

Е.Г. КОРОЛЬ, асистент, НТУ "ХПИ", Харьков

В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков

А.Г. СЕРЕДА, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ", Харьков

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Наведено результати аналізу системи вимірювання компонент магнітного моменту електрооборудування за допомогою чотирьох трикомпонентних вимірювальних перетворювачів. Запропоновано аналітичні співвідношення для оцінки відносної похибки вимірювань, що обумовлена наявністю мультипольних складових зовнішнього магнітного поля.

Приведены результаты анализа системы измерения компонент магнитного момента электрооборудования с помощью четырех трехкомпонентных измерительных преобразователей. Предложены аналитические соотношения для оценки относительной погрешности измерений, вызванных наличием мультипольных составляющих внешнего магнитного поля.

Введение. Для обеспечения существующих и перспективных требований электромагнитной совместимости (ЭМС) [1, 2] электрооборудования (ЭО) в настоящее время применяется ряд технических решений. Повышение эффективности этих средств зачастую обеспечивается за счет индивидуальной настройки по результатам измерения внешнего магнитного поля (ВМП), либо его дипольной составляющей, пропорциональной магнитному моменту (ММ) ЭО. Величина этой эффективности определяется возможностями используемой методики измерения. Так, применяемая методика измерений [3] имеет методическую погрешность 10 %, что недостаточно для достижения величин эффективности более 10.

Цель работы – анализ схемы измерения магнитного момента электрооборудования.

Для теоретических исследований исследований использованы две системы координат, сферическая (r, θ, φ) и прямоугольная (x, y, z). Это связано с тем, что описание напряженности ВМП источника поля (ЭО) выполняется в большинстве случаев в сферической системе координат, а измеряемые компоненты ММ и их нормирование дается в прямоугольной системе координат.

Схема измерения. В качестве базовой рассматривается схема из-

мерений компонент переменного ММ с помощью четырех трехкомпонентных измерительных преобразователей [3]. На рис. 1 приведена схема расположения этих преобразователей относительно ЭО. Центр ЭО располагается в начале декартовой системы координат с осями x , y , z . Первичные преобразователи обозначены $\Pi_1 - \Pi_4$. Преобразователи $\Pi_1 - \Pi_4$ расположены в горизонтальной плоскости в точках пересечения окружности радиуса R с осями координат x , y .

В данной работе рассматривается переменное ВМП и ММ для однофазного ЭО. Максимальные величины компонент переменного ММ в этом случае могут быть представлены в виде векторов M_x , M_y , M_z , направленных вдоль соответствующих осей.

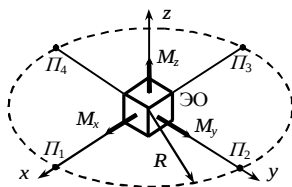


Рис. 1.

При формировании полезного сигнала в измерительной системе используются сферические компоненты напряженности ВМП. В качестве примера на рис. 2 показаны сферические компоненты напряженности, используемые для формирования сигнала при измерении компоненты ММ вдоль оси $x - M_x$. Точки расположения первичных преобразователей обозначены $P_1 - P_4$.

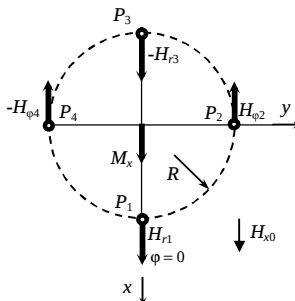


Рис. 2.

В соответствии с известной методикой [3], компоненты ММ определяются в соответствии с соотношениями:

$$M_x = E_x k R^3 / 6; \quad M_y = E_y k R^3 / 6; \quad M_z = E_z k R^3 / 4, \quad (1)$$

где M_x, M_y, M_z – компоненты вектора ММ в прямоугольной системе координат, приведенные для действующих значений; E_x, E_y, E_z – ЭДС, наводимые в измерительной системе при измерении соответствующих компонент ММ; k – коэффициент передачи первичного преобразователя измерительной системы, одинаковый для всех преобразователей; R – контрольное расстояние от центра измерительной системы (начала координат) до первичного преобразователя.

Величина R для рассматриваемой схемы измерений с четырьмя первичными преобразователями устанавливается равной

$$R = 1,5L, \quad (2)$$

где L – наибольший габаритный размер ЭО.

Соотношения (1) и (2) справедливы в случае, что погрешность измерений не превышает 0,1. Более подробную информацию методика измерений [3] не дает. В данной работе далее анализируется погрешность измерений рассматриваемой схемы преобразователей в зависимости от радиуса окружности на которых расположены преобразователи и расположение источников ВМП в пределах объема ЭО (ограниченном параллелепипедом с известными габаритными размерами).

Схемы электрического соединения обмоток первичных преобразователей при измерении компонент ММ приведены на рис. 3.

Цифровой индекс в обозначениях ЭДС соответствует номеру первичного преобразователя. ЭДС E_{x1} и E_{x3} формируются в обмотках первичных преобразователей Π_1 и Π_3 под действием радиальных компонент ВМП (в сферической системе координат):

$$E_{x1} \equiv H_{r1}; \quad E_{x3} \equiv -H_{r3}, \quad (3)$$

где H_{r1}, H_{r3} – радиальные компоненты вектора напряженности ВМП в точках P_1 и P_3 соответственно (рис. 2).

ЭДС E_{x2} и E_{x4} формируются в обмотках первичных преобразователей Π_2 и Π_4 под действием тангенциальных компонент ВМП (в сферической системе координат):

$$E_{x2} \equiv H_{\varphi2}; \quad E_{x4} \equiv -H_{\varphi4}, \quad (4)$$

где $H_{\varphi2}, H_{\varphi4}$ – тангенциальные компоненты вектора напряженности ВМП в точках P_2 и P_4 соответственно (рис. 2).

С учетом соотношений (3) и (4) суммарная ЭДС при измерении компоненты ММ M_x может быть представлена в виде

$$E_x \equiv H_{r1} - H_{r3} + H_{\phi 2} - H_{\phi 4} . \quad (5)$$

Аналогично может быть записано соотношение для суммарной ЭДС при измерении компоненты ММ M_y

$$E_y \equiv -H_{\phi 1} + H_{r2} + H_{\phi 3} - H_{r4} . \quad (6)$$

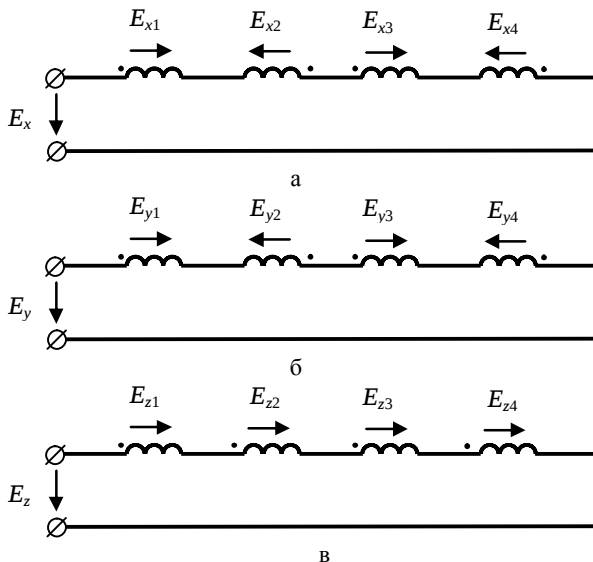


Рис. 3.

В рассматриваемой системе компенсация помех от удаленных внешних источников ВМП обеспечивается за счет взаимной компенсации сигналов пар первичных преобразователей. Так, для компенсации в измерительной системе составляющей сигнала от поля помех H_{x0} вдоль оси x обмотки первичных преобразователей ориентированы вдоль этой оси и электрически соединены как показано на рис. 3,а. Для компенсации составляющей сигнала от поля помех H_{y0} вдоль оси y обмотки первичных преобразователей ориентированы вдоль этой оси и электрически соединены как показано на рис. 3,б.

Достоинством рассматриваемой измерительной схемы с четырьмя первичными преобразователями является обеспечение компенсации составляющих полей помех внешних источников вдоль осей x и y за счет подходящего электрического соединения пар обмоток (аппаратурная реализация компенсации сигнала помехи в измерительной сис-

теме). Недостатком этой схемы является невозможность такой же компенсации составляющей сигнала поля помех H_{z0} по оси z (рис. 3,в). Компенсация этой составляющей помехи должна осуществляться с использованием других способов и в данной работе не рассматривается. В случае ЭО с малыми габаритными размерами, допускающими поворот относительно горизонтальной оси (например, автоматических выключателей), измерение вертикальной компоненты ММ проводится как для горизонтальной компоненты повернутого ЭО. В теоретическом плане для оценки влияния расположения источников ВМП внутри объема ЭО составляющей ЭДС для этой схемы определяется как

$$E_{z1} \equiv H_{\theta 1}; \quad E_{z2} \equiv H_{\theta 2}; \quad E_{z3} \equiv H_{\theta 3}; \quad E_{z4} \equiv H_{\theta 4}, \quad (7)$$

где $H_{\theta 1}, \dots, H_{\theta 4}$ – осевые составляющие вектора напряженности ВМП в точках $P_1 - P_4$.

Как видно из соотношения (7), рассматриваемая схема с четырьмя первичными преобразователями не обеспечивает взаимную компенсацию сигнала помехи от внешних источников.

Гармонический анализ суммарных сигналов поля первичных преобразователей. В качестве исходных используется выражения для компонент напряженностей поля, разложенных в ряд по сферическим гармоникам [4].

$$H_r = \sum_{n=1}^{\infty} (H_r)_n = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (n+1)(g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\cos \theta); \quad (8)$$

$$H_{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} (H_{\theta})_n = - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta};$$

$$H_{\varphi} = \sum_{n=1}^{\infty} (H_{\varphi})_n = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m(g_{nm} \sin m\varphi + h_{nm} \cos m\varphi) \frac{P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta},$$

где n, m – степень и порядок мультиполя; $(H_r)_n, (H_{\theta})_n, (H_{\varphi})_n$ – n -тые гармонические составляющие соответствующие компонент напряженности; g_{nm}, h_{nm} – коэффициенты мультиполей; (r, θ, φ) – сферические координаты точки наблюдения на поверхности базовой сферы, на которой определяются мультипольные коэффициенты; R – радиус контрольной сферы точек наблюдения; $P_n^m(\cos \theta)$ – присоединенные функции Лежандра первого рода.

Для плоскости xOy и из соотношения (8) ($\theta = \pi/2$) определяются соотношения связывающие компоненты напряженностей с дипольными коэффициентами ($n = 1$):

$$\begin{aligned}(H_r)_1 &= (2g_{11} \cos \varphi + 2h_{11} \sin \varphi); \\ (H_\theta)_1 &= g_{10}; \\ (H_\varphi)_1 &= (g_{11} \sin \varphi - h_{11} \cos \varphi).\end{aligned}\tag{9}$$

Связь дипольных коэффициентов с компонентами M_z , M_x , M_y ММ (в декартовой системе координат) дается известными соотношениями [5]:

$$g_{10} = M_z / 4\pi; \quad g_{11} = M_x / 4\pi; \quad h_{10} = M_y / 4\pi. \tag{10}$$

В табл. 1 приведены соотношения для компонент напряженности (сферическая система координат) в точках расположения первичных преобразователей ($i = 1-4$).

В соответствии со схемой соединения обмоток первичных преобразователей (рис. 3) формируются сигналы ЭДС по аналогии с (5) и (6), пропорциональные следующим величинам напряженности:

$$\begin{aligned}E_x &\equiv (H_{r1})_1 + (H_{\varphi2})_1 - (H_{r3})_1 - (H_{\varphi4})_1 = 2g_{11} + g_{11} + 2g_{11} + g_{11} = 6g_{11}; \\ E_y &\equiv -(H_{\varphi1})_1 + (H_{r2})_1 + (H_{\varphi3})_1 - (H_{r4})_1 = h_{11} + 2h_{11} + h_{11} + 2h_{11} = 6h_{11}.\end{aligned}\tag{11}$$

Таблица 1 – Дипольные составляющие гармоник для компонент напряженности в точках расположения первичных преобразователей.

Точка i	φ_i	$(H_{ri})_1$	$(H_{\theta i})_1$	$(H_{\varphi i})_1$
1	0	$2g_{11}$	g_{10}	$-h_{11}$
2	$\pi/2$	$2h_{11}$	g_{10}	g_{11}
3	π	$-2g_{11}$	g_{10}	h_{11}
4	$3\pi/2$	$-2h_{11}$	g_{10}	$-g_{11}$

С учетом (10) и (11) измеряемые компоненты ММ могут быть представлены в виде соотношений (1) при условии, что погрешность измерений равна нулю.

В общем случае соотношения (8), (9) и (11) могут быть использованы для оценки погрешности, вносимой в измеряемый полезный сигнал мультипольными составляющими ВМП ($n > 1$).

Методика измерений. Операции методики рассмотрим на примере измерений одной из компонент ММ, например по оси x . Методика включает следующие типовые операции:

1. Включение канала измерительной системы для измерений по оси x .

2. Установка первичных преобразователей на заданном расстоянии R от центра системы согласно рис. 1 и их ориентацию согласно рис. 2.

3. Компенсация в измерительной системе сигнала помех от источников ВМП, создающего градиентное поле в области измерений (между диаметрально противоположными первичными преобразователями).

4. Калибровка измерительной системы, включающая установку меры ММ (с известной величиной компоненты ММ по оси x) в центр измерительной системы, измерение величины ЭДС (E_{x0}) и определение коэффициента k передачи первичного преобразователя

$$k = \frac{6M_{x0}}{E_{x0}R^3},$$

где M_{x0} – ММ меры; E_{x0} – измеренная величина ЭДС.

5. Установка ЭО в центр измерительной системы (рис. 1).

6. Измерение ЭДС E_x .

7. Определение измеренной компоненты ММ по соотношению (1).

8. Оценка погрешности измерений.

Оценка погрешности измерений ММ. В случае, если величина расстояния R устанавливается исходя из рекомендаций методики [3], погрешность измерений составляет 0,1. Для исследовательских целей путем выбора большего расстояния R можно уменьшить погрешность измерений до уровня ограниченного чувствительностью измерительного прибора.

Относительная погрешность измерительной системы с одним первичным преобразователем, вызванная наличием мультипольных составляющих напряженности поля, может быть представлена в виде соотношения:

$$\delta_u = \frac{H_u - (H_u)_1}{H_u} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} (H_u)_n}{H_u}, \quad u = r, \theta, \varphi. \quad (12)$$

Относительная погрешность измерительной системы с четырьмя первичными преобразователями, вызванная наличием мультипольных составляющих напряженности поля, может быть представлена в виде соотношений:

$$\delta_x = \frac{H_{r1} - (H_{r1})_1}{H_{r1}} + \frac{H_{\varphi2} - (H_{\varphi2})_1}{H_{\varphi2}} - \frac{H_{r3} - (H_{r3})_1}{H_{r3}} - \frac{H_{\varphi4} - (H_{\varphi4})_1}{H_{\varphi4}}; \quad (13)$$

$$\delta_y = -\frac{H_{\phi 1} - (H_{\phi 1})_1}{H_{\phi 1}} + \frac{H_{r2} - (H_{r2})_1}{H_{r2}} + \frac{H_{\phi 3} - (H_{\phi 3})_1}{H_{\phi 3}} - \frac{H_{r4} - (H_{r4})_1}{H_{r4}}.$$

В отличие от соотношений (12), каждая из погрешностей соотношений (13) содержит по четыре составляющие, знаки которых соответствуют схеме соединения первичных преобразователей (рис. 3,а,б).

Полученные соотношения (13) могут быть использованы для расчета погрешностей измерительных систем с четырьмя первичными преобразователями при измерении компонент ММ ЭО, моделируемых токовыми контурами либо дипольными источниками.

Особенности компенсации помех от внешних источников магнитного поля. В данной работе приводится только справочная информация о компенсации помех в измерительной системе. В первых измерительных системах широко использовалась "аппаратурная" компенсация помех, обеспечиваемая за счет встречной пространственной направленности осей чувствительности соответствующих первичных преобразователей. Это видно и из схем расположения первичных преобразователей на рис. 2 при компенсации составляющей помехи по оси x от внешних источников. В последнее время для компенсации помехи используются электронные компенсаторы с запоминанием сигнала помехи перед началом измерений и воспроизведение компенсирующего сигнала в процессе измерений компонент ММ ЭО [6].

Выводы.

1. Проведен анализ методики измерений компонент дипольного магнитного момента электрооборудования с помощью измерительной системы с четырьмя первичными преобразователями, расположенными в горизонтальной плоскости. Получены соотношения для оценки погрешности измерений этих компонент, вызванной наличием мультипольных составляющих напряженности внешнего магнитного поля электрооборудования.

2. Предложены аналитические соотношения для компонент дипольного магнитного момента в функции комбинации радиальных и тангенциальных сферических компонент напряженности внешнего магнитного поля в точках расположения четырех первичных преобразователей измерительной системы.

3. Методика может быть рекомендована для измерения трех компонент магнитного момента электрооборудования, допускающего поворот относительно горизонтальной оси при проведении измерений. Тем самым обеспечивается компенсация помехи внешних источников поля.

Список литературы: 1. IEC 1000-4-8: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p. 2. 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. 3. Приложение к Методике контроля и нормирования магнитных моментов корабельного оборудования: МКММ-73. – Л.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1973. – 43 с. 4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1964. – 446 с. 5. Розов В.Ю., Луников В.С. Прогнозирование магнитного поля, создаваемого полупроводниковыми преобразователями // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №5. – С. 129-136. 6. Луников В.С., Зачепа Ю.А. Автоматическая компенсация сигнала помехонесущего поля питающего кабеля при измерении магнитного момента электрооборудования // Технічна електродинаміка. – 1998. – №3. – С. 70-73.



Король Елена Геннадьевна, ассистент кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "ХПИ". Защитила диплом магистра с отличием в 2004 г. по специальности электрические машины и аппараты.

Научные интересы связаны с проблемой электромагнитной совместимости в части магнитных полей.



Луников Валерий Сергеевич, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1973, 1987 и 2004 гг. С 1973 по 1998 гг. работал в области магнетизма технических объектов. Заведующий кафедрой "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2005 г.

Научные интересы связаны с проблемами электромагнитной совместимости технических средств, магнетизмом технических объектов, магнитной левитацией, физическими полями электрических аппаратов.



Середа Александр Григорьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".

Научные интересы связаны с исследованием проблем энергосбережения в электрических аппаратах.

Надійшла до редколегії 06.08.2010

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2010. № 36