

## ДВЕНАДЦАТИТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД И ТРЁХМОДУЛЬНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Дегтярёв А.В., аспирант

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, кафедра метрологии и измерительной техники

тел. (057) 702-13-31, факс (057) 702-13-31, e-mail: degt@kture.kharkov.ua

*Запропановано метод та систему вимірювання магнітних моментів технічних об'єктів. Розроблено алгоритм для виключення впливу мультипольних завад просторових гармонік магнітного поля на результаті вимірювання. Отримано математичну модель вимірюемого сигналу. Оцінено методичну похибку.*

*Предложен метод и система измерения магнитных моментов технических объектов. Разработан алгоритм для исключения влияния наиболее весомых мультипольных помех пространственных гармоник магнитного поля на результаты измерения. Получена математическая модель измеряемого сигнала. Оценена методическая погрешность*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время область применения магнитных измерений интенсивно расширяется. Во многих отраслях науки, техники, промышленности (авиакосмическая промышленность, судостроение, геофизика, космические исследования, проектирование и эксплуатация электрооборудования) необходимо располагать информацией о параметрах внешнего магнитного поля (ВМП) в определённых точках окружающего пространства. Такие задачи возникают при необходимости оценить влияние ВМП источника (электрооборудования, корабля, спутника) на магниточувствительных устройства, объекты микромагнитоэлектроники, магнитометрические приборы. Кроме того, уровень ВМП определяет безопасность жизнедеятельности человека [1, 2].

Одной из важных составляющих решения проблем электромагнитной совместимости, магнитной экологии, навигации, магнитной защиты судов является создание высокоточных методов, устройств и систем измерения регламентированных магнитных параметров источников ВМП. Согласно действующим нормативным документам [3] регламентированными магнитными параметрами для источников ВМП являются величины их дипольных магнитных моментов (ДММ), которые являются постоянными величинами, независимыми от координат точек наблюдения. Это позволяет по известным значениям ДММ источника поля аналитически оценить уровень напряженности ВМП в заданных зонах внешнего пространства.

Известные методы и измерительные системы имеют недостатки по точности измерения, количеству измеряемых компонент ДММ и др. Поэтому исследования, направленные на создание высокоточных магнитометрических методов и средств измерения являются актуальными и решают важную проблему, которая имеет научное и практическое значение.

Цель настоящей работы - создание совокупности эффективного метода и средства измерения магнитных параметров источников ВМП, которые обеспечивают повышение достоверности результатов контроля электромагнитной обстановки в заданных зонах промышленных, энергетических и других объектов, не-

обходимых для решения ряда практических задач по электромагнитной совместимости и магнитной экологии. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: получить аналитическое описание ВМП источника, разработать метод измерения ДММ и реализующую его измерительную систему; создать алгоритм по исключению влияния наиболее весомых мультипольных помех на результаты измерения, получить математическую модель структуры измеряемого сигнала и оценить методическую погрешность.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Точность контроля параметров магнитного поля объекта определяется характером источника поля, выбором точек наблюдения, степенью соответствия предложенной математической модели магнитного поля реальному ВМП. Кроме того, задача контроля параметров ВМП осложняется наличием нестационарных помех внешних источников.

Исследования показали, что оптимальное решение задач контроля напряженности поля и магнитных моментов  $n$ -го порядка достигается применением для описания постоянных и квазипеременных ВМП мультипольной теории поля. В соответствии с данной теорией математическая модель ВМП источника для области внешнего пространства представляется полем эквивалентного эксцентричного магнитного диполя в виде потенциального ряда, постоянные коэффициенты которого равны мультипольным магнитным моментам - диполю, квадруполью, октуполью и т.д., расположенным в центре принятой системы координат, связанной с источником поля [4]. Развитие мультипольной концепции привело к созданию точечных методов и средств измерения для пространственного гармонического анализа магнитного поля источника.

В соответствии с мультипольной моделью скалярный магнитный потенциал источника магнитного поля для области внешнего пространства, где плотность тока равна нулю и  $\text{rot}H = 0$ , можно аналитически описать сферическим гармоническим рядом в виде суммы мультиполей дипольной, квадрупольной, октупольной и т.д. составляющих магнитного поля

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

где  $R, \varphi, \theta$  - сферические координаты точки наблюдения;  $g_{nm}, h_{nm}$  - постоянные коэффициенты гармонического ряда, равные мультипольным магнитным моментам;  $P_n^m(\cos\theta)$  - присоединённые полиномы Лежандра первого рода.

Анализ ряда (1) показывает, что магнитное поле источника имеет сложный пространственно-гармонический характер. Поэтому задача измерения коэффициентов  $g_{10}, g_{11}, h_{11}$ , равных ДММ  $M_x, M_y, M_z$  источника поля, сводится к избирательному их выделению из полного спектра мультиполей ВМП.

Рассмотрим двенадцатичеточный метод измерения ДММ, на примере измерения осевого ДММ  $M_z$ . Метод реализуется измерительной системой (ИС). Для обеспечения требуемой точности измерения ДММ предложен модульный принцип построения ИС, который предполагает применение трёх групп идентичных датчиков - модулей, расположенных вокруг исследуемого источника ВМП в экваториальной плоскости на трёх окружностях заданных радиусов  $R_1, R_2, R_3$  в точках со значением угловой координаты  $\varphi_i = (i-1)90^\circ, \varphi_k = (k-1)90^\circ, \varphi_p = (p-1)90^\circ$ , где  $i = 1...4, k = 5...8, p = 9...12$  - номера датчиков первого, второго и третьего измерительных модулей. Магнитные оси катушек трёхмодульной системы датчиков ориентированы параллельно полярной оси принятой системы координат и измеряемому ДММ источника ВМП.

При измерении осевого ДММ на магнитные оси катушек датчиков 1...12 воздействует осевая компонента напряженности магнитного поля источника, которая описывается гармоническим рядом

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

Для удобства анализа запишем выражение (2) в развёрнутом виде, ограничившись гармоникой  $n = 5$ :

$$H_\theta(\theta = 90^\circ) = \frac{1}{4\pi R^3} g_{10} + \frac{1}{4\pi R^4} 3(g_{21} \cos \varphi + h_{21} \sin \varphi) + \frac{1}{4\pi R^5} \left[ -\frac{3}{2} g_{30} + 15(g_{32} \cos 2\varphi + h_{32} \sin 2\varphi) \right] + \frac{1}{4\pi R^6} \left[ -\frac{1}{2} (g_{41} \cos \varphi + h_{41} \sin \varphi) + 7(g_{43} \cos 3\varphi + h_{43} \sin 3\varphi) \right] + \frac{1}{4\pi R^7} \left[ \frac{1}{8} g_{50} - \frac{7}{2} (g_{52} \cos 2\varphi + h_{52} \sin 2\varphi) + 63(g_{54} \cos 4\varphi + h_{54} \sin 4\varphi) \right] + \dots \quad (3)$$

Согласно выражению (3) зональная гармоника первого порядка дипольной составляющей магнитного поля ( $n = 1, m = 0$ ) пропорциональна коэффициенту

ту  $g_{10}$ , равному осевому ДММ  $M_z$ . Поэтому пространственные гармоники высшего порядка ( $n \geq 2$ ) являются помехонесущими и вносят существенную погрешность в результат измерения  $M_z$ .

Под воздействием осевой компоненты напряженности магнитного поля  $H_\theta$  (2) в измерительных цепях последовательно соединённых катушек 1z...4z, 5z...8z и 9z...12z трёхмодульной системы датчиков наводятся электрические сигналы, действующие значения которых определяются выражениями

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

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

$$E(R_3) = -\frac{1}{2k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1-(-1)^n}{R_3^{n+2}} M_{zn}, \quad (4)$$

где  $k_f$  - постоянная катушек датчиков;  $M_{zn}$  - результирующий магнитный момент элементарных мультиполей  $n$ -ой гармоники ВМП источника:

$$M_{zn} = 4 \sum_{m=0}^n g_{nm} \cos^2 m45^\circ \cos^2 m90^\circ \partial P_n^m(\theta = 90^\circ) / \partial \theta. \quad (5)$$

Структура сигналов  $E(R_1), E(R_2)$  и  $E(R_3)$  состоит из полезных сигналов зональной гармоники первого порядка и мультипольных помех нечётных гармоник ( $n=3,5,7,\dots$ ). При этом мультипольные помехи чётных гармоник в измерительных цепях равны нулю, так как за счёт оптимального расположения осевых катушек трёхмодульной системы датчиков и соответствующей их коммутации они компенсируют друг друга. Для исключения из структуры сигналов (4) наиболее весомых мультипольных помех третьей и пятой гармоник запишем уравнения (4) в виде матрицы

$$\begin{pmatrix} R_1^{-3} & R_1^{-5} & R_1^{-7} & \dots & E(R_1) \\ R_2^{-3} & R_2^{-5} & R_2^{-7} & \dots & E(R_2) \\ R_3^{-3} & R_3^{-5} & R_3^{-7} & \dots & E(R_3) \end{pmatrix} \quad (6)$$

и решим её относительно третьей и пятой гармоник

$$\begin{pmatrix} 2R_1^{-3} & 0 & 0 & \dots & E_I \\ 0 & (1-k_1^{-2/3})R_2^{-5} & (1-k_1^{-4/3})R_2^{-7} & \dots & E_{II} \\ 0 & 0 & (k_1^{2/3}-k_1^{-2/3})(k_1^{-2/3}-k_2^{2/3})R_3^{-7} & \dots & E_{III} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $k_1 = R_2^6 / R_1^6, k_2 = R_3^3 / R_1^3$  исходя из условия  $R_2^2 / R_1^2 = R_3 / R_1$ .

В итоге получаем алгоритм определения результирующего сигнала, в котором мультипольные помехи третьей и пятой гармоники равны нулю.

$$E = \frac{2}{(k_2^{1/3}-1)(k_2^{2/3}-1)} \times [E(R_1) - k_2^{5/6}(1+k_2^{1/3})E(R_2) + k_2^2 E(R_3)]. \quad (8)$$

Запишем выражение (8) исходя из значений сигналов (4) и значения  $R = R_1, R_2 = R_1 k_1^{1/3}, R_3 = R_1 k_2^{1/3}$  в виде гармонического ряда

$$E = -\frac{1}{k_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1-(-1)^n}{R^{n+2}} M_{zn} \times \frac{1-k_2^{(n-3)/6}}{k_2^{(n-3)/6}(k_2^{1/3}-1)} \left[ 1 - \frac{k_2^{(n-1)/6}-1}{k_2^{(n-5)/6}(k_2^{2/3}-1)} \right]. \quad (9)$$

Измеряемый сигнал, как следует из (9), состоит из полезного сигнала  $E_1$ , создаваемого зональной гармоникой дипольной составляющей ВМП, и мультипольных помех нечётных гармоник, начиная с  $n = 7$ .

Подставим в (9) значение магнитного момента (5) и для удобства анализа запишем результирующий сигнал гармоническим рядом в виде полезного сигнала и суммы мультипольных помех нечётных гармоник, начиная с седьмой гармоники

$$E = \frac{8g_{10}}{k_f R^3} - \frac{4}{k_f} \sum_{m=7}^{\infty} \frac{1-(-1)^m}{R^{m+2}} \frac{1-(R_3/R_1)^{(m-3)/2}}{(R_3/R_1)^{(m-3)/2}(R_3/R_1-1)} \times \left\{ 1 - \frac{(R_3/R_1)^{(m-1)/2}-1}{(R_3/R_1)^{(m-5)/2}[(R_3/R_1)^2-1]} \right\} \times \sum_{m=0}^n g_{nm} \cos^2 m45^\circ \cos^2 m90^\circ \partial P_n^m(\theta=90^\circ)/\partial\theta. \quad (10)$$

Практическая реализация алгоритма (8) по исключению мультипольных помех гармоник  $n=3,5$  из структуры результирующего сигнала осуществляется трёхмодульной ИС, структурная схема которой изображена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: 1,2,3 - модули датчиков; 4 - коммутирующее устройство; 5 - переключатель измерительных каналов; 6, 7, 9 - усилители; 8, 11 - сумматоры; 10 - компенсатор внешней помехи; 12 - измерительный прибор.

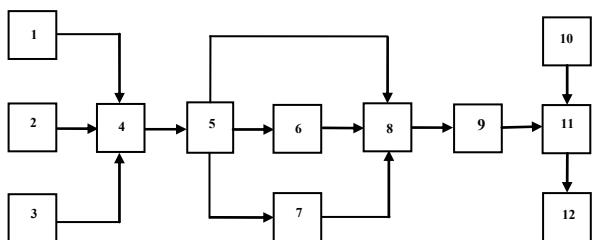


Рис. 1. Структурная схема трёхмодульной измерительной системы

Таким образом, трёхмодульная ИС обеспечивает, как следует из (10), отстройку от мультипольных помех чётных гармоник, а также от наиболее весомых мультипольных помех третьей и пятой гармоник. В этом случае ДММ определяется по данным измерения  $E$  (10) выражением

$$M_z = g_{10} = Ek_f R^3 / 8. \quad (11)$$

Наличие в измеряемом результирующем сигнале (10) мультипольных помех нечётных гармоник высшего порядка ( $n \geq 7$ ) обуславливает появление мультипольной составляющей методической погрешности измерения осевого ДММ. Значение результирующей мультипольной составляющей методической погрешности описывается следующим выражением:

$$\delta = \frac{E-E_1}{E_1} = -\frac{1}{2g_{10}} \sum_{n=7}^{\infty} \frac{1-(-1)^n}{R^{n-1}} \times \frac{(R_3/R_1)^{4-n} - (R_3/R_1)^{(3-n)/2}}{(R_3/R_1)+1} \frac{1-(R_3/R_1)^{(n-3)/2}}{(R_3/R_1-1)^2} \times \sum_{m=0}^n g_{nm} \cos^2 m45^\circ \cos^2 m90^\circ \partial P_n^m(\theta=90^\circ/\partial\theta). \quad (12)$$

Таким образом, при измерении осевого магнитного момента на расстоянии двух габаритных размеров источника ВМП значение результирующей мультипольной составляющей методической погрешности равно  $8 \cdot 10^{-3} \%$ , что меньше мультипольной составляющей методической погрешности известного восьмиточечного метода ( $\delta_8 = 0,43\%$ ) [5] в 53 раза.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанный двенадцатичеточный метод и реализующая его трёхмодульная ИС обеспечивают высокую точность измерения регламентируемых магнитных параметров вблизи источников ВМП на расстоянии полутора-двух их габаритных размеров.

2. Получены математические модели структуры измеряемого результирующего сигнала, а также мультипольной составляющей методической погрешности измерения ДММ, использование которых существенно упрощает оценку эффективности предложенного двенадцатичеточного метода измерения и реализующей его ИС.

3. Разработанная трёхмодульная измерительная система для пространственного гармонического анализа магнитного поля может быть использована при создании малогабаритных и мобильных магнитометрических испытательных стендов, предназначенных для контроля магнитных параметров электротехнических объектов, к которым предъявляются требования по маломagnitude.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Владимирова В.И., Докторов А.Л., Елизаров Ф.В. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. - М.: Радио и связь, 1985. - 271 с.
- [2] Холодов Ю.А. Мозг в электромагнитных полях. - М.: Наука, 1982. - 123 с.
- [3] ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. Введ. 01.07.93. - М.: Изд-во стандартов, 1993. - 5 с.
- [4] Яновский Б.М. Земной магнетизм. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 592 с.
- [5] Дегтярёв А.В. Двухмодульная система измерения зональной гармоники первого порядка магнитного поля технических объектов // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ'2005) - Том VII - Международная конференция "Метрология и измерительная техника" (МКМИТ'2005). - Харьков. - 2005. - С. 156-159.

Поступила 23.05.2006