УДК 621.317.443

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОСЕВОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

ДЕГТЯРЕВ А.В.

Приводится математическая модель мультипольной составляющей методической погрешности двухточечного магнитометрического метода измерения осевого дипольного момента и определяется основной вклад помехонесущих мультиполей внешнего магнитного поля источника в создание этой погрешности.

1. Постановка задачи и анализ последних исследований

При исследовании электромагнитной совместимости различного рода источников внешнего магнитного поля (ВМП) и электронного оборудования важно знать уровень напряженности магнитного поля в заданных точках окружающего пространства на плоскости или в определенном объеме вблизи источника поля. Подобные задачи возникают, когда необходимо оценить влияние магнитного поля источника на магниточувствительные устройства, расположенные в зоне воздействия ВМП [1,2].

Важным параметром магнитного поля рассеяния является магнитный момент, обусловленный токами различных устройств, которыми оснащен источник поля. Поэтому одним из основных контролируемых параметров физических тел – источников ВМП есть дипольный магнитный момент [3], который является постоянной величиной в отличие от напряженности магнитного поля и не зависит от координат точек наблюдения.

Таким образом, задача контроля напряженности ВМП источника состоит в измерении пространственной гармоники первого порядка, т.е. дипольной составляющей поля, и определении по результатам измерений компонент дипольного магнитного момента. Это дает возможность легко вычислить по найденным значениям дипольного момента напряженность ВМП источника в произвольных точках внешнего пространства.

Магнитное поле источника имеет сложный пространственно-гармонический характер. На значительных расстояниях по сравнению с габаритными размерами источника его ВМП можно представить с достаточной для практики точностью дипольной моделью, поле которой пропорционально дипольному магнитному моменту источника. Однако осуществить измерение дипольного магнитного момента источника поля на таких расстояниях весьма проблематично из-за внешних электромагнитных помех, уровень которых может превышать полезный сигнал на порядок и более. В связи с этим возникла необходимость в разработке магнитометрических методов измерения дипольного момента с помощью точечных датчиков – индукционных преобразователей, расположенных определенным образом вокруг источника поля вблизи его рабочей поверхности. В этом случае, с одной стороны, уменьшается помеховая погрешность, поскольку значительно увеличивается соотношение полезного сигнала к помехонесущему, созданному внешними источниками, расположенными вблизи зоны магнитометрического испытательного стенда. С другой стороны, при расположении датчиков вблизи измеряемого источника усложняется выделение дипольной составляющей поля из ВМП источника, скалярный магнитный потенциал которого для области внешнего пространства, где плотность тока равна нулю и $rot\bar{H} = 0$, можно представить сферическим гармоническим рядом в виде суммы мультиполей – диполя квадруполя, октуполя и т.д. [4]:

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

где R, φ, θ – сферические координаты точек наблюдения; g_{nm}, h_{nm} – коэффициенты ряда, равные магнитным моментам элементарных m-х мультиполей пространственной гармоники n-го порядка; $P_n^m(\cos\theta)$ – присоединенные полиномы Лежандра первого рода.

Элементарные мультиполя высших пространственных гармоник $(n \geq 2)$ ряда (1) являются помехонесущими по отношению к измеряемой дипольной гармонике (n=1), вследствие чего появляется мультипольная составляющая методической погрешности измерения осевого дипольного момента, которая может быть значительной по величине.

Выделение нерешенных ранее частей задачи. Анализ точности выделения дипольной составляющей магнитного поля из полного спектра помехонесущих гармоник ВМП невозможен без получения адекватной математической модели измерения дипольного магнитного момента, обеспечивающей аналитическое описание функционирования магнитоизмерительной системы датчиков и определение таких ее метрологических характеристик, как уравнение измерения дипольного момента, чувствительности и погрешности измерения. Однако такая информация по измерительной системе с минимальным количеством пар осевых датчиков в публикациях отсутствует.

Цель. Настоящая статья посвящена оценке перечисленных метрологических характеристик магнитометрической системы из двух осевых датчиков, предназначенной для измерения осевого дипольного магнитного момента источника поля.

2. Решение задачи

В основу модели измерения положен двухточечный метод, который базируется на мультипольной модели ВМП источника, аналитически описанной сферическим гармоническим рядом Гаусса (1), и реализуется магнитометрической системой из двух индукционных осевых датчиков, расположенных вокруг измеряемого источника ВМП в экватори-

альной плоскости ($\theta = 90^0$) на окружности радиуса R в точках с угловой координатой ϕ=90,180° и ориентированных своими чувствительными осями параллельно оси Z принятой системы координат (рис.1).

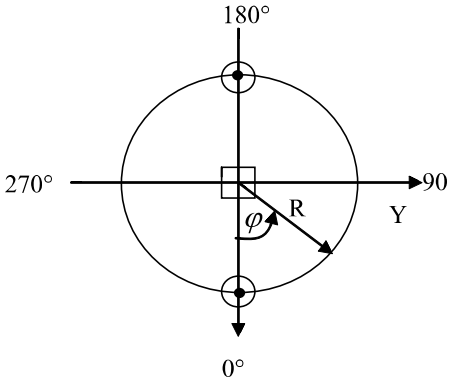

Рис.1. Схема расположения осевых датчиков вокруг источника ВМП

Анализ показывает, что в результирующем сигнале E_z (2) отсутствуют электрические сигналы помех E_{z2}, E_{z4} и т.д., создаваемые помехонесущими мультиполями пространственных гармоник чётного порядка (n=2,4,...). Объясняется это тем, что магнитные поля помехонесущих мультиполей чётных гармоник наводят в катушках осевых датчиков 1,2 равные по величине и противофазные сигналы помех, которые полностью компенсируют друг друга, поскольку катушки датчиков соединены последовательно – согласно.

Таким образом, измерительная система из двух осевых датчиков обладает свойством мультипольного гармонического анализа ВМП и осуществляет выделение дипольной постоянной составляющей магнитного поля с точностью до помехонесущей гармоники третьего порядка.

Полезный электрический сигнал E_{z1} (2), наведенный в катушках датчиков 1,2 дипольной осевой составляющей напряженности магнитного поля

$H_{\theta 1} = g_{10} / 4\pi R^{3`}$, равен $E_{z1} = \dfrac{2}{k_f R^3} g_{10} \approx E_z$, (2)

откуда получаем уравнение измерения осевого дипольного момента

$$g_{10} = M_z = \frac{1}{2} E_z k_f R^3 \qquad (3)$$

и значение чувствительности измерительной системы к напряженности дипольной составляющей магнитного поля, не зависящей от угловой координаты φ: $S_{10} = 2 / K_f$, мВ / мЭ.

Из уравнений (2), (3) следует, что дипольный момент M_Z измеряется с погрешностью, обусловленной помехонесущими гармониками ВМП нечетного порядка, основной вклад в которую вносят сигналы E_{z3} и E_{z5}, создаваемые третьей и пятой гармониками ВМП, поскольку напряженность магнитного поля этих гармоник убывает более медленно с расстоянием по сравнению с магнитным полем гармоник высших порядков (n=7,9,...):

$$\delta_z = \frac{E_{z3} + E_{z5}}{E_{z1}} 100\% . \qquad (4)$$

Сигнал помехи E_{z3}, создаваемый октупольной осевой составляющей напряженности магнитного поля (n=3)

$$H_{\theta 3}(\theta = 90^0) = \\ = \frac{1}{4\pi R^5}\left[-\frac{3}{2} g_{30} + 15(g_{32}\cos 2\varphi + h_{32}\sin 2\varphi)\right],$$

определяется по формуле:

$$E_{z3} = \frac{1}{k_f}\left[H_{1\theta 3}(\varphi = 0^0, \theta = 90^0) + \right. \\ \left. + H_{2\theta 5}(\varphi = 180^0, \theta = 90^0)\right] = \\ = \frac{6}{k_f R^5}\left(-\frac{1}{2} g_{30} + 5 g_{32}\right). \qquad (5)$$

Помеха E_{z5}, в свою очередь, создается элементарными мультиполями пространственной гармоники ВМП пятого порядка:

$$E_{z5} = \frac{1}{k_f}\left[H_{1\theta 5}(\varphi = 0^0, \theta = 90^0) + H_{2\theta 5}(\varphi = 180^0, \theta = 90^0)\right] = \\ = \frac{30}{k_f R^7}\left(\frac{1}{8} g_{50} - \frac{7}{8} g_{52} + 63 g_{54}\right), \qquad (6)$$

где $H_{k\theta 5}(\varphi, \theta = 90^0), k = 1(\varphi = 0^0), 2(\varphi = 180^0)$ – осевая составляющая напряженности магнитного поля пятой гармоники ВМП источника, аналитически описываемая уравнением :

$$H_{\theta 5}(\theta = 90^0) = \frac{15}{4\pi R^7} \times \\ \times \left[\frac{1}{8} g_{50} - \frac{7}{2}(g_{52}\cos 2\varphi + h_{52}\sin 2\varphi) + \right. \\ \left. + 63(g_{54}\cos 4\varphi + h_{54}\sin 4\varphi)\right].$$

Значения коэффициентов $g_{3m}(m = 0,2)$, $g_{5m}(m = 0,2,4)$ в выражениях (5), (6) зависят от параметров эксцентричности измеряемого осевого дипольного магнитного момента M_z. Так, для наиболее неблагоприятного случая, когда дипольный момент M_z смещен внутри рабочего объема источника ВМП на координату x_0 относительно начала координат, коэффициенты g_{3m} и g_{5m} найдем расчетным путем

для гармоники n=3:

$$g_{30} = -\frac{3}{2} M_z x_0^2, g_{32} = \frac{1}{4} M_z x_0^2;$$

для гармоники n=5:

$$g_{50} = \frac{15}{8} M_z x_0^4, g_{52} = -\frac{1}{8} M_z x_0^4, g_{54} = \frac{1}{192} M_z x_0^4 .$$

Тогда после подстановки в выражение (4) помехонесущих сигналов E_{z3} (5) и E_{z5} (6) с учетом значений коэффициентов g_{3m}, g_{5m} получим математическую модель мультипольной составляющей методической погрешности измерения осевого дипольного момента источника ВМП:

$$\delta_z = \left(\frac{k_x}{R/L}\right)^2 \cdot \left[6 + 15\left(\frac{k_x}{R/L}\right)^2\right] \cdot 100\%, \qquad (7)$$

где $k_x = x_0 / L \le 1/2$ – коэффициент эксцентричности осевого дипольного момента; L – габаритный размер измеряемого источника поля по координатному направлению X.

На рис.2 представлена графическая зависимость $\delta_z = f(R/L)$ для предельного случая, когда значение коэффициента эксцентричности $k_x = 1/2$. Из анализа этой зависимости следует, что измерение осевого дипольного магнитного момента двумя датчиками можно производить с погрешностью $\delta_{z\max} \le 10\%$ на расстоянии, равном не менее четырех габаритных размеров источника поля.

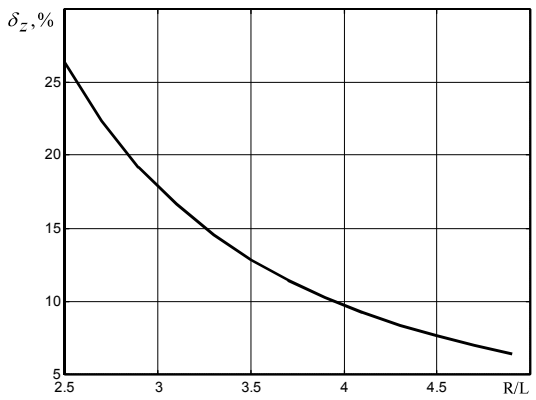

Рис.2. Мультипольная погрешность $\delta_z = f(R/L)$

Теперь оценим вес третьей и пятой гармоник ВМП в создании мультипольной погрешности δ_z (7), найденной гармоническим методом. Для этого определим классическим методом результирующий сигнал помехи от всех нечетных гармоник поля, созданных за счет эксцентричности осевого дипольного момента на координату x_0:

$$\Delta E_z = \frac{1}{k_f}[H'_{1\theta}(\varphi = 0^0, \theta = 90^0) +$$

$$+ H'_{2\theta}(\varphi = 180^0, \theta = 90^0)] - E_{1z} =$$

$$= \frac{2M_z}{k_f R^3}\left[\frac{R^4(R^2 + 3x_0^2)}{(R^2 - x_0^2)^3} - 1\right], \qquad (8)$$

где $H'_{k\theta}(\varphi, \theta = 90^0)$ – полное значение осевой компоненты напряженности магнитного поля эксцентричного диполя M_z, описываемое уравнением:

$$H'_{k\theta}(\theta = 90^0) = \frac{M_Z}{4\pi}\left[(R\cos\varphi - x_0)^2 + (R\sin\varphi)^2\right]^{-3/2}.$$

Весовой вклад третьей и пятой гармоник ВМП в создание результирующего сигнала помехи ΔE_z (8) вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{E_{z3} + E_{z5}}{\Delta E_z} =$$

$$= \delta_z\{(1 + 3k_x^2/(R/L)^2)/[1 - k_x^2/(R/L)^2]^3 - 1\}^{-1}.$$

Анализ показывает ,что вес третьей и пятой гармоник ВМП в результирующем сигнале помехи ΔE_z (8) на расстоянии $R = 4L$ и $k_x = 1/2$ составляет 99,89%.

Таким образом, оценка погрешности измерения δ_z (7) по мультиполям помехонесущих третьей и пятой гармоники ВМП обеспечивает достаточно высокую точность.

3. Выводы

1. Получена математическая мультипольная модель погрешности двухточечного метода измерения осевого дипольного момента, представленная в виде функции от параметров контрольного расстояния, на котором осуществляется измерение, и габаритного размера испытуемого источника магнитного поля, что существенно упрощает оценку погрешности измерения источников поля различных типоразмеров.

2. Основной вклад в создание мультипольной составляющей методической погрешности вносят помехонесущие мультиполя зональных и тесеральных гармоник ВМП третьего и пятого порядков, преобладающей из которых является октупольная постоянная составляющая и переменная составляющая магнитного поля, которая изменяется по закону $\cos 2\varphi$.

3. Измерение осевого дипольного магнитного момента двумя датчиками можно производить с мультипольной погрешностью не более 10%, если оно будет осуществляться на расстоянии не более четырех габаритных размеров испытуемого источника ВМП.

Литература: 1. *Иванов В.А., Ильницкий Л.Я., Фузик М.И.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. К.:Техника, 1983. 120с. 2. *Ковалевский В.И.* Измерение магнитных полей и плазмы на космических аппаратах . М.: Наука , 1973. 267с. 3. *ГОСТ* Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического поля. Введ. 01.07.93. М.: Изд-во стандартов, 1993. 5с. 4. *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 592с.

Поступила в редколлегию 30.11.2002

Дегтярев Александр Валентинович, студент ХНУРЭ. Научные интересы: электромагнитная совместимость. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, ком.55з