

А.В. ГЕТЬМАН, канд. техн. наук, зав. отделом, НТЦ МТО НАНУ,
Харьков

С.Г. ЗВЕРЕВ, аспирант, НТЦ МТО НАНУ, Харьков

Е.Г. КРАМЧАНИН, аспирант, НТЦ МТО НАНУ, Харьков

О ПРАКТИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РАЗНОТИПНЫМИ СИСТЕМАМИ

Розглянуті деякі особливості практичного використання вимірювальних систем просторових гармонік магнітного поля технічних об'єктів двох типів: на основі ферозондових датчиків та на основі селективних контурів. Проведена оцінка похибки визначення дипольних гармонік та розглянуті фактори які впливають на її величину.

Рассмотрены некоторые особенности практического использования измерительных систем пространственных гармоник магнитного поля технических объектов двух типов: на основе феррозондовых датчиков и на основе селективных контуров. Проведена оценка погрешности определения дипольных гармоник и рассмотрено влияние факторов влияющих на ее величину.

Введение. Задача практического определения пространственного распределения магнитного поля (МП), создаваемого техническим объектом (ТО), а также связанные с ней задачи нормирования и компенсации поля имеют достаточно разнообразный набор методов и средств их решения. Так для практического определения пространственного спектра МП могут быть использованы системы разные как по исполнению, так и по принципу измерения пространственных гармоник. Наибольшее распространение получили измерительные системы на основе нескольких феррозондовых датчиков МП, специальным образом расположенных и ориентированных возле ТО. Например, для измерения каждой компоненты магнитного момента могут быть использованы одна-две пары встречно включенных датчиков, как это описано в работах [1, 2], что позволяет существенно улучшить соотношение полезный сигнал–шум. Преимущества таких систем связаны с современными достижениями в создании высокоточных феррозондовых датчиков магнитной индукции, а главными недостатками применения

являются методические ограничения по выделению вклада искомой пространственной гармоникой МП. Альтернативным подходом к решению задачи измерения пространственных гармоник МП является применение систем на основе селективирующих контурных обмоток, сцепленный с которыми магнитный поток содержит гармонику, порядок которой определяется геометрическими характеристиками контура [3]. Методология определения гармоник такими системами обосновывает получение точного значения амплитуды гармоники, однако инструментальная погрешность вносит коррективы в практику использования такого подхода.

На сегодняшний день является актуальным вопрос о рациональном использовании систем того или иного типа для практического определения пространственного распределения МП ТО. Прежде всего это касается объектов с удельно малым магнитным моментом (менее $0,1 \text{ Ам}^2$ на каждый 1 м^3). Исходя из изложенного, задачей работы является проведение оценки погрешности практического определения пространственных гармоник МП разнотипными системами и выявление критериев их рационального использования.

Исходные положения. В самом общем случае пространственного распределения МП вне сферы, охватывающей ТО, магнитная индукция может быть представлена в виде суперпозиции полей сферических гармоник [1]:

$$\vec{B} = -\frac{\mu\mu_0}{4\pi} \nabla \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{r^{n+1}} \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos\theta) \{g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi\} \right), \quad (1)$$

где r , θ и φ – сферические координаты точки представления поля; g_n^m и h_n^m – амплитудные коэффициенты гармоники степени n и порядка m .

Однако практический интерес представляют лишь величины амплитуд нескольких гармоник младших степеней n , поскольку МП спадает по степени $n+2$, т.е. при удалении от поверхности ТО вкладом остальных гармоник в суммарное магнитное поле можно пренебречь. На практике оказывается важным знание оценочных величин таких расстояний, при удалении на которые, может быть пренебрежены гармоники, начиная со степени k , и при этом не будет превышено гранично-допустимое значение методической погрешности определения МП – Δ_m . Востребованность таких оценок вызвана как необходимостью построения адекватных моделей и проведения расчетов МП ТО, так и важностью обоснования выбора измерительных систем пространственных гармоник с соответствующими метрологическими возможно-

стями. Это, прежде всего, справедливо для систем на основе феррозондовых датчиков.

Системы на основе точечных датчиков магнитной индукции.

Будем рассматривать системы, использующие четыре феррозондовых датчика для определения каждой из трех амплитуд дипольных гармоник магнитного поля, эквивалентных компонентам магнитного момента (ММ). При этом четверка датчиков, используемых для определения величины дипольных гармоник (или декартовых проекций ММ) позиционированы и ориентированы вокруг исследуемого ТО в соответствии с работами [1, 2].

Для проведения оценки погрешности измерения амплитуд дипольных гармоник сделаем дополнительное упрощение. ТО представим в виде магнитного момента с величиной M , смещенного на $r_{см}$ по оси измерительной системы из четырех датчиков. При этом сам ТО будем считать хорошо вписанным в сферу радиуса $R_{ТО}$. Поскольку элементарный объем со смещенным магнитным моментом может быть в любой точке шара радиуса $R_{ТО}$, то легко видеть, что среднее значение величины смещения элементарного объема внутри сферы равно $R_{ТО} \cdot 3^{-1/2}$. Если учесть, что это смещение может быть в любом из трех направлений декартовых координат, то естественно положить величину смещения в направлении одной оси $r_{см}$ равную:

$$r_{см} = \frac{1}{3} \frac{1}{\sqrt{3}} R_{ТО}. \quad (2)$$

Тогда, относительная методическая погрешность определения величины смещенного на $r_{см}$ диполя системой из четырех датчиков можно определить по формуле:

$$\Delta_M = \frac{B_{см} - B_{ц}}{B_{ц}} 100\%, \quad (3)$$

где $B_{см}$ – суммарное значение магнитной индукции четырех датчиков, создаваемое смещенным диполем; $B_{ц}$ – суммарное значение магнитной индукции четырех датчиков, создаваемое центральным диполем.

Упрощая правую часть выражения (3), получим:

$$\left(\frac{6}{R^3} - \frac{2}{(R+r_{см})^3} - \frac{2}{(R-r_{см})^3} - \frac{2}{(R^2+r_{см}^2)^{3/2}} + \frac{6Rr_{см}}{(R^2+r_{см}^2)^{5/2}} \right) \frac{R^3}{6} \cdot 100\%. \quad (4)$$

В такой трактовке величины смещения $r_{см}$ методическая погрешность Δ_M оказывается как функцией расстояния R от центра системы до датчиков, так и функцией габаритов ТО (двойного радиуса $R_{ТО}$), что

иллюстрируют спадающие графики на рис. 1, построенные для ТО с магнитным моментом равным $0,1 \text{ Ам}^2$ для полугабаритов ТО $R_{\text{ТО}}=1 \text{ м}$, $0,5 \text{ м}$ и $0,25 \text{ м}$ соответственно.

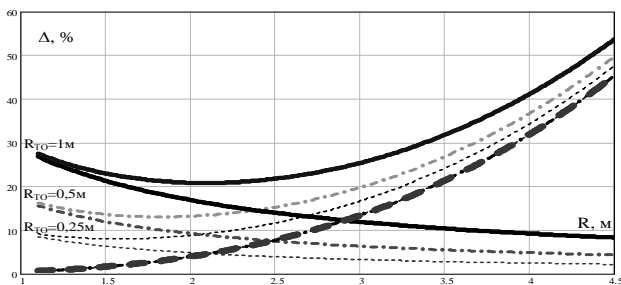


Рис. 1. Погрешность измерения $M=0,1 \text{ Ам}^2$ системой из четырех датчиков.

Однако методическая погрешность является не единственным фактором, определяющим рациональность выбора расстояния от ТО до датчиков системы. Представим второй обобщающий фактор – стендовую погрешность как сумму инструментальной погрешности и погрешности вызванной магнитной помехой. Для оценки величин этих погрешностей воспользуемся следующими соображениями: переменная составляющая естественного магнитного поля Земли для инфранизких частот $\approx 2 \text{ нТл}$, а ее временное усреднение феррозондовыми датчиками не лучше $1/10$ от амплитуды переменной помехи; составляющая инструментальной помехи в виде дрейфа нуля магнитометра не лучше $0,5 \text{ нТл/мин}$.

Все это позволяет положить суммарную величину абсолютной погрешности измерений магнитной индукции на стенде не лучше чем $0,25 \text{ нТл}$. Тогда стендовая погрешность измерения магнитного момента величиной $M_{\text{изм}}=0,1 \text{ Ам}^2$ будет равна:

$$\Delta_{\text{СТ}} = \frac{M_{\text{СТ}}}{M_{\text{ИЗМ}}} 100\% \approx 0,5 \cdot R^3, \quad (5)$$

где $M_{\text{изм}}$ – измеряемый магнитный момент; $M_{\text{СТ}}$ – эквивалентный момент абсолютной погрешности измерений на стенде для системы из 4-х датчиков.

На графике (рис. 1) функциональная зависимость стендовой погрешности от расстояния между ТО и датчиками измерительной системы показана жирным пунктиром.

В плане рационального выбора оптимального расстояния от ТО до датчиков на рис. 1 представлены графики суммарной (методической и стендовой) погрешности для ТО с полугабаритами 1 м, 0,5 м и 0,25 м соответственно.

Более наглядно суммарная погрешность, как функция двух аргументов: расстояния R до датчиков и полугабарита ТО (радиуса $R_{ТО}$), представлена на рис. 2. На графике хорошо просматривается локальный минимум погрешности для характерного полугабарита ТО, что может быть использовано для оптимальной настройки измерительной системы.

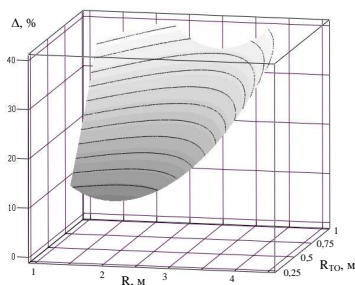


Рис. 2. Суммарная погрешность измерения $MM=0,1 \text{ Ам}^2$ системой из четырех датчиков.

Системы на основе измерительных контуров специальной конфигурации. Характерной особенностью измерительных систем с линейным перемещением ТО через селектирующие контура является отсутствие методической погрешности выделения вклада искомой пространственной гармоники. Поэтому вопрос о минимизации величины погрешности определения пространственных гармоник в данном случае сводится к рациональному выбору инструментальных средств (прежде всего веберметра и параметров обмотки селектирующего контура). Кроме того, погрешность определения пространственных гармоник такими системами находится в некоторой зависимости от спектра пространственных гармоник исследуемого ТО. Причина такой корреляции кроется в инструментальной погрешности измерения магнитной сигнатуры ТО. Для более подробного исследования такой особенности погрешности рассмотрим простейший вариант магнитной модели ТО, магнитоактивная часть которого состоит из двух постоянных магнитов с величинами $M_l = 0,5 \text{ Ам}^2$ и $M_r = 0,54 \text{ Ам}^2$. Магнитные оси магнитов коллинеарны смещениям источников относительно цен-

тра системы $\pm a = 0,15$ м. Для случая сонаправленных магнитных осей магнитов измеренная системой магнитная сигнатура, построенная для угловой координаты линейного перемещения, показана на рис. 3 сплошной линией.

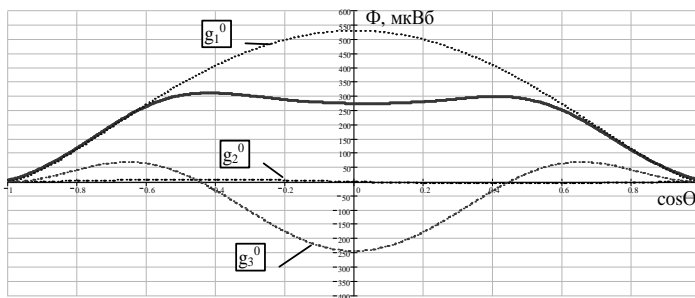


Рис. 3. Магнитные сигнатуры гармоник источника из двух сонаправленных ММ.

На рис.3 прерывными линиями показаны вклады дипольной, квадрупольной и октупольной гармоник, амплитуды которых получены математической обработкой измеренной сигнатуры магнитного потока. На графиках хорошо видно, что вклад квадрупольной гармоники в суммарный магнитный поток более чем на порядок меньше соответствующих вкладов дипольной и октупольной гармоник. Такое соотношение вкладов гармоник в спектре негативно сказывается на точности определения гармоник с минимальным вкладом в измеренную магнитную сигнатуру. Для рассматриваемого случая величина амплитуды квадрупольной гармоники может быть рассчитана на основании значений магнитных моментов и соответствующих смещений постоянных магнитов и должна составить:

$$g_2^0 = 2a(M_r - M_l)/4\pi \approx 0,001 \text{ Ам}^3. \quad (6)$$

В то время как в результате обработки измерений было получено значение $0,00225 \text{ Ам}^3$, при этом величина погрешности практического определения гармоники составила более 100 %.

Влияние инструментальной погрешности характерно и для дипольной гармоники. Например, в случае маломанитного исполнения рассматриваемого нами ТО, когда моменты постоянных магнитов направлены встречно. Зафиксированная магнитная сигнатура такого источника с доминирующей квадрупольной гармоникой показана на рис. 4. Результат обработки магнитной сигнатуры для дипольного момента

встречно ориентированных магнитов выдал значение $M_r - M_l = 0,03 \text{ Ам}^2$, т.е. с погрешностью около 30%.

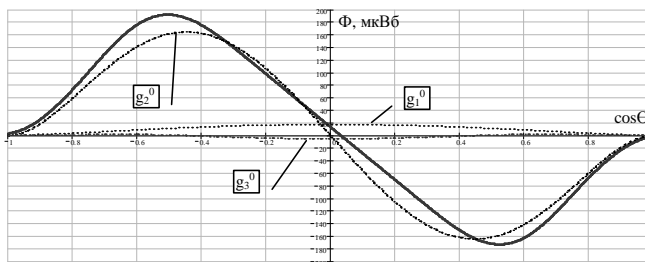


Рис. 4 Магнитные сигнатуры гармоник источника из двух встречно направленных ММ.

Выводы. На основе проведенного анализа показана ограниченность использования для измерения магнитных моментов величиной $0,1 \text{ Ам}^2$ и менее систем с точечными датчиками при их удалении от ТО более чем на 3 м, поскольку при этом суммарная погрешность оказывается значительно больше 10%. Показано, что инструментальная погрешность измерения магнитной сигнатуры контурной системой является причиной зависимости погрешности определения искомой гармоники от ее степени, при этом величина погрешности обратно пропорциональна вкладу гармоники в суммарный спектр.

Список литературы: 1. Дегтярев В.В., Дегтярев О.В. Метод измерения магнитного момента зональной гармоники мультиполя первого порядка // Радиотехника. – 2004. Вип.136. – С. 67-72. 2. Дегтярев О.В. Визначення методичної похибки дванадцятиточкового методу вимірювання дипольного магнітного моменту // Праці V міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" (Метрологія - 2006). – Том 1. – Харків, 2006. – С. 218-220. 3. Гетьман А.В. Определение пространственных гармоник магнитного поля вблизи поверхности технического объекта // Электричество. – 2005. – №1. – С. 55-60.

Поступила в редколлегию 07.07.2009