

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ЗОНАЛЬНОЙ ГАРМОНИКИ МУЛЬТИПОЛЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

При исследовании электромагнитной совместимости различного рода электротехнического и электронного оборудования часто требуется знать уровень напряженности внешнего магнитного поля (ВМП) источника – технического средства в определенных зонах окружающего пространства [1, 2]. В этой связи метрологическое обеспечение магнитных измерений занимает важную роль в решении прикладных задач по электромагнитной совместимости различных магниточувствительных устройств и систем, находящихся в зоне воздействия ВМП, создаваемого силовым электрооборудованием.

В ряде случаев необходимо располагать данными о значении напряженности магнитного поля на значительных расстояниях от источника поля. На таких расстояниях ВМП источника с достаточной для практики точностью соответствует дипольной модели и определяется компонентами дипольного магнитного момента источника поля. Поэтому нахождение этих компонентов является задачей измерения дипольной составляющей напряженности ВМП электрооборудования [3]. Осуществить прямые измерения напряженности магнитного поля дипольной составляющей на больших расстояниях при наличии сильных внешних электромагнитных помех весьма затруднительно. При размещении датчиков – точечных индукционных преобразователей в непосредственной близости от измеряемого электрооборудования выделение из его ВМП дипольной составляющей усложняется, поскольку мультиполя высших порядков ВМП источника являются помехонесущими относительно измеряемой гармоники первого порядка. Вследствие этого имеет место существенная методическая погрешность измерения дипольного магнитного момента источника поля.

Возрастающие требования к точности контроля напряженности магнитного поля электрооборудования в различных зонах внешнего пространства определяют необходимость разработки методов и средств измерения дипольных магнитных моментов, обеспечивающих отстройку от помехонесущих недипольных гармоник измеряемого ВМП и нестационарных магнитных полей внешних источников.

Проанализируем и дадим оценку методической погрешности шеститочечного метода измерения осевого дипольного магнитного момента источника поля, реализуемого помехозащищенным магнитоизмерительным устройством, схема расположения датчиков которого представлена на рис. 1, где ориентация чувствительных магнитных осей датчиков обозначена стрелками, начало и конец которых соответствует началу и концу обмотки катушек индукционных преобразователей.

Согласно рис.1 (схема размещения датчиков вокруг измеряемого источника ВМП) шесть однокомпонентных датчиков 1–6 магнитоизмерительного устройства разделены на две группы. Осевые датчики 1–4 первой группы расположены в экваториальной плоскости $ХОУ$ на окружности радиуса R в точках с угловой координатой $\varphi_i = 90^\circ(i-1)$, где $i=1-4$, и ориентированы своими магнитными осями параллельно полярной оси Z . Радиальные датчики 5,6 второй группы размещены на оси Z на расстоянии R симметрично относительно центра принятой системы координат, связанной с измеряемым источником ВМП. Чувствительность датчиков 5,6 к напряженности магнитного поля в два раза больше чувствительности датчиков 1-4. По измеряемому магнитному полю дипольной постоянной составляющей, пропорциональной осевому дипольному моменту, катушки датчиков 1-6 соединены последовательно согласно, а по магнитному полю внешней помехи катушки датчиков 1-4 и 5,6 включены встречно.

При изменении осевого дипольного момента в датчиках 1-4 и 5,6 помехонесущим магнитным полем внешних источников наводятся противофазные сигналы помех, которые

значительно компенсируют друг друга, поскольку чувствительность радиальных датчиков в два раза больше чувствительности осевых датчиков. За счет этого в результирующем сигнале на выходе Z измерительного устройства будет существенно уменьшен сигнал помехи, создаваемый внешней электромагнитной помехой.

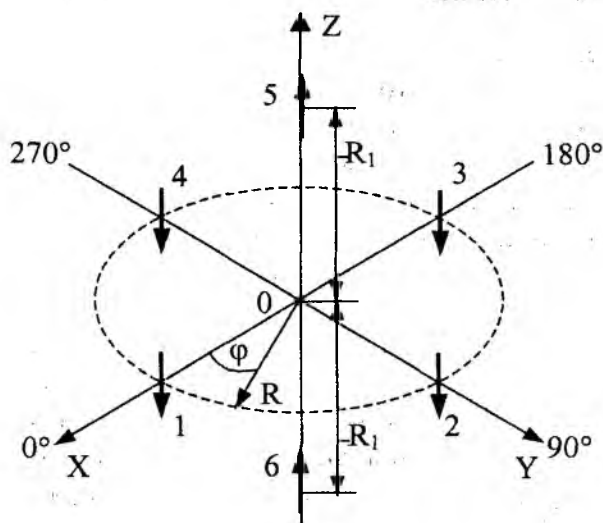


Рис. 1

На осевые 1-4 и радиальные 5,6 датчики воздействует также соответственно осевая и радиальная компоненты напряженности магнитного поля измеряемого источника, которые описываются уравнениями в виде суммы мультиполей сферических гармоник ВМП [4]:

– осевая компонента напряженности магнитного поля в точках экваториальной плоскости:

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

– радиальная компонента напряженности магнитного поля в точках на полярной оси Z:

$$H_R(\theta = 0^{\circ}, 180^{\circ}) = \pm \frac{2}{4\pi R^3} g_{10} + \frac{3}{4\pi R^3} g_{20} \pm \frac{4}{4\pi R^5} g_{30} + \frac{5}{4\pi R^6} g_{40} + \dots,$$

где R, φ, θ – сферические координаты; $g_{n0} (n = 2, 3, 4)$ – коэффициенты, равные мультипольным магнитным моментам пространственной гармоники ВМП n -го порядка.

В уравнениях (1),(2) коэффициент g_{10} дипольной постоянной составляющей магнитного поля ($n=1$), не зависящей от угловой координаты φ , равен осевому дипольному моменту измеряемого источника ВМП: $g_{10} = M_Z$.

Электрический сигнал, наведенный в датчиках 1-4 устройства осевой составляющей напряженности ВМП источника (1), имеет вид :

$$E'_Z = \frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_{i\theta}(R, \theta = 90^{\circ}, \varphi_i) = \frac{4g_{10}}{k_f R^3} - \frac{6g_{30}}{k_f R^5} + \dots \quad (3)$$

Электрический сигнал датчиков 5, 6 обусловлен действием радиальной составляющей напряженности магнитного поля (2) :

$$E_Z'' = \frac{2}{K_f} [H_{5R}(R, \theta = 0^\circ) - H_{6R}(R_1, \theta = 180^\circ)] = \frac{8g_{10}}{k_f R_1^3} + \frac{16g_{30}}{k_f R_1^5} + \dots, \quad (4)$$

где $k_f, \text{мЭ/мВ}$ – постоянная датчиков магнитоизмерительного устройства.

Согласно (3), (4) обе группы датчиков обеспечивают отстройку от помехонесущих гармоник четного порядка ВМП ($n=2,4,\dots$) с точностью до гармоники третьего порядка, т.е. октупольной составляющей, напряжённость магнитного поля которой убывает пропорционально $1/R^5$.

Катушки обеих групп датчиков соединены последовательно согласно. Поэтому результирующий электрический сигнал на выходе измерительного канала Z равен сумме сигналов E_z' (3) и E_z'' (4):

$$E_z = \frac{4g_{10}}{K_f} \left(\frac{1}{R^3} + \frac{2}{R_1^3} \right) + \frac{2g_{30}}{K_f R^3} \left(-\frac{3}{R^2} + \frac{8}{R_1^2} \right) + \dots = E_{z1} + E_{z3} + \dots, \quad (5)$$

где E_{z1} – полезный сигнал, пропорциональный коэффициенту g_{10} зональной гармоники дипольной составляющей магнитного поля; E_{z3} – сигнал помехи, пропорциональный коэффициенту g_{30} зональной гармоники октупольной составляющей поля ($n=3$).

Из выражения (5) следует, что отстройка от помехи E_{z3} , создаваемой октупольной составляющей магнитного поля, возможна при выполнении условия :

$$R_1 = \left(\frac{8}{3} \right)^{1/5} R.$$

В этом случае сигнал помехи $E_{z3} = 0$, а выражение (5) принимает вид :

$$E_z = \frac{8,44g_{10}}{K_f R^3} + \dots = E_{z1} + \dots,$$

откуда получаем уравнение измерения осевого дипольного магнитного момента :

$$g_{10} = M_z = 0,118E_z K_f R^3.$$

Таким образом, за счет оптимального расположения датчиков и выбора соотношения радиусов $R_1/R = (8/3)^{1/5}$ обеспечивается отстройка не только от помехонесущих гармоник ВМП четного порядка, но и от октупольной составляющей магнитного поля. В результате дипольная постоянная составляющая магнитного поля, пропорциональная осевому диполлю M_z , измеряется с погрешностью, обусловленной помехонесущими гармониками ВМП нечётного порядка $n \geq 5$.

Оценим мультипольную составляющую методической погрешности измерения осевого дипольного момента по помехонесущей гармонике пятого порядка. Составляющие напряженности магнитного поля этой гармоники, действующие на магнитные оси датчиков измерительного устройства, описываются уравнениями [4]:

– осевая компонента напряженности магнитного поля ($n = 5$)

$$H_{\theta 5}(\theta = 90^\circ) = \frac{15}{4\pi R^7} \left[\frac{1}{8} g_{50} - \frac{7}{2} (g_{52} \cos 2\varphi + h_{52} \sin 2\varphi) + 63(g_{54} \cos 4\varphi + h_{54} \sin 4\varphi) \right];$$

– радиальная компонента напряженности магнитного поля ($n = 5$):

$$H_{R5}(\theta = 0^\circ, 180^\circ) = \pm \frac{6g_{50}}{4\pi R^7}.$$

Электрический сигнал помехи, наведенный в датчиках этими компонентами напряженности поля, определяется выражением :

$$E_{z5} = \frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_{i\theta5}(R, \theta = 90^\circ, \varphi_i) + \frac{2}{K_f} \left[H_{R5}(R_1, \theta = 0^\circ) - H_{R5}(R_1, \theta = 180^\circ) \right] = -\frac{27}{K_f R^7} \left(\frac{1}{2} g_{50} + 140g_{54} \right), \quad (6)$$

где g_{50}, g_{54} – коэффициенты, равные магнитным моментам мультиполей зональной и тессеральной гармоник пятого порядка, обусловленные смещением осевого магнитного диполя относительно центра принятой системы координат.

При смещении вектора осевого дипольного магнитного момента на координату z_0 относительно геометрического центра магнитоизмерительного устройства, совмещенного с началом системы координат, коэффициенты зональной и тессеральной гармоник порядка $n = 5$, найденные расчетным путем, будут равны:

$$g_{50} = 5M_z Z_0^4, g_{54} = 0.$$

В этом случае мультиполюсная составляющая методической погрешности, обусловленная помехонесущим мультиполем зональной гармоник пятого порядка, вычисляется по формуле:

$$\delta_z = \frac{E_{z5}}{E_{z1}} = \frac{8g_{50}}{5g_{10}R^4} = 8 \left(\frac{k_z}{R/L} \right)^4, \quad (7)$$

где $k_z = z_0/L \leq 1/2$ – коэффициент эксцентricности осевого дипольного момента измеряемого источника поля; L – габаритный размер источника по координатному направлению Z .

Зависимость мультиполюсной погрешности измерения осевого дипольного момента в зависимости от расстояния размещения датчиков вокруг испытуемого источника поля, связанного с его габаритными размерами, построена на рис.2 (зависимость мультиполюсной погрешности $\delta_z = f(R/L)$) для предельного случая, когда коэффициент эксцентricности осевого диполя достигает наибольшего значения, $k_z = 1/2$. Анализ показывает, что на расстоянии 2...4 габаритных размеров источника ВМП максимальное значение погрешности находится в пределах (0,2...3,1)%.

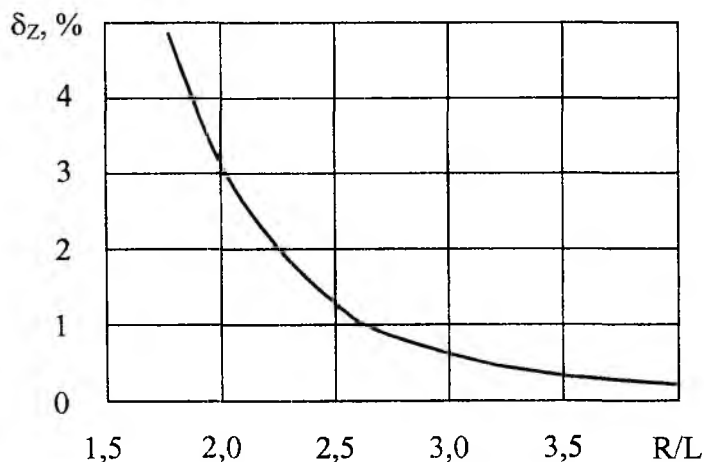


Рис. 2

Докажем правомерность оценки мультипольной погрешности по помехонесущей гармонике ВМП пятого порядка. Для этого найдем классическим методом полное значение результирующего сигнала, наведенного в датчиках магнитным полем измеряемого источника.

Скалярный магнитный потенциал осевого дипольного момента M_Z с параметром эксцентricности z_0 описывается выражением :

$$U = \frac{M_Z (z - z_0)}{4\pi [x^2 + y^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}},$$

где x, y, z – текущие координаты точки наблюдения. Путем дифференцирования потенциала U по координате Z находим точное значение Z -й составляющей напряженности магнитного поля, действующей на магнитные оси датчиков 1-6 рассматриваемого магнитометрического устройства :

$$H_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{M_Z}{4\pi} \cdot \frac{2(R \cos \theta - z_0)^2 - R^2 \sin^2 \theta}{[R^2 - 2R z_0 \cos \theta + z_0^2]^{5/2}}.$$

Эта составляющая напряженности магнитного поля наводит в катушках датчиков измерительного канала Z электрический сигнал :

$$E_{z'} = -\frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_{iZ}(R, \theta = 90^\circ) + \frac{2}{k_f} [H_{5Z}(R_1, \theta = 0^\circ) + H_{6Z}(R_1, \theta = 180^\circ)] = \frac{4M_Z}{k_f} \left[-\frac{2z_0^2 - R^2}{(R^2 + z_0^2)^{5/2}} + \frac{4R_1(R_1^2 + 3z_0^2)}{(R_1^2 - z_0^2)^3} \right].$$

По точному значению сигнала $E_{z'}$ определяем результирующий сигнал помехи $\Delta E_z = E_{z'} - E_{z1}$, создаваемый всеми нечетными помехонесущими гармониками ВМП ($n=5 \dots \infty$), затем вес сигнала помехи E_{z5} (6) пятой гармоники, по которому оценивается погрешность измерения δ_7 (7):

$$\varepsilon = \frac{E_{z5}}{\Delta E_z} = \frac{135}{8} \left(\frac{k_z}{R/L} \right)^4 \left\{ -\frac{2 \left(\frac{k_z}{R/L} \right)^2 - 1}{\left[1 + \left(\frac{k_z}{R/L} \right)^2 \right]^{5/2}} + \frac{R_1/R \left[(R_1/R)^2 + 3 \left(\frac{k_z}{R/L} \right)^2 \right]}{\left[(R_1/R)^2 - \left(\frac{k_z}{R/L} \right)^2 \right]^3} - 2,11 \right\}. \quad (8)$$

Расчет по формуле (8) показывает, что при измерении на расстоянии двух габаритных размеров источника поля вес пятой гармоники ВМП в создании методической погрешности при значениях коэффициента эксцентricности $k_z = 1/2$ и соотношения $R_1/R = (8/3)^{1/5}$ составляет 99%.

Таким образом, гармонический метод оценки мультипольной составляющей погрешности шеститочечного метода измерения осевого дипольного магнитного момента источника ВМП по его помехонесущей гармонике пятого порядка обеспечивает достаточную для практики точность и существенно упрощает вычисления этой погрешности по сравнению с классическим методом.

Выводы

1. Получено уравнение мультипольной составляющей методической погрешности шеститочечного метода измерения осевого дипольного момента в удобной для использования форме, связывающее габаритные размеры испытуемого источника магнитного поля и контрольное расстояние, на котором производятся измерения.
2. Определены оптимальные координаты точек расположения индукционных датчиков магнитоизмерительного устройства вокруг источника поля, вследствие чего это устройство обеспечивает выделение из сложного гармонического спектра измеряемого ВМП дипольной постоянной составляющей зональной гармоники поля, пропорциональной осевому магнитному диполю, с точностью до помехонесущей гармоники пятого порядка.
3. Определены расстояния, связанные с габаритными размерами испытуемого источника ВМП, на котором можно производить измерения осевого дипольного момента шеститочечным магнитометрическим устройством с достаточной для практики точностью.
4. Предложенный шеститочечный метод может быть использован для измерения осевого дипольного момента источников ВМП в условиях стационарных магнитометрических стендов, поскольку его радиальные датчики размещаются на полярной оси симметрично относительно экваториальной плоскости, в которой расположены осевые датчики.

Список литературы: 1. Ковалевский В.И. Измерение магнитных полей и плазмы на космических аппаратах. М.: Наука, 1973. 267 с. 2. Хагенмейстер Е.А., Вихарев А.П. Экспериментальное исследование внешних магнитных полей в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС // Электромеханика. 1985. 1. С. 32 – 35. Изв. высш. учебн. заведений. 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. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров: Пер. с франц. М.: Наука, 1964. 772 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 30.11.03.