V
Стаціонарність/мобільність	стац.	моб.	моб.	стац.
Кількість вимірюваних компонент	2	3	3	3

Таким чином, в цілому рішення поставлених в роботі задач, які є невід'ємною частиною проблеми забезпечення електромагнітної сумісності, направлено на створення ефективних точкових магнітометричних методів вимірювання дипольних магнітних моментів і реалізують їх засобів вимірювання, а також спеціальних способів вимірювання ЗМП електротехнічних об'єктів.

3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ОБ'ЄКТІВ

Зовнішнє магнітне поля електротехнічних об'єктів у зовнішньому просторі аналітично подається сферичним гармонічним рядом у вигляді просторових гармонік першого порядку, тобто дипольної складової магнітного поля, і суми просторових гармонік вищого порядку ($n \geq 2$), котрі є завадами відносно корисних сигналів, що утворюються в колах вимірювальної системи магнітним полем першої гармоніки.

Секторіальні гармоніки дипольної складової магнітного поля ($n = m = 1$), змінюються у зовнішньому просторі за законом тригонометричних функцій $\sin \varphi$ та $\cos \varphi$. Ці гармоніки пропорційні компонентам радіального дипольного магнітного моменту джерела поля. Зональна гармоніка дипольної складової магнітного поля ($n = 1, m = 0$), що не залежить від кутової координати φ , пропорційна відповідно осьовому дипольному магнітному моменту джерела поля.

Тому вимірювання компонент результуючого дипольного магнітного моменту джерела ЗМП за трьома ортогональними напрямками зводиться до вирішення задачі виділення дипольної складової магнітного поля з просторового спектру завадо несучих гармонік ЗМП та вимірювання напруженості магнітного поля зональної та секторіальної гармонік першого порядку.

З урахуванням цього в даному розділі розглянуто вирішення поставленої задачі та викладено теоретичного обґрунтування методу вимірювання зональної та секторіальної гармонік дипольної складової магнітного поля джерела.

3.1 Метод та вимірювальна система для вимірювання дипольних магнітних моментів

Розробка вимірювальної системи заснована на реалізації точкового магнітометричного методу вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП за трьома ортогональними напрямками поблизу їх поверхні. Запропонована вимірювальна системі виконана з восьми двохкомпонентних давачів, розділених на дві групи по чотири здавачі в кожній. Здавачі 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. 3.1, де прийняті наступні позначення: 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.

Запропонована вимірювальна система для вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП за трьома ортогональними напрямками виконана трьохканальною:

- канал X для вимірювання магнітного моменту M_x джерела поля радіальними котушками давачів 1...8, що з'єднані згідно за корисним сигналом секторіальної гармоніки дипольної складової напруженості магнітного поля, радіальна напруженість магнітного поля якої змінюється за законом $\cos\varphi$;

- канал Y для вимірювання магнітного моменту M_y джерела поля радіальними котушками давачів 1...8, що з'єднані згідно за корисним сигналом секторі-

льної гармоніки дипольної складової напруженості магнітного поля, що змінюється за законом $\sin \varphi$;

– канал Z для вимірювання осевого дипольного магнітного моменту M_z джерела поля осьовими котушками давачів 1...8, що з'єднані згідно за корисним сигналом зональної гармоніки дипольної складової поля, напруженість якої не залежить від кутової координати φ .

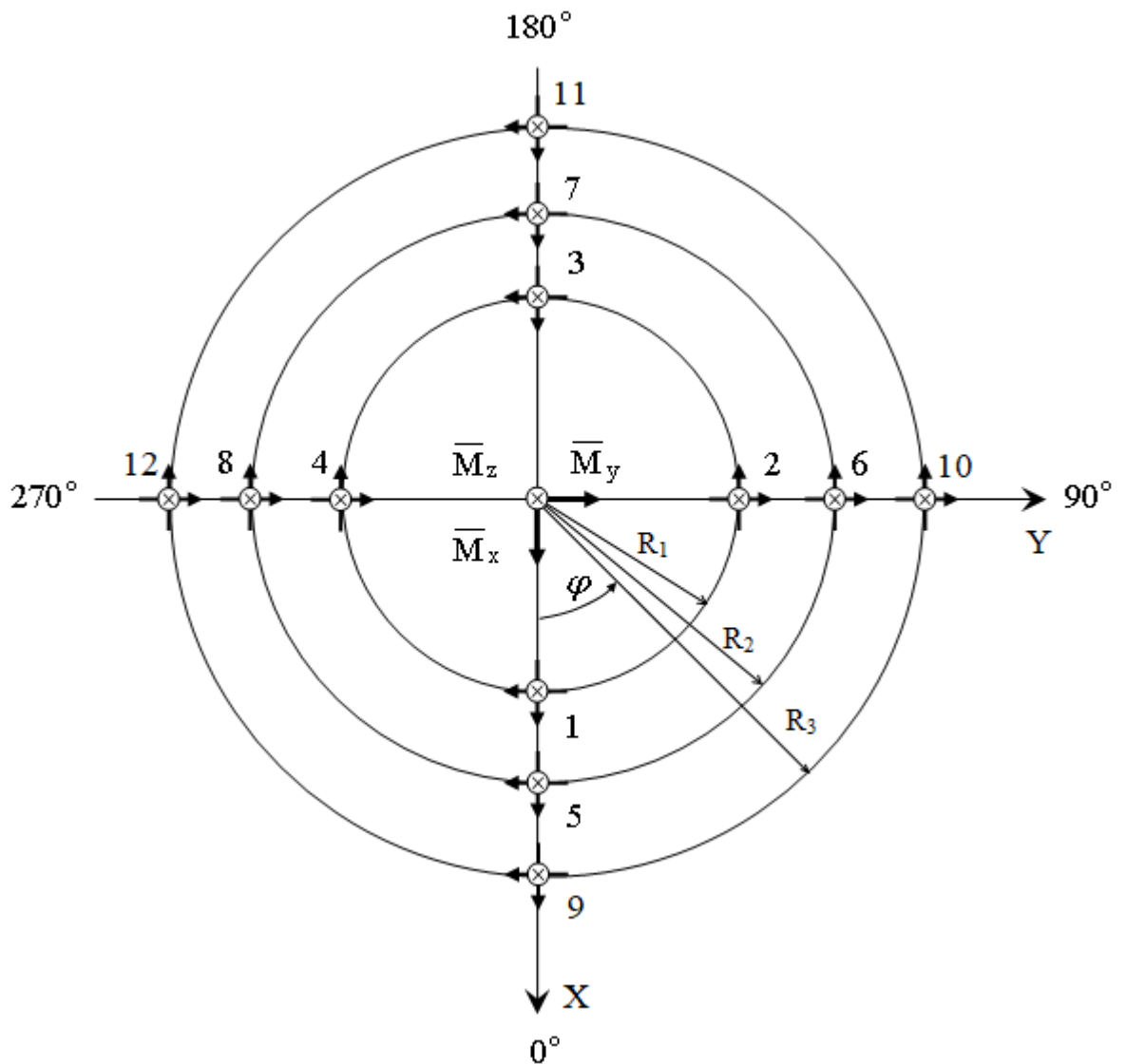


Рисунок 3.1 Схема розташування давачів вимірювальної системи навколо джерела ЗМП

3.2 Вимірювання параметрів секторіальних гармонік дипольної складової магнітного поля

Радіальна компонента напруженості ЗМП джерела в екваторіальній площині, де розташовані радіальні котушки давачів вимірювальної системи по схемі рис. 3.1 для вимірювання дипольних магнітних моментів M_x та M_y , подається гармонійним рядом

$$H_R = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\theta = 90^\circ). \quad (3.1)$$

Для здійснення аналізу просторової структури мультипольних складових радіальної напруженості магнітного поля запишемо ряд (3.1) у розгорнутому вигляді, обмежив його просторовою гармонікою $n = 5$:

$$\begin{aligned} H_R = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{2}{R^3} (g_{11} \cos \varphi + h_{11} \sin \varphi) + \frac{3}{R^4} \left[-\frac{1}{2} g_{20} + 3(g_{22} \cos 2\varphi + h_{22} \sin 2\varphi) \right] + \right. \\ \left. + \frac{4}{R^5} \left[-\frac{3}{2} (g_{31} \cos \varphi + h_{31} \sin \varphi) + 15(g_{33} \cos 3\varphi + h_{33} \sin 3\varphi) \right] + \right. \\ \left. + \frac{15}{R^6} \left[\frac{1}{8} g_{40} - \frac{5}{2} (g_{42} \cos 2\varphi + h_{42} \sin 2\varphi) + 35(g_{44} \cos 4\varphi + h_{44} \sin 4\varphi) \right] + \right. \\ \left. + \frac{90}{R^7} \left[\frac{1}{8} (g_{51} \cos \varphi + h_{51} \sin \varphi) - \frac{7}{2} (g_{53} \cos 3\varphi + h_{53} \sin 3\varphi) + \right. \right. \\ \left. \left. + 63(g_{55} \cos 5\varphi + h_{55} \sin 5\varphi) \right] + \dots \right\}. \quad (3.2) \end{aligned}$$

З виразу (3.2) випливає, що секторальні гармоніки дипольної складової магнітного поля ($n = 1, m = 1$), що пропорційні коефіцієнтам $g_{11} = M_x$ та $h_{11} = M_y$, наводять у вимірювальних колах радіальних котушок системи давачів корисні сигнали, а мультипольні складові просторових гармонік вищого порядку $n \geq 2$ наво-

дять в цих колах відповідно мультипольні завади, що можуть бути порівнянні за рівнем з корисними сигналами або перевищувати їх. Тому задача вимірювання дипольних магнітних моментів M_x, M_y зводиться в цьому випадку до селективного виділення з необхідною точністю зі спектру завадо несучих гармонік радіальної напруженості секторіальних гармонік дипольної складової магнітного поля, що змінюються у просторі за законом тригонометричних функцій $\sin \varphi$ та $\cos \varphi$.

Напруженість магнітного поля H_R (3.2) впливає на магнітні вісі радіальних котушок $1R...4R$ та $5R...8R$ давачів $1...4$ та $5...8$, що розташовані на колах радіусів R_1 та R_2 , та наводить в них електричні сигнали, діюче значення яких описується наступними виразами:

для радіальних котушок $1(5)R$ при значенні координат $\varphi = 45^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$\begin{aligned}
 E_{1(5)R} = \frac{1}{k_f} H_{1(5)R} = & \frac{\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^3} (g_{11} + h_{11}) + \frac{3}{k_f R_{1(2)}^4} \left(-\frac{1}{2} g_{20} + \frac{3}{2} h_{22} \right) + \\
 & + \frac{2\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^5} \left[-\frac{3}{2} (g_{31} + h_{31}) + 15(-g_{33} + h_{33}) \right] + \frac{15}{k_f R_{1(2)}^6} \left(\frac{1}{8} g_{40} - \frac{5}{2} h_{42} - 35 g_{44} \right) + \\
 & + \frac{45\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^7} \left[\frac{1}{8} (g_{51} + h_{51}) - \frac{7}{2} (-g_{53} + h_{53}) - 63(g_{55} + h_{55}) \right] + \dots; \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

для радіальних котушок $2(6)R$ при значенні координат $\varphi = 145^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$\begin{aligned}
 E_{2(6)R} = \frac{1}{k_f} H_{2(6)R} = & \frac{\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^3} (-g_{11} + h_{11}) + \frac{3}{k_f R_{1(2)}^4} \left(-\frac{1}{2} g_{20} - 3h_{22} \right) + \\
 & + \frac{2\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^5} \left[-\frac{3}{2} (-g_{31} + h_{31}) + 15(g_{33} + h_{33}) \right] + \frac{15}{k_f R_{1(2)}^6} \left(\frac{1}{8} g_{40} + \frac{5}{2} h_{42} - 35 g_{44} \right) + \\
 & + \frac{45\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^7} \left[\frac{1}{8} (-g_{51} + h_{51}) - \frac{7}{2} (g_{53} + h_{53}) + 63(g_{55} - h_{55}) \right] + \dots; \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

для радіальних котушок $3(7)R$ при значенні координат $\varphi = 225^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$\begin{aligned}
E_{3(7)R} = \frac{1}{k_f} H_{3(7)R} = & -\frac{\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^3} (g_{11} + h_{11}) + \frac{3}{k_f R_{1(2)}^4} \left(-\frac{1}{2} g_{20} + 3h_{22} \right) + \\
& + \frac{2\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^5} \left[\frac{3}{2} (g_{31} + h_{31}) + 15(g_{33} - h_{33}) \right] + \frac{15}{k_f R_{1(2)}^6} \left(\frac{1}{8} g_{40} - \frac{5}{2} h_{42} - 35 g_{44} \right) + \\
& + \frac{45\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^7} \left[-\frac{1}{8} (g_{51} + h_{51}) - \frac{7}{2} (g_{53} - h_{53}) + 63(g_{55} + h_{55}) \right] + \dots; \quad (3.5)
\end{aligned}$$

для радіальних котушок 4(8)R при значенні координат $\varphi = 315^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$\begin{aligned}
E_{4(8)R} = \frac{1}{k_f} H_{4(8)R} = & \frac{\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^3} (g_{11} - h_{11}) + \frac{3}{k_f R_{1(2)}^4} \left(-\frac{1}{2} g_{20} - 3h_{22} \right) + \\
& + \frac{2\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^5} \left[-\frac{3}{2} (g_{31} - h_{31}) - 15(g_{33} + h_{33}) \right] + \frac{15}{k_f R_{1(2)}^6} \left(\frac{1}{8} g_{40} - \frac{5}{2} h_{42} - 35 g_{44} \right) + \\
& + \frac{45\sqrt{2}}{k_f R_{1(2)}^7} \left[\frac{1}{8} (g_{51} - h_{51}) + \frac{7}{2} (g_{53} + h_{53}) + 63(-g_{55} + h_{55}) \right] + \dots; \quad (3.6)
\end{aligned}$$

де k_f – постійна котушок системи давачів;

$E_{i(k)R}$ – діючі значення електричних сигналів, що наведені радіальною напруженістю $H_{i(k)R}$ у радіальних котушках 1R...4R та 5R...8R, що розташовані в точках $i = 1...4$ та $k = 5...8$.

Отримані вирази (3.3) – (3.6) є базовими при обґрунтуванні вибору оптимального варіанту комутації радіальних котушок, що забезпечує підсумовування корисних сигналів у вимірювальних колах радіальних котушок каналів X та Y системи давачів, котрі наведені секторіальною гармонікою дипольної складової магнітного поля.

3.2.1 Вимірювання дипольного магнітного моменту M_x .

Секторіальна гармоніка дипольної складової магнітного поля, що змінюється за законом $\cos\varphi$, пропорційна коефіцієнту g_{11} , що дорівнює дипольному магнітному моменту M_x джерела магнітного поля. Виділення цієї гармоніки з просто-

рової структури радіальної напруженості ЗМП джерела поля аналітично здійснюється шляхом вирішення системи рівнянь (3.3) – (3.6) відносно коефіцієнту g_{11} . В результаті вирішення отримуємо два рівняння, що описують структуру діючих значень результуючих сигналів у вимірювальних колах радіальних котушок $1R...4R$ та $5R...8R$ каналу X першої та другої групи давачів 1..4 та 5...8, розташованих на колах радіусів R_1 та R_2 :

$$E_x(R_1) = \frac{1}{k_f}(H_{1R} - H_{2R} - H_{3R} + H_{4R}) = \frac{4\sqrt{2}}{k_f R_1^3} g_{11} - \frac{8\sqrt{2}}{k_f R_1^5} \left(\frac{3}{2} g_{31} + 15g_{33} \right) + \frac{180\sqrt{2}}{k_f R_1^7} \left(\frac{1}{8} g_{51} + \frac{7}{2} g_{53} - 63g_{55} \right) + \dots; \quad (3.7)$$

$$E_x(R_2) = \frac{1}{k_f}(H_{5R} - H_{6R} - H_{7R} + H_{8R}) = \frac{4\sqrt{2}}{k_f R_2^3} g_{11} - \frac{8\sqrt{2}}{k_f R_2^5} \left(\frac{3}{2} g_{31} + 15g_{33} \right) + \frac{180\sqrt{2}}{k_f R_2^7} \left(\frac{1}{8} g_{51} + \frac{7}{2} g_{53} - 63g_{55} \right) + \dots \quad (3.8)$$

Згідно (3.7) та (3.8) структура результуючих сигналів $E_x(R_1)$ та $E_x(R_2)$ складається тільки з непарних гармонік, оскільки сигнали парних гармонік дорівнюють нулю. Пояснюється це тим, що наведені у радіальних котушках сигнали непарних гармонік знаходяться у фазі та сумуються, а рівні та протифазні сигнали парних гармонік компенсують один одного.

Відокремлення секторіальної гармоніки дипольної складової магнітного поля від завад парних гармонік ЗМП джерела практично реалізується за рахунок певного розташування радіальних котушок навколо досліджуємого джерела ЗМП, параметри якого вимірюються та відповідної їх комутації по схемі рис.3.2.

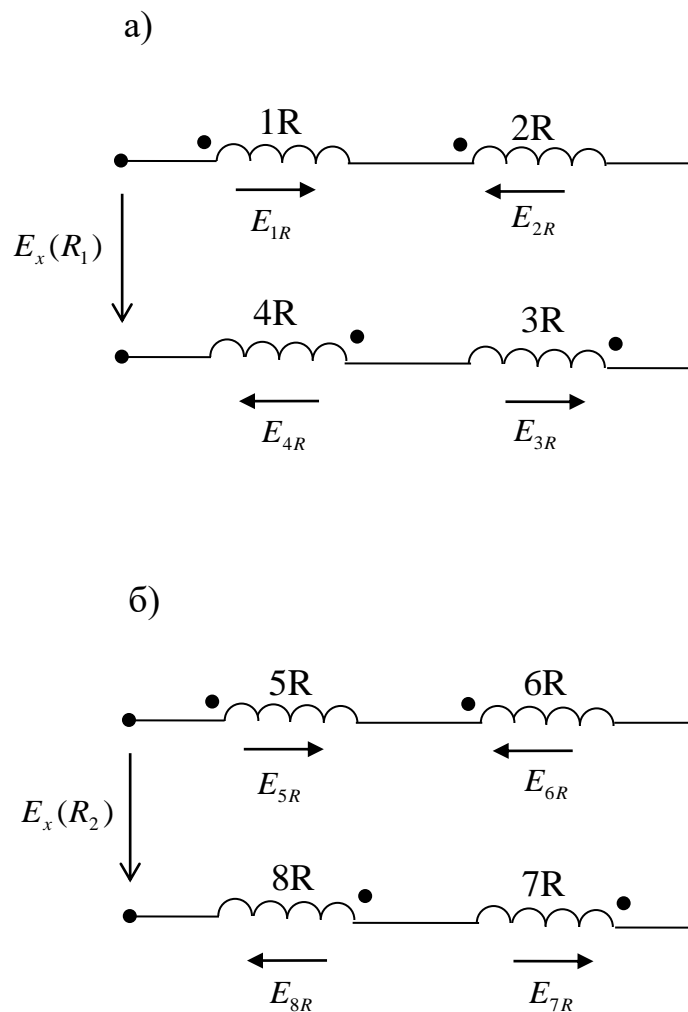


Рисунок 3.2 Схема комутації радіальних котушок каналу X вимірювальної системи

Радіальні котушки $1R...4R$ (рис.3.3,а) першої групи давачів $1...4$ та $5R...8R$ (рис.3.2,б) другої групи давачів включено, як походить з виразів (3.7) та (3.8), згідно за корисним сигналом секторіальної гармоніки дипольної складової магнітного поля, що пропорційна коефіцієнту $g_{22} = M_x$. Завдяки цьому забезпечується відокремлення корисного сигналу від мультипольних завад парних гармонік, що створені просторовими гармоніками ЗМП парного порядку.

У загальному випадку, коли порядок просторових гармонік радіальної напруженості H_R (3.1) прагне до нескінченості, вирази (3.7) та (3.8) приймають вигляд

$$\begin{aligned} E_x(R_1) &= \frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_1^{n+2}} (n+1) M_{xn}, \\ E_x(R_2) &= \frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_2^{n+2}} (n+1) M_{xn}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де M_{xn} – результуючий магнітний момент елементарних мультиполів просторової n -ої гармоніки радіальної напруженості магнітного поля джерела за координатним напрямком X :

$$M_{xn} = 4 \sum_{m=1}^n g_{nm} \sin m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_n^m(\theta = 90^\circ). \quad (3.10)$$

Таким чином, згідно (3.9) структура результуючих сигналів $E_x(R_1)$ та $E_x(R_2)$ вимірювальних кіл радіальних котушок першої та другої групи давачів вимірювального каналу X складається з корисного сигналу першої гармоніки та мультипольних завад непарних гармонік вищого порядку ($n = 3, 5, 7, \dots$), котрі вносять вагому похибку в результати вимірювання дипольного магнітного моменту M_x джерела магнітного поля. Серед мультипольних завад непарних гармонік найбільш вагома за внеском є завада третьої гармоніки. Це пов'язано з тим, що напруженість магнітного поля цієї гармоніки має найменший ступінь спадання зі збільшенням відстані у порівнянні з гармоніками більш високого порядку та з цієї причини завада третьої гармоніки за рівнем перевищує інші мультипольні завади щонайменше в R^2 разів.

Для виключення впливу мультипольної завади третьої гармоніки на результати вимірювання дипольного магнітного моменту M_x вирішуємо систему з двох

рівнянь (3.9) використовуючи метод Гауса. В результаті рішення отримаємо алгоритм для визначення результуючого сигналу каналу X вимірювальної системи, в структурі якого мультипольна завада третьої гармоніки дорівнює нулю:

$$E_x = \frac{2}{R_2^2/R_1^2 - 1} \left[\frac{R_2^5}{R_1^5} E_x(R_2) - E_x(R_1) \right]. \quad (3.11)$$

Для здійснення аналізу структури результуючого сигналу E_x представимо вираз (3.11) з урахуванням значень сигналів $E_x(R_1)$, $E_x(R_2)$ і магнітного моменту n -ої гармоніки M_{xn} , що описуються виразами (3.9) та (3.10), гармонічним рядом у вигляді корисного сигналу першої гармоніки g_{11} та суми мультипольних завод непарних гармонік, починаючи з п'ятої:

$$E_x = \frac{8\sqrt{2}g_{11}}{k_f R^3} + \frac{4}{k_f} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n (R_2/R_1)^{3-n} - 1}{R^{n+2} (R_2^2/R_1^2) - 1} (n+1) \cdot \sum_{m=1}^n g_{nm} \sin m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_n^m(\theta = 90^\circ), \quad (3.12)$$

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

Аналіз структури результуючого сигналу E_x (3.12) показує, що вимірюваний сигнал каналу X вимірювальної системи можливо аналітично описати корисним сигналом E_{x1} першої гармоніки с точністю до мультипольної завади п'ятої гармонік, що вносить основну похибку в результати вимірювання дипольного магнітного моменту M_x джерела поля, тобто $E_x \approx E_{x1} = 8\sqrt{2}M_x/k_f R^3$. З урахуванням цього отримаємо, що $M_x = g_{11} = E_x k_f R^3 / 8\sqrt{2}$. В цьому випадку чутливість каналу X вимірювальної системи корисному сигналу секторіальної гармоніки дипольної складової магнітного поля буде дорівнювати $S_x = 8\sqrt{2}/k_f$.

3.2.2 Вимірювання дипольного магнітного моменту M_y .

Напруженість магнітного поля секторіальної гармоніки, що змінюється в залежності від кутової координати φ за законом $\sin \varphi$ пропорційна коефіцієнту h_{11} , що дорівнює дипольному магнітному моменту M_y джерела поля. Для відокремлення цієї гармоніки зі структури радіальної напруженості магнітного поля вирішуємо систему з чотирьох рівнянь (3.3) – (3.6) відносно коефіцієнта h_{11} першої гармоніки. В підсумку отримуємо два нові рівняння, що описують структуру діючих значень результуючих сигналів каналу Y вимірювальних кіл радіальних котушок двох груп давачів, розташованих на колах радіусів R_1 и R_2 за схемою рис.3.2:

$$E_y(R_1) = \frac{1}{k_f}(H_{1R} + H_{2R} - H_{3R} - H_{4R}) = \frac{4\sqrt{2}}{k_f R_1^3} h_{11} - \frac{8\sqrt{2}}{k_f R_1^5} \left(\frac{3}{2} h_{31} + 15h_{33} \right) + \frac{180\sqrt{2}}{k_f R_1^7} \left(\frac{1}{8} h_{51} - \frac{7}{2} h_{53} - 63h_{55} \right) + \dots; \quad (3.13)$$

$$E_y(R_2) = \frac{1}{k_f}(H_{5R} + H_{6R} - H_{7R} - H_{8R}) = \frac{4\sqrt{2}}{k_f R_2^3} h_{11} - \frac{8\sqrt{2}}{k_f R_2^5} \left(\frac{3}{2} h_{31} + 15h_{33} \right) + \frac{180\sqrt{2}}{k_f R_2^7} \left(\frac{1}{8} h_{51} - \frac{7}{2} h_{53} - 63h_{55} \right) + \dots \quad (3.14)$$

З виразів (3.13) та (3.14) випливає, що в структурі результуючого сигналу $E_y(R_1)$ та $E_y(R_2)$ відсутні парні гармоніки, оскільки у вимірювальних колах радіальних котушок каналу Y вони знаходяться у протифазі. Тому структура сигналів $E_y(R_1)$ та $E_y(R_2)$ складається тільки з сигналів непарних гармонік, так як ці сигнали у вимірювальних колах радіальних котушок знаходяться у фазі та підсумовуються.

Для забезпечення відокремлення секторіальної гармоніки дипольної складової магнітного поля, що пропорційна коефіцієнту $h_{11} = M_y$ від завад просторових

парних гармонік радіальної напруженості ЗМПІ джерела радіальні котушки $1R...4R$ та $5R...8R$ каналу Y вимірювальної системи комутуються за схемою рис.3.4

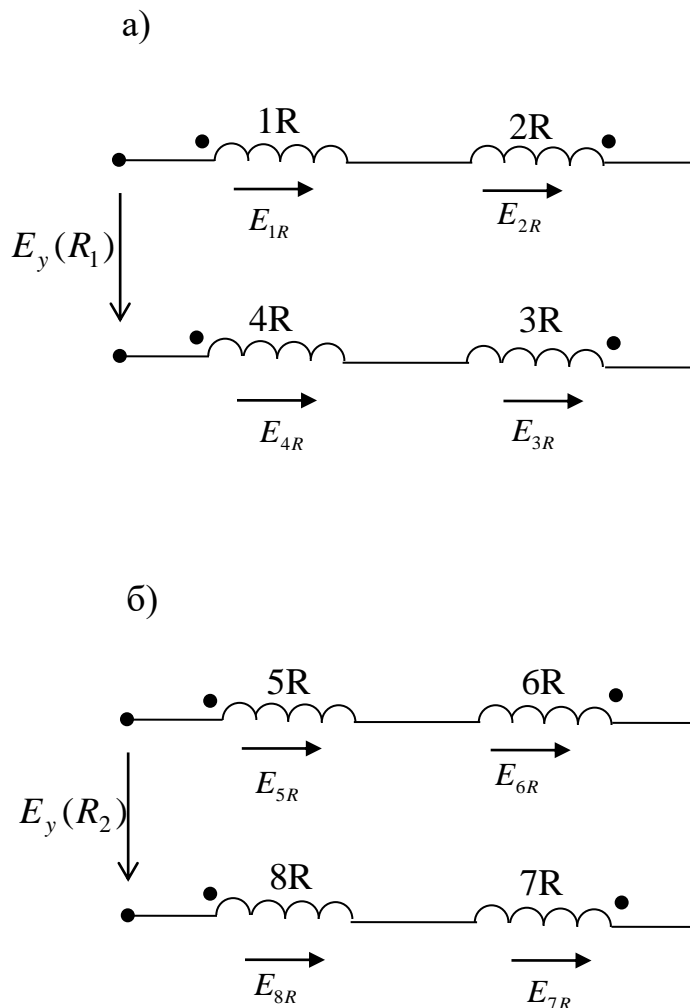


Рисунок 3.4 Схема комутації радіальних котушок каналу Y вимірювальної системи

Радіальні котушки $1R...4R$ (рис.3.4,а) першої групи давачів та радіальні котушки $5R...8R$ (рис.3.4,б) другої групи давачів включено у відповідності з виразами (3.13) та (3.14) згідно за корисним сигналом секторіальної гармоніки дипо-

льної складової магнітного поля h_{11} , що дорівнює дипольному магнітному моменту M_y . За рахунок цього здійснюється у вимірювальних колах радіальних котушок $1R...4R$ додавання фазних сигналів непарних гармонік, в тому числі корисних сигналів першої гармоніки та взаємокомпенсація протифазних сигналів парних гармонік. Тому структура сигналів $E_y(R_1)$ та $E_y(R_2)$ каналу Y складається з корисного сигналу першої гармоніки та мультипольних завад непарних гармонік.

Якщо порядок просторової гармоніки $n = \infty$ в структурі радіальної напруженості магнітного поля джерела (3.1), тоді в цьому випадку вирази (3.13) та (3.14) можна подати у загальному вигляді

$$\begin{aligned} E_y(R_1) &= \frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_1^{n+2}} (n+1) M_{yn}, \\ E_y(R_2) &= \frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_2^{n+2}} (n+1) M_{yn}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

де M_{yn} – результуючий магнітний момент елементарних мультиполів просторової n -ої гармоніки радіальної напруженості магнітного поля джерела за координатним напрямком Y :

$$M_{yn} = 4 \sum_{m=1}^n h_{nm} \cos m 45^\circ \sin^3 m 90^\circ P_n^m(\theta = 90^\circ). \quad (3.16)$$

З виразів (3.15) виходить, що структура результуючих сигналів $E_y(R_1)$ та $E_y(R_2)$ у колах радіальних котушок каналу Y містить корисний сигнал першої гармоніки та мультипольні завади непарних гармонік, починаючи з гармоніки $n = 3$, що є основним фактором низької точності вимірювання дипольного магнітного моменту M_y джерела поля. Найбільш вагомою за вкладом в структурі мультипольних завад непарних гармонік є завада третьої гармоніки, тому що напруже-

ність магнітного поля цієї гармоніки перевищує в R^2 разів магнітне поле решти мультипольних завад вищого порядку.

Для підвищення точності вимірювання дипольного магнітного моменту M_y необхідно виключити вплив мультипольної завади третьої гармоніки на результати вимірювання. Для цього вирішуємо систему рівнянь (3.15) методом Гауса та в підсумку отримаємо алгоритм для визначення результуючого сигналу каналу Y вимірювальної системи, структуро якого не містить мультипольну заваду третьої гармоніки:

$$E_y = \frac{2}{R_2^2 / R_1^2 - 1} \left[\frac{R_2^5}{R_1^5} E_y(R_2) - E_y(R_1) \right]. \quad (3.17)$$

Після підстановки значень сигналів $E_y(R_1)$ та $E_y(R_2)$, які аналітично подано виразами (3.15), та результуючого магнітного моменту n -ої просторової гармоніки M_{yn} (3.16) у вираз (3.11) опишемо структуру результуючого сигналу каналу Y вимірювальної системи гармонійним рядом у вигляді корисного сигналу першої гармоніки, що пропорційний коефіцієнту h_{11} , та суми мультипольних завад непарних гармонік, починаючи з мультипольної завади гармоніки $n = 5$:

$$E_y = \frac{8\sqrt{2}}{k_f R^3} h_{11} + \frac{4}{k_f} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n (R_2 / R_1)^{3-n} - 1}{R^{n+2} (R_2^2 / R_1^2) - 1} (n+1) \cdot \sum_{m=1}^n h_{nm} \cos m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_n^m(\theta = 90^\circ), \quad (3.18)$$

Згідно ряду (3.18) при $n = 3$ мультипольна завада третьої гармоніки відсутня в структурі результуючого сигналу E_y каналу Y вимірювальної системи. Тому вимірюваний сигнал E_y (3.18) подати моделлю корисного сигналу E_{y1} першої гармоніки з точністю до мультипольної завади п'ятої гармоніки, що приводить до

появи методичної похибки вимірювання дипольного магнітного моменту M_y джерела магнітного поля. З урахуванням цього маємо, що

$E_y \approx E_{y1} = 8\sqrt{2}M_y / k_f R^3$ звідки отримуємо значення дипольного магнітного моменту $M_y = h_{11} = E_y k_f R^3 / 8\sqrt{2}$ та чутливості каналу Y вимірювальної системи до корисного сигналу дипольної складової магнітного поля $S_y = 8\sqrt{2} / k_f$.

3.3 Вимірювання параметрів зональної гармоніки дипольної складової магнітного поля

Осьова напруженість магнітного поля зональної гармоніки дипольної складової ЗМП ($n = 1, m = 0$), що пропорційна коефіцієнту g_{10} , що дорівнює осьовому дипольному магнітному моменту M_z джерела магнітного поля:

$$H_{\theta 10} = \frac{1}{4\pi R^3} g_{10} \sin \theta = \frac{1}{4\pi R^3} M_z \sin \theta.$$

Вимірювання осьового дипольного магнітного моменту M_z , який орієнтовано за третім ортогональним напрямком Z прийнятої системи координат XYZ, вимірюється осьовими z-ми котушками 1z...8z давачів вимірювальної системи. Схема розташування z-их котушок 1z...4z першої групи давачів та 5z...8z другої групи давачів навколо досліджуємого джерела ЗМП з орієнтацією магнітних осей цих котушок відносно осей XYZ прийнятої системи координат зображена на рис.3.1

Згідно рис.3.1, осьові котушки 1z...4z першої групи та 5z...8z другої групи давачів 1...8 вимірювальної системи розташовані навколо джерела ЗМП у екваторіальній площині $\theta = 90^\circ$ на колах радіусів R_1 та R_2 зі зсувом один щодо одного на просторовий кут 45° . Магнітні вісі цих котушок орієнтовано паралельно осьовому дипольному магнітному моменту M_z за координатним напрямком z. При

вимірюванні дипольного магнітного моменту M_z джерела магнітного поля на магнітні вісі z -их котушок системи давачів діє осьова компонента напруженості ЗМП джерела, що описується сферичним гармонічним рядом

$$H_\theta = -\frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} R^{-(n+2)} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) \frac{\partial P_n^m(\theta = 90^\circ)}{\partial \theta}. \quad (3.19)$$

Для здійснення аналізу просторової структури осової напруженості магнітного поля джерела подамо ряд (3.19) у розгорнутому вигляді, обмежив його просторової гармонікою п'ятого порядку:

$$H_\theta = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{g_{10}}{R^3} + \frac{3}{R^4} (g_{21} \cos \varphi + h_{21} \sin \varphi) + \frac{3}{R^5} \left[-\frac{1}{2} g_{30} + 5(g_{32} \cos 2\varphi + h_{32} \sin 2\varphi) \right] + \right. \\ \left. + \frac{15}{R^6} \left[-\frac{1}{2} (g_{41} \cos \varphi + h_{41} \sin \varphi) + 7(g_{43} \cos 3\varphi + h_{43} \sin 3\varphi) \right] + \right. \\ \left. \frac{15}{R^7} \left[\frac{1}{8} g_{50} - \frac{7}{2} (g_{52} \cos 2\varphi + h_{52} \sin 2\varphi) + 63(g_{54} \cos 4\varphi + h_{54} \sin 4\varphi) \right] + \dots \right\}. \quad (3.20)$$

Згідно рівняння (3.20) зональна гармоніка дипольної складової магнітного поля зональна гармоніка дипольної складової магнітного поля, що пропорційна коефіцієнту $g_{10} = M_z$ наводить у вимірювальних колах остових котушок давачів вимірювальної системи корисні сигнали, а просторові гармоніки вищого порядку наводять відповідно в колах цих котушок мультипольні завади парних та непарних гармонік, що призводить до появи значної методичної похибки при вимірюванні осового дипольного моменту M_z джерела поля. Тому задача вимірювання дипольного моменту M_z зводиться до відокремлення із заданою точністю зональної гармоніки із просторової структури завадонесучих гармонік напруженості магнітного поля джерела.

В процесі вимірювання дипольного магнітного моменту M_z джерела поля напруженість магнітного поля H_θ (3.20) діє на магнітні вісі котушок 1z...4z та 5z...8z системи давачів вимірювальної системи, що розташовані на колах радіусів R_1 та R_2 по схемі рис.3.5, та наводить в колах цих осьових котушок електричні сигнали, діючи значення яких описується наступними виразами:

для осьових котушок 1z, 5z при значенні координат $\varphi = 45^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$E_{1(5)\theta} = \frac{1}{k_f} H_{1(5)\theta} = \frac{g_{10}}{k_f R_{1(2)}^3} + \frac{3\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^4} (g_{21} + h_{21}) + \frac{3}{k_f R_{1(2)}^5} \left(-\frac{1}{2} g_{30} + 5h_{32} \right) + \frac{15\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^6} \left[-\frac{1}{2} (g_{41} + h_{41}) + 7(-g_{43} + h_{43}) \right] + \frac{15}{2k_f R_{1(2)}^7} \left(\frac{1}{8} g_{50} + \frac{7}{2} h_{52} - 63g_{54} \right) + \dots, (3.21)$$

для осьових котушок 2z, 6z при значенні координат $\varphi = 135^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$E_{2(6)\theta} = \frac{1}{k_f} H_{2(6)\theta} = \frac{g_{10}}{k_f R_{1(2)}^3} + \frac{3\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^4} (-g_{21} + h_{21}) - \frac{3}{k_f R_{1(2)}^5} \left(\frac{1}{2} g_{30} + 5h_{32} \right) + \frac{15\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^6} \left[-\frac{1}{2} (-g_{41} + h_{41}) + 7(g_{43} + h_{43}) \right] + \frac{15}{2k_f R_{1(2)}^7} \left(\frac{1}{8} g_{50} - \frac{7}{2} h_{52} - 63g_{54} \right) + \dots, (3.22)$$

для осьових котушок 3z, 7z при значенні координат $\varphi = 225^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$E_{3(7)\theta} = \frac{1}{k_f} H_{3(7)\theta} = \frac{g_{10}}{k_f R_{1(2)}^3} - \frac{3\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^4} (g_{21} + h_{21}) + \frac{3}{k_f R_{1(2)}^5} \left(-\frac{1}{2} g_{30} + 5h_{32} \right) + \frac{15\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^6} \left[\frac{1}{2} (g_{41} + h_{41}) + 7(g_{43} - h_{43}) \right] + \frac{15}{2k_f R_{1(2)}^7} \left(\frac{1}{8} g_{50} - \frac{7}{2} h_{52} - 63g_{54} \right) + \dots, (3.23)$$

для осьових котушок 4z, 8z при значенні координат $\varphi = 315^\circ$, $R = R_{1(2)}$, $\theta = 90^\circ$

$$E_{4(8)\theta} = \frac{1}{k_f} H_{4(8)\theta} = \frac{g_{10}}{k_f R_{1(2)}^3} + \frac{3\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^4} (g_{21} - h_{21}) + \frac{3}{k_f R_{1(2)}^5} \left(-\frac{1}{2} g_{30} - 5h_{32} \right) +$$

$$+ \frac{15\sqrt{2}}{2k_f R_{1(2)}^6} \left[-\frac{1}{2} (g_{41} - h_{41}) - 7(g_{43} + h_{43}) \right] + \frac{15}{2k_f R_{1(2)}^7} \left(\frac{1}{8} g_{50} + \frac{7}{2} h_{52} - 63g_{54} \right) + \dots, (3.24)$$

де $E_{i(k)\theta}$ – діючі значення електричних сигналів, що наведені осьовою напруженістю магнітного поля $H_{i(k)\theta}$ в осьових котушках $1z...4z$ та $5z...8z$ системи давачів вимірювальної системи, розташованих у точках $i = 1...4, k = 5...8$.

Зональна гармоніка дипольної складової ЗМП джерела не залежить від кутової координати φ та є пропорційна коефіцієнту $g_{10} = M_z$. Відокремлення цієї гармоніки із просторової структури осьової напруженості магнітного поля джерела (3.20) аналітично здійснюється шляхом вирішення системи з чотирьох рівнянь (3.21) – (3.24) відносно коефіцієнту g_{10} зональної гармоніки першого порядку.

Вирішення рівнянь (3.21) – (3.24) в цьому випадку зводиться до алгебраїчного сумування, внаслідок чого отримуємо для кожної групи осьових котушок два рівняння, які описують структуру діючих значень результуючих сигналів у вимірювальних колах осьових котушок $1z...4z$ та $5z...8z$ каналу Z давачів вимірювальної системи, розташованих на колах радіусів R_1 та R_2 за схемою рис. 3.5:

$$E_z(R_1) = \frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_{i\theta} = \frac{4g_{10}}{k_f R_1^3} - \frac{6}{k_f R_1^5} g_{30} + \frac{60}{k_f R_1^7} \left(\frac{1}{8} g_{50} + 63g_{54} \right) + \dots,$$

$$E_z(R_2) = \frac{1}{k_f} \sum_{k=5}^8 H_{i\theta} = \frac{4g_{10}}{k_f R_2^3} - \frac{6}{k_f R_2^5} g_{30} + \frac{60}{k_f R_2^7} \left(\frac{1}{8} g_{50} + 63g_{54} \right) + \dots \quad (3.25)$$

Аналіз рівнянь (3.25) показує, що структура результуючих сигналів $E_z(R_1)$ та $E_z(R_2)$ першої та другої групи осьових котушок давачів каналу Z вимірювальної системи складається з сигналів непарних гармонік, тому що сигнали парних гармонік в колах осьових котушок є у протифазі та компенсують один одного.

Практична реалізація відокремлення зональної гармоніки дипольної складової магнітного поля від завад просторових парних гармонік ЗМП джерела поля здійснюється за рахунок комутації осьових котушок $1z...4z$ та $5z...8z$ по схемі рис. 3.6.

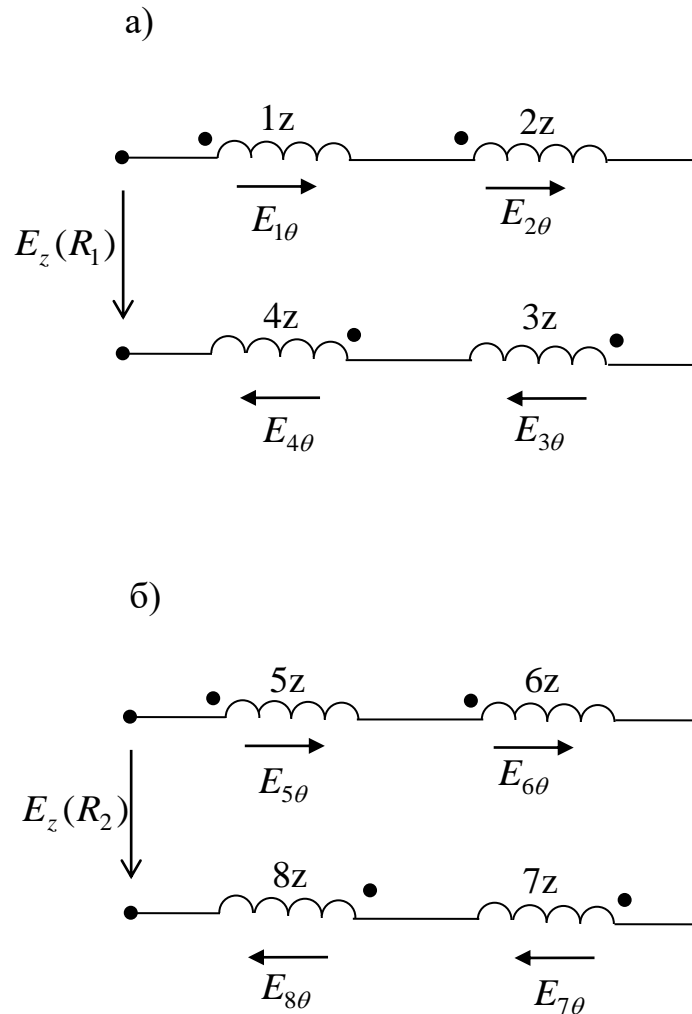


Рисунок 3.6 схема комутації осьових котушок каналу Z
вимірювальної системи

Електричні сигнали $E_{i\theta}$ ($i = 1...4$) та $E_{k\theta}$ ($k = 5...8$), що наведені осьовою компонентою напруженості магнітного поля джерела у вимірювальних колах послідовно з'єднаних осьових котушок $1z...4z$ (рис. 3.6,а) та $5z...8z$ (рис. 3.6,б) каналу Z вимірювальної системи знаходяться у фазі та сумуються, в тому ж рахунку

корисні сигнали зональної гармоніки дипольної складової магнітного поля $n = 1, m = 0$, а мультипольні завади парних гармонік в цьому випадку знаходяться згідно (3.21) – (3.24) у протифазі та компенсують одна одну.

Якщо порядок просторових гармонік осьової напруженості магнітного поля H_θ (3.20) джерела поля $n \rightarrow \infty$, то в цьому випадку результуючі сигнали $E_z(R_1)$ та $E_z(R_2)$, як походить з (3.25), можна подати в загальному вигляді виразами:

$$\begin{aligned} E_z(R_1) &= -\frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_1^{n+2}} M_{zn}, \\ E_z(R_2) &= -\frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{R_2^{n+2}} M_{zn}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

де M_{zn} – результуючий магнітний момент елементарних мультиполів просторової n -ої гармоніки осьової компоненти напруженості магнітного поля джерела ЗМП за координатним напрямком Z:

$$M_{zn} = 4 \sum_{m=0}^n g_{nm} \cos m 45^\circ \cos^3 m 90^\circ \frac{\partial P_n^m(\theta = 90^\circ)}{\partial \theta}. \quad (3.27)$$

Структура результуючих електричних сигналів $E_z(R_1)$ та $E_z(R_2)$ каналу Z складається з сигналів непарних гармонік, в тому ж рахунку з корисних сигналів зональної гармоніки $n = 1, m = 0$ та мультипольних завад сигналів непарних гармонік $n = 3, 5, 7 \dots$, що вносять значну похибку в результати вимірювання дипольного магнітного моменту M_z джерела магнітного поля.

Для підвищення точності вимірювання осьового дипольного магнітного моменту M_z необхідно перш за все виключити зі структури сигналів $E_z(R_1)$ та $E_z(R_2)$ найбільш вагому мультипольну заваду гармоніки $n = 3$. Аналітично це здійснюється шляхом вирішення системи рівнянь (3.26) методом Гауса. В резуль-

таті отримаємо алгоритм визначення результуючого сигналу E_z каналу Z вимірювальної системи

$$E_z = \frac{2}{R_2^2 / R_1^2 - 1} \left[\frac{R_2^5}{R_1^5} E_z(R_2) - E_z(R_1) \right], \quad (3.28)$$

практична реалізація якого забезпечує виключення із структури сигналу E_z мультипольної завади третьої гармоніки шляхом її компенсації.

Для відображення структури результуючого сигналу E_z каналу Z гармонічним рядом підставимо значення сигналів $E_z(R_1)$ та $E_z(R_2)$, що описано виразами (3.26), з урахуванням значення M_{zn} (3.27) у вираз (3.28) та отримаємо вираз виду

$$E_z = \frac{8}{k_f R^3} g_{10} - \frac{4}{k_f} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n (R_2 / R_1)^{3-n} - 1}{R^{n+2} (R_2^2 / R_1^2) - 1} \cdot \sum_{m=1}^n g_{nm} \cos m45^\circ \sin^3 m90^\circ \frac{\partial P_n^m(\theta = 90^\circ)}{\partial \theta}. \quad (3.29)$$

Аналіз виразу (3.29) показує, що структура сигналу E_z складається з корисного сигналу зональної гармоніки $n = 1$, що пропорційна коефіцієнту $g_{10} = M_z$, 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 результуючий сигнал E_z (3.29) можна описати корисним сигналом E_{z1} зональної гармоніки дипольної складової магнітного поля з точністю до мультипольної завади гармоніки $n = 5$, котра вносить основний внесок в методичну похибку вимірювання осьового дипольного магнітного моменту M_z джерел ЗМП. В підсумку отримаємо вираз $E_z \approx E_{z1} = 8g_{10} / k_f R^3$, з якого виходить, що осьовий дипольний момент джерела магнітного поля $M_z = E_z k_f R^3 / 8$ та чутливість каналу Z вимірювальної системи

до корисного сигналу зональної гармоніки дипольної складової ЗМП джерела

$$S_z = 8/k_f.$$

3.4 Розробка структурної схеми трьох каналної вимірювальної системи вимірювання дипольних магнітних моментів

На основі виразів (3.11), (3.17) та (3.28), що описують значення результуючих електричних сигналів E_x , E_y , E_z кіл вимірювальних каналів X, Y, Z системи давачів вимірювальної системи, розроблено для загального алгоритм отримання на виході каналів X, Y, Z вимірювальної системи вимірюваних сигналів, в структурі яких відсутня мультипольна завада третьої гармоніки за рахунок її компенсації:

$$E = k_{1E}E(R_2) - k_{2E}E(R_2), \quad (3.30)$$

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 рис. 3.1 обчислюються за формулами

$$k_{1E} = \frac{2}{(R_2^2/R_1^2) - 1}, \quad k_{2E} = \frac{2(R_2^5/R_1^5)}{(R_2^2/R_1^2) - 1}. \quad (3.31)$$

Практична реалізація виразу (3.30) по виключенню впливу мультипольної завади третьої гармоніки, що утворена октупольною складовою ЗМП, на результати вимірювання дипольних магнітних моментів M_x , M_y , M_z джерел ЗМП здійснюється трьохканальною вимірювальною системою, структурна схема якої зображена на рис. 3.7, де прийняти наступні позначення: Д1-4 – давачі першої гру-

пи; 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 електричних колах радіальних та осьових котушок давачів, що розташовані на колах радіусів R_1 та R_2 , надходять у комутуючий пристрій КП, котрий формує результуючі електричні сигнали $E_x(R_1)$, $E_x(R_2)$ в електричному колі вимірювального каналу X, $E_y(R_1)$, $E_y(R_2)$ – в електричному колі вимірювального каналу Y, $E_z(R_1)$, $E_z(R_2)$ – в електричному колі вимірювального каналу Z шляхом відповідної комутації радіальних та осьових котушок за схемами рис. 3.3, рис. 3.4 та рис. 3.6. 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 (3.30) у k_{1E} та k_{2E} разів відповідно (3.31). 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_{Π} , що утворений електромагнітним полем зовнішніх джерел у вимірювальних колах радіальних та осьових котушок системи давачів на вхід суматора С, електрична схема заміщення якого зображена на рис. 3.8.

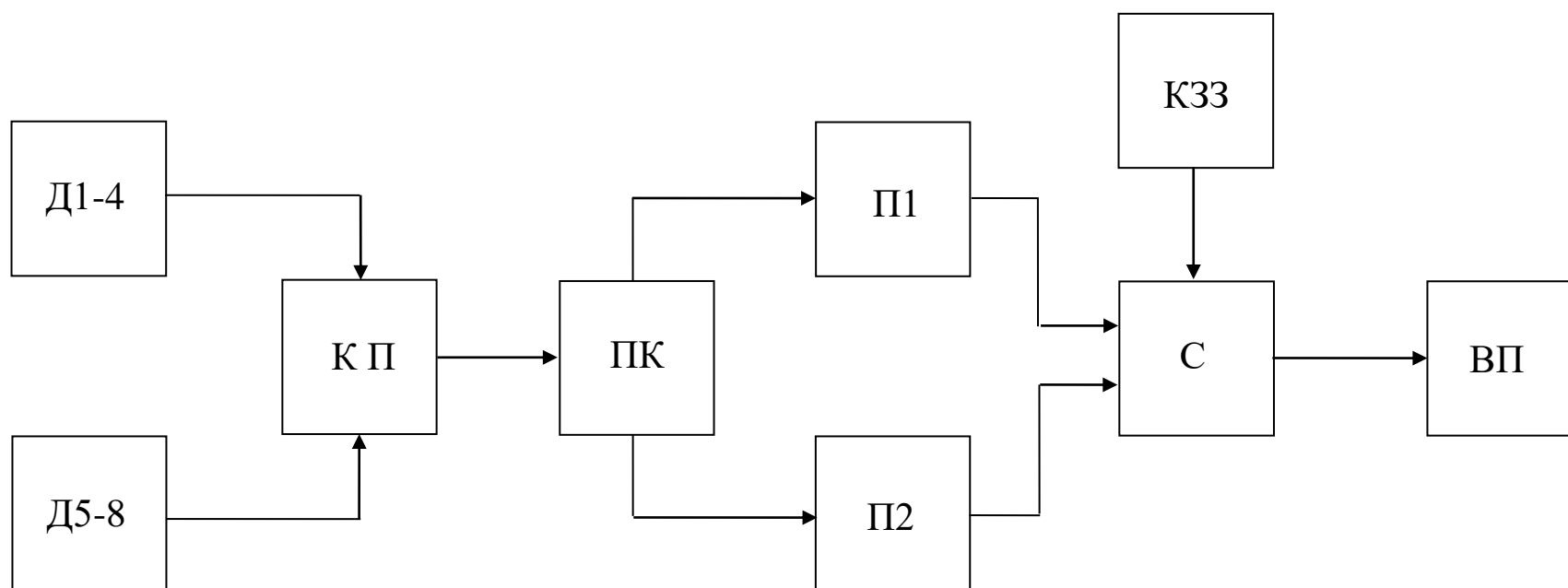


Рисунок 3.7 Структурна схема вимірювальної системи вимірювання дипольних магнітних моментів

З виходу суматора результуючий вимірюваний сигнал E , що дорівнює

$$E = E(R_2)_E - E(R_1)_E + E_{II} - U_k$$

надходить на вимірювальний прилад ВП.

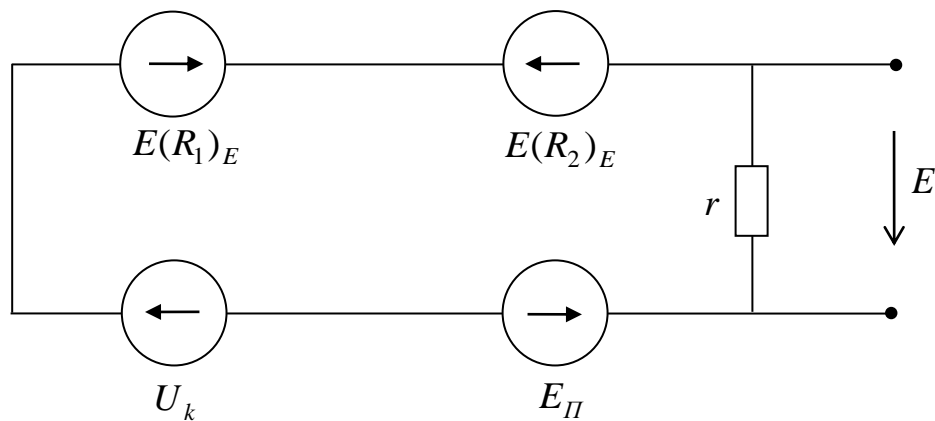


Рисунок 3.8 Електрична схема заміщення суматора

При відключеному джерелі ЗМП на вхід суматора надходить сигнал зовнішньої завади E_{II} та сигнал U_k , який регулюється за величиною та фазою та компенсує E_{II} , тому що при знеструмленому джерелі магнітного поля

$E(R_1)_E = E(R_2)_E = 0$. В цьому випадку при умові $E_{II} = U_k$ забезпечується повна

компенсація зовнішньої завади E_{II} та виключається вплив цієї завади на результати вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП. Потім при включеному джерелі ЗМП та виконанні умови $E_{II} - U_k = 0$ вимірюваний сигнал

$E = E(R_1)_E - E(R_2)_E$ зі входу суматора надходить на вимірювальний прилад для

почергової реєстрації електричних сигналів

$$E_x = \frac{8\sqrt{2}M_x}{k_f R^3}; E_y = \frac{8\sqrt{2}M_y}{k_f R^3}; E_z = \frac{8M_z}{k_f R^3}.$$

Електрична схема компенсатора зовнішньої завади, який входить у склад структури вимірювальної системи (рис. 3.7), компенсуючи напруга якого U_k регулюється за величиною від нуля до рівня зовнішньої завади E_{Π} та по фазі $0 - 2\pi$, зображена на рис. 3.9

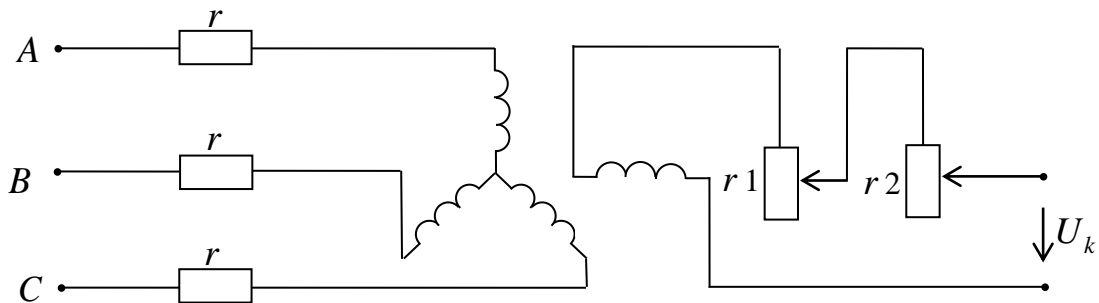


Рисунок 3.9 Електрична схема компенсатора зовнішньої завади

Основними елементами компенсатора зовнішньої завади згідно рис. 3.9 є сельсин, який складається з трьохфазної та однофазної обмоток, потенціометри $r1$, $r2$ та баластні опори r . Струми, що протікають по трьохфазній обмотці сельсина, створюють його повітряному зазорі обертаюче магнітне поле, котре наводить у однофазній обмотці електрорушійну силу. Зміненням стану однофазної обмотки сельсину шляхом її обертання відносно його трьохфазної обмотки та переміщенням движків потенціометрів $r1$, $r2$ здійснюється регулювання компенсуючої напруги U_k по фазі від нуля до 2π та за величиною від нуля до $U_k = E_{\Pi}$, внаслідок чого забезпечується компенсація зовнішньої електромагнітної завади.

Таким чином, запропонована трьох канална вимірювальна система забезпечує відокремлення від мультипольних завад парних гармонік магнітного поля

джерела, виключає вплив найбільш вагомої мультипольної завади третьої гармоніки, що створена октупольною складовою магнітного поля, та зовнішньої електромагнітної завади на результати вимірювань, внаслідок чого підвищується точність вимірювання дипольних магнітних моментів M_x , M_y , M_z джерела ЗМП.

За даними вимірювань дипольних магнітних моментів M_x , M_y , M_z джерел ЗМП типу «чорна скриня»

$$M_x = E_x k_f R^3 / 8\sqrt{2}, \quad M_y = E_y k_f R^3 / 8\sqrt{2}, \quad M_z = E_z k_f R^3 / 8$$

Можна визначити значення радіальної, дотичної та осьової компонент напруженості дипольної складової магнітного поля цього джерела в заданих точках зовнішнього простору та використовувати отримані данні для вирішення практичних задач з електромагнітної сумісності та магнітної екології:

$$H_{R1} = \frac{1}{2\pi R^3} (M_x \cos \varphi + M_y \sin \varphi) \sin \theta;$$

$$H_{\varphi 1} = \frac{1}{4\pi R^3} (M_x \sin \varphi + M_y \cos \varphi) \sin \theta;$$

$$H_{\theta 1} = \frac{1}{4\pi R^3} M_z.$$

52

3.5 Методична похибка вимірювання дипольних магнітних моментів

Структура вимірюваних трьохканальною вимірювальною системою результуючих електричних сигналів каналів X, Y, Z складається з корисних сигналів секторіальної та зональної гармонік дипольної складової магнітного поля, котрі пропорційні дипольним магнітним моментам M_x , M_y , M_z джерела магнітного

поля, та мультипольних завад непарних гармонік вищого порядку $n = 5, 7, 9, \dots$ які призводять до появи мультипольної складової методичної похибки вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП за трьома ортогональними напрямками.

Визначення значення цієї похибки та отримання її математичних виразів засноване на використанні мультипольної теорії подання ЗМП джерела та класичного методу подання магнітного поля джерела, що засноване на теорії магнітного диполя. Це дає змогу в підсумку отримати на основі порівняльного аналізу достовірні та зручні для використання математичні вирази для мультипольної похибки при оцінці ефективності та визначенні метрологічних характеристик трьох каналів вимірювальної системи вимірювання дипольних магнітних моментів за трьома ортогональними напрямками на етапі їх створення.

На точність результатів вимірювання напруженості секторіальної та зональної гармонік дипольної складової магнітного поля, пропорційних дипольним магнітним моментам M_x, M_y, M_z джерела ЗМП, істотний вплив надають мультипольні завади непарних гармонік, починаючи із завади п'ятої гармоніки. Найбільш вагомий вклад в структурі мультипольних завад непарних гармонік має завада п'ятої гармоніки у порівнянні з мультипольними завадами більш високого порядку, тому що їх завадо несучі просторові гармоніки ЗМП джерела мають набагато більшу ступінь убунання напруженості магнітного поля зі збільшенням відстані у порівнянні з магнітним полем п'ятої гармоніки.

Тому вирішення поставленої задачі зводиться в підсумку до визначення складових мультипольної похибки від мультипольних завад непарних гармонік та оцінці її вагового внеску в результуючу мультипольну похибку, знайдену класичним методом.

3.5.1 Мультипольна похибка вимірювання дипольного магнітного моменту M_x .

Визначимо з початку значення перших трьох мультипольних завад непарних гармонік $n = 5, 7, 9$ в порядку збільшення їх номеру та складові мультиполь-

ної похибки, що утворені цими завадами, потім результуючу мультипольну похибку.

Завадонесуча просторова гармоніка п'ятого порядку наводить у котушках $1x...8x$ каналу X трьох каналної вимірювальної системи заваду, значення якої визначається виразом

$$E_{x5} = \frac{-12R_1^2 M_{x5}}{k_f R_2^2 R^7}.$$

Результуючий магнітний момент п'ятої гармоніки за координатним напрямком X визначається при $n = 5$ за формулою (3.10) та відображується наступним виразом у вигляді ряду

$$M_{x5} = 4 \sum_{m=1}^5 g_{5m} \sin m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_5^m(\theta = 90^\circ).$$

Поліноми Лежандра $P_5^m(90^\circ)$ для елементарних мультиполів порядку $m = 1...5$ п'ятої просторової гармоніки магнітного поля при значенні кутової координати $\theta = 90^\circ$ дорівнюють

$$P_5^1 = \frac{15}{8}; P_5^2 = 0; P_5^3 = \frac{-105}{2}; P_5^4 = 0; P_5^5 = 945.$$

З урахуванням цього результуючий магнітний момент M_{x5} просторової завдонесучої п'ятої гармоніки магнітного поля джерела приймає вигляд

$$M_{x5} = 30\sqrt{2} \left(\frac{1}{8} g_{51} + \frac{7}{2} g_{53} - 63g_{55} \right) = \frac{-85\sqrt{2}}{16} M_x x_0^4, \quad (3.32)$$

де g_{5m} ($m = 1, 3, 5$) – коефіцієнти п'ятої просторової гармоніки магнітного поля, значення яких при ексцентричності вимірюваного дипольного магнітного моменту на координату x_0 , знайдені розрахунковим шляхом, будуть дорівнювати

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

В цьому випадку вираз мультипольної завади просторової п'ятої гармоніки ЗМП джерела з урахуванням значення результуючого магнітного моменту M_{x5} (3.32) приймає вигляд

$$E_{x5} = \frac{255\sqrt{2}R_1^2 M_x x_0^4}{4k_f R_2^2 R^7}. \quad (3.33)$$

Мультипольна завада п'ятої гармоніки E_{x5} (3.33) призводить до появи при вимірюванні дипольного магнітного моменту M_x джерела поля складової мультипольної похибки п'ятого порядку, яку можна описати виразом у вигляді функціональної залежності від базової відстані R та габаритного розміру джерела ЗМП

55

$$\delta_{x5} = \frac{E_{x5}}{E_{x1}} = \frac{255R_1^2}{32R_2^2} \left(\frac{k_x}{R/L_x} \right)^4,$$

де E_{x1} – корисний сигнал каналу X вимірювальної системи, що створений секторіальною гармонікою дипольної складової магнітного поля, котра змінюється в залежності від кутової координати φ за законом $\cos\varphi$;

$$k_x = \frac{x_0}{L_x} \leq \frac{1}{2} \text{ – коефіцієнт ексцентричності вимірюваного дипольного момен-}$$

ту M_x ;

L_x – габаритний розмір джерела ЗМП за координатним напрямком X.

Завадонесуча просторова гармоніка сьомого порядку магнітного поля джерела, що убиває зі зростанням відстані пропорційно R^{-9} , створює мультипольну заваду у вимірювальному колі радіальних котушок каналу X вимірювальної системи, що має наступний вираз

$$E_{x7} = -\frac{16R_1^4(1 + R_1^2/R_2^2)M_{x7}}{k_f R_2^4 R^9}.$$

Результуючий магнітний момент M_{x7} в цьому виразі можна відобразити рядом у вигляді суми мультипольних магнітних моментів елементарних мультиполів порядку $m = 1...7$ сьомої гармоніки

$$M_{x7} = 4 \sum_{m=1}^7 g_{7m} \sin m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_7^m(\theta = 90^\circ).$$

Поліноми Лежандра $P_7^m(90^\circ)$ в цьому виразі для елементарних мультиполів порядку $m = 1...7$ мультипольної завади сьомої просторової гармоніки магнітного поля при значенні кутбвої координати $\theta = 90^\circ$ дорівнюють

$$P_7^1 = \frac{-35}{16}; P_7^2 = 0; P_7^3 = \frac{915}{8}; P_7^4 = 0; P_7^5 = \frac{-10395}{2}; P_7^6 = 0; P_7^7 = 135135.$$

Для наведених значень P_7^m при $\theta = 90^\circ$ результуючий магнітний момент M_{x7} тесеральних гармонік $m = 1, 3, 5$ та секторіальної гармоніки $m = 7$ мультипольної завади сьомого порядку буде дорівнювати

$$M_{x7} = 70\sqrt{2} \left(-\frac{1}{16} g_{71} - \frac{27}{8} g_{73} + \frac{297}{2} g_{75} + 3861 g_{77} \right) = \frac{161\sqrt{2}}{64} M_x x_0^6,$$

де g_{7m} ($m = 1, 3, 5, 7$) – коефіцієнти мультипольної завади сьомої просторової гармоніки магнітного поля, що дорівнюють магнітним моментам елементарних мультиполів тесеральних ($m = 1, 3, 5$) та секторіальної гармоніки ($m = 7$) сьомого порядку:

$$g_{71} = \frac{-35}{64} M_x x_0^6, \quad g_{73} = \frac{7}{640} M_x x_0^6, \quad g_{75} = \frac{-7}{23040} M_x x_0^6, \quad g_{77} = \frac{1}{46080} M_x x_0^6.$$

В результаті обчислення мультипольної завади сьомої гармоніки отримаємо наступний вираз

$$E_{x7} = -\frac{161\sqrt{2}R_1^4(1+R_2^2/R_1^2)}{4k_f R_2^4 R^9} M_x x_0^6. \quad (3.34)$$

При вимірюванні дипольного магнітного моменту M_x завада сьомої гармоніки E_{x7} призводить до появи складової мультипольної похибки сьомого порядку, котра має наступний вираз

$$\delta_{x7} = \frac{E_{x7}}{E_{x1}} = -\frac{161R_1^4(1+R_2^2/R_1^2)}{32R_2^4} \left(\frac{k_x}{R/L_x} \right)^4. \quad (3.35)$$

Для наступної завадо несучої просторової гармоніки дев'ятого порядку джерела ЗМП, котра впливає на магнітні вісі радіальних котушок та наводить у вимірювальному колі каналу X системи давачів заваду, маємо наступний вираз

$$E_{x9} = -\frac{20R_1^6(R_2^6/R_1^6 - 1)M_{x9}}{k_f R_2^6 R^{11}(R_2^6/R_1^6 - 1)}.$$

Результуючий магнітний момент заводи дев'ятої гармоніки за координатним напрямком X , дорівнює сумі магнітних моментів елементарних мультиполів порядку $m = 1 \dots 9$ мультипольної заводи гармоніки $n = 9$, відображається гармонічним рядом

$$M_{x9} = 4 \sum_{m=1}^9 g_{9m} \sin m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_9^m(\theta = 90^\circ).$$

В цьому гармонічному ряді поліноми Лежандра дев'ятого порядку P_9^m при кутовій координаті $\theta = 90^\circ$ для елементарних мультиполів порядку $m = 1 \dots 9$ гармоніки $n = 9$ приймають значення, що дорівнюють

$$P_9^1 = \frac{315}{128}; P_9^2 = 0; P_9^3 = \frac{-3465}{16}; P_9^4 = 0; P_9^5 = \frac{135135}{8};$$

$$P_9^6 = 0; P_9^7 = \frac{-2027025}{2}; P_9^8 = 0; P_9^9 = 34459425.$$

58

З урахуванням наведених значень поліному Лежандра $P_9^m(\theta = 90^\circ)$ результуючий магнітний момент M_{x9} мультипольної заводи дев'ятої гармоніки визначається виразом

$$M_{x9} = 630\sqrt{2} \left(\frac{1}{128} g_{91} + \frac{11}{16} g_{93} - \frac{429}{8} g_{95} - \frac{6435}{2} g_{97} + 109395 g_{99} \right) =$$

$$= \frac{7443\sqrt{2}}{1024} M_{x0}^8,$$

де $g_{9m}(n=1,3,5,7,9)$ – коефіцієнти мультипольної завади дев'ятої просторової гармоніки магнітного поля, значення яких для елементарних мультиполів тесеральних ($m=1,3,5,7$) та секторіальної гармоніки ($m=9$) при ексцентричності дипольного магнітного моменту M_x на координату x_0 будуть дорівнювати:

$$g_{91} = \frac{63}{128} M_x x_0^8, \quad g_{93} = \frac{-3}{512} M_x x_0^8, \quad g_{95} = \frac{39}{465920} M_x x_0^8,$$

$$g_{97} = \frac{-1}{573440} M_x x_0^8, \quad g_{99} = \frac{1}{10321920} M_x x_0^8.$$

З урахуванням отриманого значення результуючого магнітного моменту M_{x9} діюче значення мультипольної завади дев'ятої гармоніки в остаточному вигляді буде дорівнювати

$$E_{x9} = -\frac{37215 \sqrt{2} R_1^6 (R_2^6 / R_1^6 - 1)}{256 k_f R_2^6 R^{11} (R_2^2 / R_1^2 - 1)} M_x x_0^8. \quad (3.36)$$

Складова мультипольної похибки дев'ятої гармоніки вимірювання дипольного магнітного моменту M_x трьохканальною вимірювальною системою, що обумовлена наявністю мультипольної завади E_{x9} (3.36) в колі каналу X вимірювальної системи, описується наступним виразом

$$\delta_{x9} = \frac{E_{x9}}{E_{x1}} = -\frac{37215 R_1^6 (R_2^6 / R_1^6 - 1)}{2048 R_2^6 (R_2^2 / R_1^2 - 1)} \left(\frac{k_x}{R / L_x} \right)^8.$$

Тепер визначимо класичним методом на основі теорії магнітного диполя результуючу мультипольну похибку вимірювання ексцентричного дипольного моменту $M_x(x_0, 0, 0)$ джерела магнітного поля. Створена таким джерелом поля радіальна компонента напруженості магнітного поля описується в екваторіальній

площині, де розташовані радіальні котушки давачів вимірювальної системи, виразом

$$H_R = \frac{M_x}{8\pi} \frac{-7Rx_0 + 4(R^2 + x_0)\cos\varphi - Rx_0\cos 2\varphi}{(R^2 - 2Rx_0\cos\varphi + x_0^2)^{5/2}}. \quad (3.37)$$

Радіальна напруженість магнітного поля H_R (3.37) впливає на магнітні вісі радіальних котушок $1R...4R$ та $5R...8R$ системи давачів, що розташовані на колах радіусів R_1 та R_2 , та наводить в колах цих котушок електричні сигнали, що описуються наступними виразами:

для радіальних котушок $1R, 4R, 5R, 8R$ в точках з координатами

$$\varphi = 45^\circ, 315^\circ \text{ та } R = R_{1(2)}, \theta = 90^\circ$$

$$E_{1(5)} = E_{4(8)} = \frac{1}{k_f} H_{1(5)R} = \frac{1}{k_f} H_{4(8)R} = \frac{M_x}{2k_f} \frac{-7R_{1(2)}x_0 + 2\sqrt{2}(R_{1(2)}^2 + x_0^2)}{(R_{1(2)}^2 - \sqrt{2}R_{1(2)}x_0 + x_0^2)^{5/2}}; \quad (3.38)$$

для радіальних котушок $2R, 3R, 6R, 7R$ в точках з координатами

$$\varphi = 135^\circ, 225^\circ \text{ та } R = R_{1(2)}, \theta = 90^\circ$$

60

$$E_{2(6)} = E_{3(7)} = \frac{1}{k_f} H_{2(6)R} = \frac{1}{k_f} H_{3(7)R} = -\frac{M_x}{2k_f} \frac{7R_{1(2)}x_0 + 2\sqrt{2}(R_{1(2)}^2 + x_0^2)}{(R_{1(2)}^2 + \sqrt{2}R_{1(2)}x_0 + x_0^2)^{5/2}}; \quad (3.39)$$

У відповідності з виразами (3.38), (3.39) у вимірювальному ланцюгу радіальних котушок $1R...4R$ та $5R...8R$ каналу X системи давачів, з'єднаних за схемою рис. 3.3, наводяться електричні сигнали

$$E_{xp}(R_1) = \frac{1}{k_f} (H_{1R} - H_{2R} - H_{3R} + H_{4R}) = \frac{M_x}{k_f R^3} A_x, \quad (3.40)$$

$$E_{xp}(R_2) = \frac{1}{k_f} (H_{5R} - H_{6R} - H_{7R} + H_{8R}) = \frac{M_x}{k_f R^3} B_x, \quad (3.41)$$

де A_x , B_x – коефіцієнти, значення яких обчислюються за наступними формулами:

$$A_x = \frac{R^3}{L_x^3} \left[\frac{-7k_x \cdot R / L_x + 2\sqrt{2}(R^2 / L_x^2 + k_x^2)}{(R^2 / L_x^2 - \sqrt{2}k_x \cdot R / L_x + k_x^2)^{5/2}} + \frac{7k_x \cdot R / L_x + 2\sqrt{2}(R^2 / L_x^2 + k_x^2)}{(R^2 / L_x^2 + \sqrt{2}k_x \cdot R / L_x + k_x^2)^{5/2}} \right];$$

$$B_x = \frac{R^3}{L_x^3} \left[\frac{-7k_x \cdot R / L_x \cdot R_2 / R_1 + 2\sqrt{2}(R^2 / L_x^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 + k_x^2)}{(R^2 / L_x^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 - \sqrt{2}k_x \cdot R / L_x \cdot R_2 / R_1 + k_x^2)^{5/2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{7k_x \cdot R / L_x \cdot R_2 / R_1 + 2\sqrt{2}(R^2 / L_x^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 + k_x^2)}{(R^2 / L_x^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 + \sqrt{2}k_x \cdot R / L_x \cdot R_2 / R_1 + k_x^2)^{5/2}} \right].$$

Значення результуючого сигналу E_{xp} каналу X вимірювальної системи обчислюється за наступним виразом

$$E_{xp} = \frac{2}{R_2^2 / R_1^2 - 1} \left[\frac{R_2^5}{R_1^5} E_{xp}(R_2) - E_{xp}(R_1) \right]. \quad (3.42)$$

Після підстановки значень електричних сигналів $E_{xp}(R_1)$ та $E_{xp}(R_2)$, які описані виразами (3.40), (3.41) та (3.42) знаходимо значення результуючого сигналу каналу X вимірювальної системи, котре описується виразом

$$E_{xp} = \frac{2M_x}{k_f R^3} \cdot \frac{B_x \cdot R_2^5 / R_1^5 - A_x}{R_2^2 / R_1^2 - 1}.$$

Наявність у вимірюваному сигналі E_{xp} мультипольних завад непарних гармонік призводить до появи при вимірюванні дипольного магнітного моменту M_x результуючої мультипольної похибки

$$\delta_{xp} = \frac{E_{xp} - E_{x1}}{E_{x1}} = \frac{B_x \cdot R_2^5 / R_1^5 - A_x}{4\sqrt{2}(R_2^2 / R_1^2 - 1)} - 1. \quad (3.43)$$

Складові результуючої мультипольної похибки (3.43) можна описати для загального випадку, коли порядок завад просторових гармонік $n = \infty$, гармонійним рядом

$$\delta_x = \frac{1}{2\sqrt{2} g_{11}} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1(-1)^n (R_2 / R_1)^{3-n}}{R^{n-1} (R_2^2 / R_1^2) - 1} \cdot (n+1) \cdot \sum_{m=1}^n g_{nm} \sin m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_n^m(\theta = 90^\circ).$$

На рис. 3.10 побудовано залежності $\delta_{xp} = f(R / L_x)$ та $\delta_{xn} = f(R / L_x)$, при значенні $R_2 / R_1 = \sqrt[3]{2}$, та $k_x = 1/3$. Ці залежності характеризують значення результуючої мультипольної похибки δ_{xp} та її складових δ_{xn} непарних гармонік $n = 5, 7, 9$ від відстані, на якій проводяться вимірювання дипольного моменту M_x , що пов'язана з габаритним розміром джерела магнітного поля за координатним напрямком X.

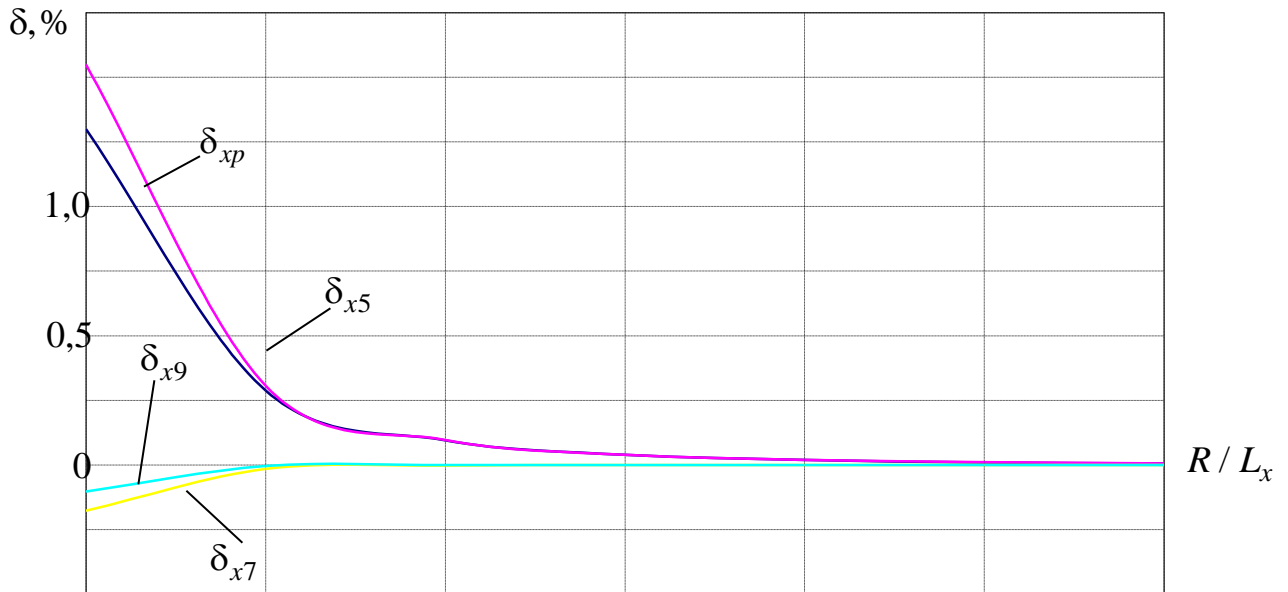


Рисунок 3.10 Мультипольна похибка вимірювання
дипольного магнітного моменту M_x

Аналіз показує, що при вимірюванні дипольного магнітного моменту M_x на відстані $R = (1.5 - 2)L_x$ результуюча мультипольна похибка $\delta_{xp} = (0,381 - 1,154)\%$, а її основні складові – похибки п'ятої, сьомою та дев'ятої гармоніки відповідно дорівнюють $\delta_{x5} = (0,387 - 1,224)\%$, $\delta_{x7} = (0,011 - 0,062)\%$, $\delta_{x9} = (0,002 - 0,016)\%$. В цьому випадку мультипольна похибка дев'ятої гармоніки менше у порівнянні з мультипольними похибками п'ятої та сьомої гармонік у (4-76) разів. Тому результуючу мультипольну похибку можна описати з високою точністю мультипольними похибками п'ятої та сьомої гармонік, оскільки

$$75 \leq (\delta_{x5} + \delta_{x7}) / \sum_{n=9}^{\infty} \delta_{xn} \leq 145.$$

Подання результуючої мультипольної похибки через мультипольні похибки п'ятої та сьомої гармонік істотно спрощує оцінку ефективності каналу X вимірювальної системи та визначення її метрологічних характеристик.

Аналіз показує, що точність вимірювання дипольного магнітного моменту M_x розробленою вимірювальною системою на відстані півтора – два габаритних розмірів джерел ЗМП перевищує в 13-21 раз.

3.5.2 Мультипольна похибка вимірювання дипольного магнітного моменту M_y .

На точність вимірювання дипольного магнітного моменту M_y джерела магнітного поля за координатним напрямком Y оказує істотний вплив мультипольні завади непарних гармонік (3.18), які наводяться завадо несучими просторовими гармоніками ЗМП джерела, що пропорційні $\sin m\varphi$, у вимірювальних колах радіальних котушок $1R...8R$ каналу Y давачів вимірювальної системи та призводять до появи мультипольної похибки. Для визначення значення цієї похибки необхідно визначити мультипольні завади основних перших трьох непарних гармонік $n = 5, 7, 9$ та похибки, що вони утворюють та результуючу мультипольну похибку.

Найбільш вагомою в структурі мультипольних завад непарних гармонік каналу Y вимірювальної системи є мультипольна завада п'ятої гармоніки, значення якої убуває зі збільшенням відстані пропорційно R^{-7}

$$E_{64}^{y5} = \frac{-12R_1^2 M_{y5}}{k_f R_2^2 R^7} = \frac{255\sqrt{2}R_1^2 M_y y_0^4}{4k_f R_2^2 R^7}, \quad (3.44)$$

де M_{y5} – результуючий магнітний момент мультипольної завади п'ятої гармоніки за координатними напрямком Y , що дорівнює сумі коефіцієнтів h_{5m} елементарних мультиполів $m = 1...5$ цієї гармоніки

$$M_{y5} = 4 \sum_{m=1}^5 h_{5m} \cos m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_5^m(\theta = 90^\circ).$$

Результуючий магнітний момент M_{y5} гармоніки $n = 5$, що виражений коефіцієнтами мультиполів непарного порядку $m = 1, 3, 5$, оскільки коефіцієнти елементарних мультиполів парних гармонік $m = 2, 4, 6$ цієї гармоніки дорівнюють нулю, визначаються виразом

$$M_{y5} = 30\sqrt{2} \left(\frac{1}{8} h_{51} - \frac{7}{2} h_{53} - 63 h_{55} \right) = \frac{-85\sqrt{2}}{16} M_y y_0^4, \quad (3.32)$$

де $h_{5m} (m = 1, 3, 5)$ – коефіцієнти, що дорівнюють магнітним моментам елементарних мультиполів непарного порядку $m = 1, 3, 5$ п'ятої просторової гармоніки, значення яких для вимірюваного ексцентричного дипольного моменту $M_y (y_0, 0, 0)$ за координатним напрямком Y будуть дорівнювати

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

При вимірюванні дипольного магнітного моменту M_y джерела магнітного поля за напрямком Y прийнятої системи координат вимірювальною системою виникає складова мультипольної похибки п'ятого порядку, обумовлена мультипольною завадою п'ятої гармоніки E_{y5} (3.44), яка подається виразом у вигляді залежності від відстані R , що пов'язана з габаритним розміром L_y джерела ЗМП

$$\delta_{y5} = \frac{E_{y5}}{E_{y1}} = \frac{255 R_1^2}{32 R_2^2} \left(\frac{k_y}{R/L_y} \right)^4,$$

де E_{y1} – корисний сигнал каналу Y вимірювальної системи, що створений секторіальною гармонікою дипольної складової магнітного поля, значення якого змінюється в залежності від кутової координати φ за законом $\sin \varphi$;

$$k_y = \frac{y_0}{L_y} \leq \frac{1}{2} \text{ – коефіцієнт ексцентричності вимірюваного дипольного момен-}$$

ту M_y ;

L_y – габаритний розмір джерела ЗМП за координатним напрямком Y .

Наступною менш вагомою за вкладом в структурі мультипольних завад непарних гармонік каналу Y (3.18) у порівнянні із завадою п'ятої гармоніки є мультипольна завада сьомої гармоніки, рівень якої за параметром R менше у R^2 разів та визначається відповідним виразом

$$E_{y7} = -\frac{16R_1^4(1 + R_1^2/R_1^2)M_{y7}}{k_f R_2^4 R^9} = -\frac{161\sqrt{2}R_1^4(1 + R_1^2/R_1^2)}{4k_f R_2^4 R^9} M_y y_0^6, \quad (3.47)$$

де M_{y7} – результуючий магнітний момент елементарних мультиполів сьомої гармоніки, що дорівнюють сумі коефіцієнтів h_{7m} елементарних мультиполів порядку $m = 1 \dots 7$ гармоніки $n = 7$

66

$$M_{y7} = 4 \sum_{m=1}^7 h_{7m} \cos m 45^\circ \sin^3 m 90^\circ P_7^m(\theta = 90^\circ). \quad (3.48)$$

Значення результуючого магнітного моменту M_{y7} мультипольної завади сьомої гармоніки, що подане через коефіцієнти елементарних мультиполів непарного порядку $m = 1, 3, 5, 7$, буде дорівнювати

$$M_{y7} = 70\sqrt{2} \left(-\frac{1}{16} h_{71} + \frac{27}{8} h_{73} + \frac{297}{2} h_{75} - 3861 g_{77} \right) = \frac{161\sqrt{2}}{64} M_y y_0^6,$$

де h_{7m} ($m = 1, 3, 5, 7$) – коефіцієнти елементарних мультиполів завади сьомої просторової гармоніки, що дорівнюють магнітним моментам елементарних мультиполів тесеральних ($m = 1, 3, 5$) та секторіальної гармоніки ($m = 7$) сьомого порядку, що створюються за рахунок ексцентричності дипольного моменту M_y на координату y_0 відносно початку прийнятої системи координат:

$$h_{71} = \frac{-35}{64} M_y y_0^6, \quad h_{73} = -\frac{7}{640} M_y y_0^6,$$

$$h_{75} = \frac{-7}{23040} M_y y_0^6, \quad h_{77} = -\frac{1}{46080} M_y y_0^6.$$

За рахунок наявності завади сьомої гармоніки E_{y7} (3.47) в структурі вимірюваного результуючого сигналу каналу Y (3.18) утворюється при вимірюванні дипольного магнітного моменту M_y джерела поля мультипольна похибка сьомого порядку, що дорівнює

$$\delta_{y7} = \frac{E_{y7}}{E_{y1}} = -\frac{161 R_1^4 (1 + R_2^2 / R_1^2)}{32 R_2^4} \left(\frac{k_y}{R / L_y} \right)^4. \quad (3.50)$$

Наступна мультипольна завада дев'ятої гармоніки за рівнем значно менше завади п'ятої гармоніки та сьомої гармоніки, тому що вона має найбільший ступінь спадання з відстанню у порівнянні з ними. Рівень мультипольної завади дев'ятої гармоніки визначається виразом

$$E_{y^9} = -\frac{20R_1^6(R_2^6/R_1^6 - 1)M_{y^9}}{k_f R_2^6 R^{11}(R_2^2/R_1^2 - 1)} = -\frac{37215\sqrt{2}R_1^6(R_2^6/R_1^6 - 1)}{256R_2^6 R^{11}(R_2^2/R_1^2 - 1)}M_{y^9}y_0^8, \quad (3.51)$$

де M_{y^9} – результуючий магнітний момент дев'ятої гармоніки за координатним напрямком Y , значення якого описується гармонійним рядом у вигляді суми магнітних моментів елементарних мультиполів порядку $m = 1 \dots 9$ завади гармоніки $n = 9$, що дорівнюють коефіцієнтам h_{9m}

$$M_{y^9} = 4 \sum_{m=1}^9 h_{9m} \cos m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_9^m(\theta = 90^\circ). \quad (3.52)$$

Згідно (3.52) магнітні моменти елементарних мультиполів парного порядку $m = 2, 4, 6, 8$ для гармоніки $n = 9$ дорівнюють нулю. Тому результуючий магнітний момент M_{y^9} буде дорівнювати сумі магнітних моментів елементарних мультиполів непарного порядку $m = 1, 3, 5, 7, 9$, що виражені через коефіцієнти h_{9m} в наступному вигляді

$$\begin{aligned} M_{y^9} &= 630\sqrt{2} \left(\frac{1}{68128} h_{91} - \frac{11}{16} h_{93} - \frac{429}{8} h_{95} + \frac{6435}{2} h_{97} + 109395 h_{99} \right) = \\ &= \frac{7443\sqrt{2}}{1024} M_{y^9} y_0^8, \end{aligned}$$

де h_{9m} ($n = 1, 3, 5, 7, 9$) – коефіцієнти дев'ятої гармоніки, що дорівнюють магнітним моментам елементарних мультиполів непарного порядку m , значення яких знаходяться через параметри ексцентричного дипольного магнітного моменту M_y :

$$h_{91} = \frac{63}{128} M_y y_0^8, \quad h_{93} = \frac{3}{512} M_y y_0^8, \quad h_{95} = \frac{39}{465920} M_y y_0^8,$$

$$h_{97} = -\frac{1}{573440} M_y y_0^8, \quad h_{99} = \frac{1}{10321920} M_y y_0^8.$$

Наявність в структурі вимірюваного сигналу Y (3.18) мультипольної завади дев'ятої гармоніки E_{y9} (3.51) призводить при вимірюванні дипольного магнітного моменту M_y до появи складової мультипольної похибки дев'ятого порядку

$$\delta_{y9} = \frac{E_{y9}}{E_{y1}} = -\frac{37215 R_1^6 (R_2^6 / R_1^6 - 1)}{2048 R_2^6 (R_2^2 / R_1^2 - 1)} \left(\frac{k_y}{R / L_y} \right)^8.$$

Для визначення результуючої мультипольної похибки вимірювання ексцентричного дипольного моменту $M_y(0, y_0, 0)$ джерела магнітного поля вимірювальною системою скористаємося класичним методом, згідно якого радіальна компонента напруженості магнітного поля дипольного магнітного моменту M_y , зміщеного на координату y_0 відносно початку прийнятої системи координат, описується в екваторіальній площині, де розташовані котушки давачів вимірювальної системи, виразом

$$H_R = \frac{M_y}{8\pi} \frac{-7Ry_0 + 4(R^2 + y_0^2) \sin \varphi + Ry_0 \cos 2\varphi}{(R^2 - 2Ry_0 \sin \varphi + y_0^2)^{5/2}}. \quad (3.53)$$

На магнітні вісі радіальних котушок $1R \dots 4R$ та $5R \dots 8R$ давачів вимірювальної системи, що розташовані на колах радіусів R_1, R_2 та з'єднаних за схемою рис. 3.4, діє радіальна компонента напруженості магнітного поля H_R (3.53) та наводить в колах цих котушок каналу Y електричні сигнали, діючі значення яких описується наступним виразом:

для радіальних котушок $1R, 2R, 5R, 6R$ в точках з координатами

$$\varphi = 45^\circ, 135^\circ \text{ та } R = R_{1(2)}, \theta = 90^\circ$$

$$E_{1(5)} = E_{2(6)} = \frac{1}{k_f} H_{1(5)R} = \frac{1}{k_f} H_{2(6)R} = \frac{M_y}{2k_f} \cdot \frac{-7R_{1(2)}y_0 + 2\sqrt{2}(R_{1(2)}^2 + y_0^2)}{(R_{1(2)}^2 - \sqrt{2}R_{1(2)}y_0 + y_0^2)^{5/2}}; \quad (3.54)$$

для радіальних котушок $3R, 4R, 7R, 8R$ в точках з координатами

$$\varphi = 225^\circ, 315^\circ \text{ та } R = R_{1(2)}, \theta = 90^\circ$$

$$E_{3(7)} = E_{4(8)} = \frac{1}{k_f} H_{3(7)R} = \frac{1}{k_f} H_{4(8)R} = -\frac{M_y}{2k_f} \cdot \frac{7R_{1(2)}y_0 + 2\sqrt{2}(R_{1(2)}^2 + y_0^2)}{(R_{1(2)}^2 + \sqrt{2}R_{1(2)}y_0 + y_0^2)^{5/2}}; \quad (3.55)$$

На основі виразів (3.54), (3.55) визначимо наведені електричні сигнали у вимірювальних колах радіальних котушок $1R...4R$ та $5R...8R$ давачів, з'єднаних за схемою рис. 3.4:

$$E_{yp}(R_1) = \frac{1}{k_f} (H_{1R} + H_{2R} - H_{3R} - H_{4R}) = \frac{M_y}{k_f R^3} A_y, \quad (3.56)$$

$$E_{yp}(R_2) = \frac{1}{k_f} (H_{5R} + H_{6R} - H_{7R} - H_{8R}) = \frac{M_y}{k_f R^3} B_y, \quad (3.57)$$

де A_y, B_y – коефіцієнти, значення яких обчислюються при заданому k_f ,

R_2 / R_1 та $R / L_y = \text{var}$ за наступними формулами:

$$A_y = \frac{R^3}{L_y^3} \left[\frac{-7k_y \cdot R / L_y + 2\sqrt{2}(R^2 / L_y^2 + k_y^2)}{(R^2 / L_y^2 - \sqrt{2}k_y \cdot R / L_y + k_y^2)^{5/2}} + \frac{7k_y \cdot R / L_y + 2\sqrt{2}(R^2 / L_y^2 + k_y^2)}{(R^2 / L_y^2 + \sqrt{2}k_y \cdot R / L_y + k_y^2)^{5/2}} \right];$$

$$B_y = \frac{R^3}{L_y^3} \left[\frac{-7k_y \cdot R / L_y \cdot R_2 / R_1 + 2\sqrt{2}(R^2 / L_y^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 + k_y^2)}{(R_2^2 / L_y^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 - \sqrt{2}k_y \cdot R / L_y \cdot R_2 / R_1 + k_y^2)^{5/2}} + \frac{7k_y \cdot R / L_y \cdot R_2 / R_1 + 2\sqrt{2}(R^2 / L_y^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 + k_y^2)}{(R^2 / L_y^2 \cdot R_2^2 / R_1^2 + \sqrt{2}k_y \cdot R / L_y \cdot R_2 / R_1 + k_y^2)^{5/2}} \right].$$

За знайденими значеннями сигналів $E_{yp}(R_1)$ та $E_{yp}(R_2)$, описаних виразами (3.56) та (3.57), визначимо результуючий сигнал каналу Y вимірювальної системи

$$E_{yp} = \frac{2}{R_2^2 / R_1^2 - 1} \left[\frac{R_2^5}{R_1^5} E_{yp}(R_2) - E_{yp}(R_1) \right] = \frac{2M_y}{k_f R^3} \frac{B_y \cdot R_2^5 / R_1^5 - A_y}{4\sqrt{2}(R_2^2 / R_1^2 - 1)}.$$

Тоді результуюча мультипольна похибка вимірювання дипольного магнітного моменту M_y джерела ЗМП за координатним напрямком Y, буде дорівнювати

$$\delta_{yp} = \frac{E_{yp} - E_{y1}}{E_{y1}} = \frac{B_y \cdot R_2^5 / R_1^5 - A_y}{4\sqrt{2}(R_2^2 / R_1^2 - 1)} - 1. \quad (3.58)$$

71

Складові результуючої мультипольної похибки δ_{yp} (3.58) в загальному випадку, коли порядок завад просторових гармонік $n \rightarrow \infty$ в структурі ЗМП джерела, описуються гармонійним рядом наступного виду

$$\delta_y = \frac{1}{2\sqrt{2} h_{11}} \sum_{n=5}^{\infty} \frac{1(-1)^n (R_2 / R_1)^{3-n}}{R^{n-1} (R_2^2 / R_1^2) - 1} (n+1) \cdot \sum_{m=1}^n h_{nm} \cos m45^\circ \sin^3 m90^\circ P_n^m(\theta = 90^\circ).$$

На рис. 3.10 побудовано графічні залежності результуючої мультипольної похибки $\delta_{yp} = f(R / L_y)$ при значенні $R_2 / R_1 = \sqrt[3]{2}$, $k_f = 1/3$ та її основні складові $\delta_{yn} = f(R / L_y)$ для непарних гармонік $n = 5, 7, 9$.

4 РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ МАГНІТОМЕТРА

Метою розділа 4 є удосконалення метрологічного забезпечення вимірювання магнітних величин шляхом розробки методики калібрування магнітометра. Методи дослідження – методи статистичного аналізу вимірювальної інформації, методи теорії невизначеностей. Об'єктом дослідження є невизначеність калібрувань магнітометрів.

Існує об'єктивна потреба в оцінці впливу магнітного поля джерела (електрообладнання, морський корабель, космічний супутник) на пристрої, об'єкти мікроелектроніки, прилади. Крім того, від рівня магнітного поля залежить безпека життя людини.

Для вирішення окремих задач магнітометрії на основі комбінованої дипольної моделі [1] і принципу побудови вимірювальної системи [2] розроблено точковий метод вимірювання. Для реалізації цього методу запропоновано вимірювальний засіб – багатофункціональний цифровий магнітометр. Багатофункціональний цифровий магнітометр призначений для вимірювання декількох магнітних величин. Це напруженість магнітного поля, магнітний момент, просторова конфігурація поля. Галузі застосування багатофункціонального магнітометра: авіакосмічна промисловість, суднобудування, геофізика, космічні дослідження, проектування та експлуатація електрообладнання.

Калібрування засобів вимірювальної техніки проводиться з метою встановлення придатності засобів вимірювальної техніки до використання. Калібрування засобів вимірювальної техніки проводиться метрологічними службами організацій. Калібрування проводиться метрологічними службами юридичних осіб з використанням еталонів, переданих державним еталонам одиниць величин. Результати Калібрування засобів вимірювальної техніки засвідчуються повірочним тавром, свідоцтвом і записом в експлуатаційних документах. Розробка програми калібрування магнітометра здійснюється згідно з нормативним документом ДСТУ

OIMLD 20:2008.

На рисунку 4.1 представлена схема з'єднання СІТ і керуючої ЕВМ для реалізації автоматизованої поверки. При автоматизації калібрування розробленого СІТ або ИК ІС:

- використовується градуований індукційний преобразователь, ідентифікований застосовуваним в системі, який використовується в якості зразкового і підключається до цифрового вольтметра.

- використовується джерело зразкового поля або гармоніки n -го порядку, що представляє собою сукупність спеціальних індукційних катушок, запитуваних змінним током заданої частоти.



Рисунок 4.1. – Схема автоматизованого калібрування магнітометра

Для розробки методики розрахунку невизначеності під час калібрування магнітометра та встановлення придатності приладу використано рекомендації [3-5].

Для розробки методології розрахунку невизначеності під час калібрування магнітометра та встановлення придатності пристрою було проведено багаторазове спостереження $n=70$ магнітних моментів.

Проведено обробку результатів повторних спостережень. Визначено стандартну невизначеність за типом А, В та загальну стандартну невизначеність. Невизначеність типу В розраховувалась як стандартна невизначеність величини впливу через систематичні джерела.

Аналіз невизначеності вимірювання (бюджет невизначеності) містить перелік входних значень, їх оцінки зі стандартними невизначеністю вимірювання, закони їх розподілу та кількість ступенів свободи. Було складено бюджет невизначеності вимірювань при калібруваннях магнітометру (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Бюджет невизначеності вимірювання магнітного моменту M , $A \cdot m^2$.

Input value, X_i	Estimation of the input value x_i	Type of uncertainty	The number of degrees of freedom	Sensitivity coefficient . $c_i = dy/dx_i$	Probability distribution	Total uncertainty , $u_i(y)$
Random component	$M_1=1.221$	A	n-1	1	Normal distribution	$u_A =$ 0.263
Uncertainty of measurement of reference measures of the magnetic field	$\Delta_s=0.025$	B	∞	1	Uniform distribution	$u(\Delta_s)=$ 0.025
Deviation of the size of reference measures from the nominal value	$\Delta_n=0.4$	B	∞	1	Uniform distribution	$u(\Delta_n)=$ 0.289
Difference between the excess air temperature and the normal one	$\Delta_t=0.2$	B	∞	1	Uniform distribution	$u(\Delta_t)=$ 0.200
Magnetometer reading resolution	0.01	B	∞	1	Uniform distribution	$u(\Delta^*)=$ 0.005
M	1.200	0.439	-	2	$P=0.95$	0.879

ВИСНОВКИ

В рамках кваліфікаційної роботи вдосконалено метрологічне забезпечення магнітних вимірювань шляхом створення ефективних методів та засобів вимірювання параметрів ЗМП технічних об'єктів (вимірювання магнітних моментів), котрі забезпечує підвищення точності вимірювання параметрів магнітного поля – магнітний момент, напруженість та конфігурація поля, що характеризують джерело поля у низькочастотній області.

1. Запропонована модель зовнішнього магнітного поля джерела, що є основою для створення методів та вимірювальних систем з так званим точковим розташуванням первинних вимірювальних перетворювачів, призначених для опосередкованого вимірювання величин компонент дипольних магнітних моментів, а так само магнітних моментів n -го порядку. Запропонована модель зовнішнього магнітного поля враховує геометричні властивості та габаритні розміри джерела зовнішнього магнітного поля; забезпечує можливість розрахунку параметрів поля в будь-якій точці простору.

2. Розроблено на основі мультипольної теорії подання ЗМП точковий метод вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП. Оцінено методичну похибку вимірювання розробленого методу для компонент магнітного моменту M_x, M_y, M_z ($\delta=0,387-1,278$ %). Точність вимірювання дипольних моментів на відстані двох габаритних розмірів джерела зовнішнього магнітного поля підвищується на порядок у порівнянні із стандартним методом при одночасному підвищенні чутливості вимірювальних каналів до корисного сигналу у 2 рази та співвідношення корисного сигналу до зовнішньої електромагнітної завади в 15 разів.

3. Розроблено вимірювальну систему для вимірювання дипольних магнітних моментів джерел ЗМП, яка включає в себе систему давачів, розташованих у екваторіальній площині на двох колах заданих радіусів, та спеціального блоку,

який виключає з результатів вимірювання мультипольну заваду третьої гармоніки, що дає можливість проводити вимірювання дипольних моментів з більш високою точністю.

Одержані результати знаходять застосування при створенні випробувального обладнання, призначеного для контролю нормованих параметрів магнітного поля технічних засобів до яких ставлять вимоги по зниженню рівня їх магнітного поля.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дегтярьов О.В. Тривимірний магнітометричний метод вимірювання параметрів та просторової конфігурації зовнішнього магнітного поля джерела // Технічні науки: Міжнародний Науковий Інститут «Educatio», 2015. – №10 (III). - С. 12-16.
2. Альохін В.П. Тривимірний скалярний магнітний потенціал // Изв. вишів. Електромеханіки. - 1971. - №4. - С. 419-422.
3. Аналіз розподілу дипольної складової зовнішнього магнітного поля змінних струмів / Дегтярьов В.В.; Харків. держ. техн. ун-т радіоелектроніки - Харків, 1997. - 8 с. - Рус. - Деп. в УкрІНТЕІ 26.02.97, №216 - Уі 97 // Анот. у ж. Експрес - новини: наука, техніка, виробництво, № 9-10, 1997.
4. Байда Є.І. До питання можливості розрахунку електромагнітних полів в електричних апаратах з допомогою магнітного моменту // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». - Х., 2005. - № 48. - С. 3-10.
5. Боев В.М. Експериментальне визначення розподілу полів розсіювання електрообладнання в навколишньому просторі // Изв. вишів. Енергетика. - 1981. - №6. - С. 32-37.
6. Бухгольц Г. Розрахунок електричних та магнітних полів: Пер. з нем. - М.: Вид. іностр. літ., 1961. - 712 с.
7. Берк Г.Ю. Довідковий посібник із магнітних явищ: Пер. з англ. - М.: Вища школа, 1991. - 384 с.
8. Володимиров В.І., Лікарів А.Л., Єлізаров Ф.В. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів і систем. - М.: Радіо та зв'язок, 1985. - 271 с.
9. ECSS-E-HB-20-07A "Space engineering: Electromagnetic compatibility handbook" ESA-ESTEC. – Noord-wijk. The Netherlands: Requirements & Standards Division. 2012. – 228 p.
10. Buschow K.J.H., de Boer F.R. Physics of Magnetism and Magnetic Materials, 2004. - p. 182.

11. IEC 60404-14 Ed. 1.0 b: 2002. Part 14: Methods of measurement of the magnetic dipole moment of a ferromagnetic material specimen by the withdrawal or rotation method. - 17p.
12. Kochnev V.A., Goz I.V., 2003. The technology of forward and inverse modeling for 3D and 2D magnetic data // Exp. Abstr. of International Geophysical Conference & Exhibition, Moscow. – M., 2003. - P. 64-67.
13. Holmes J.J. Theoretical development of laboratory techniques for magnetic measurement of large objects // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol.37. - Jfe 5. – Pp. 3790-3797.
14. Korepanov V., Dudkin F., Berkman R. Detection of VLF electromagnetic radiation of electronic equipment in every day use // Proceedings of the 6th international Symposium “Metrology for Quality Control in Production”, september 4-10, 1998. - Vienna, 1998. - P. 506-515.
15. V. S. Lupikov, “Teoreticheskoe obosnovanie obiedinnoi dipol’noi modeli vneshnego magnitnogo polia elektrooborudovaniia,” Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, vol. 17, pp. 95-102.
16. T. Charubin, M. Nowicki, R. Szewczyk, “Measurement System for Magnetic Field Sensors Testing with Earth’s Magnetic Field Compensation,” Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer International Publishing, pp. 613-618.
17. Estimating Uncertainties in Testing: Measurement Good Practice Guide No. 36. - British Measurement and Testing Association. 2003. 39 p.
18. I. P. Zakharov, S. V. Vodotyka, , K. A. Klimova, N. S. Shevchenko, “Some examples of the evaluation of measurement uncertainty,” Measurement Techniques, vol. 56, pp. 591-598, 2013.