

# ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА КОНТУРНЫМИ СИСТЕМАМИ С ВРАЩЕНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

**А. В. Гетьман**

Кандидат технических наук, заведующий отделом  
Отдел №20

Научно-технический центр магнетизма технических  
объектов НАН Украины  
ул. Индустриальная, 19, г. Харьков, Украина, 61109  
Контактный тел.: (0572) 99-11-75  
E-mail: ntcmt@ukrpost.ua

*Проведено аналіз похибки визначення магнітного моменту, за допомогою математичної обробки магнітних сигнатур поворотання технічного об'єкту, зафіксованих контурною вимірною системою*

*Ключові слова: магнітний момент, сигнатура магнітного потоку*

*Проведен анализ погрешности определения магнитного момента, с помощью математической обработки магнитных сигнатур вращения технического объекта, зафиксированных контурной измерительной системой*

*Ключевые слова: магнитный момент, сигнатура магнитного потока*

*The error of definition of a moment magnet, with the help of mathematical processing of magnetic signatures of rotation of the technical object captured by the circuit measuring system is examined*

*Key words: magnetic moment, signature of magnetic flux*

## 1. Введение

Практическая задача измерения величины магнитного момента технического объекта является актуальной для космической и авиационной промышленности при решении проблем магнитной совместимости и обеспечении магнитной чистоты [1]. Современной тенденцией этих проблем является снижение нормируемого уровня магнитного момента технического объекта, что приводит к предъявлению более жестких требований к погрешности измерений.

Поскольку магнитный момент является опосредованно измеряемой величиной, то достоверность получаемых результатов зависит как от инструментальной погрешности, так и от методичной погрешности обработки данных непосредственно измеренных величин [2]. Очевидно, что задача снижения погрешности измерений магнитного момента технического объекта может успешно решаться лишь при комплексном подходе к разработке новых измерительных систем и соответствующих методик измерения.

Одним из перспективных направлений повышения достоверности измерения удельно-малых значений магнитного момента технических объектов (ТО), является разработка методов и средств измерения на основе пространственного гармонического анализа магнит-

ного поля. В частности представляет практический интерес создание контурных измерительных систем магнитных сигнатур - зависимости магнитного потока от положения ТО относительно измерительного контура [3]. Так в работах [3-4] показано, что применение контурных систем с линейным перемещением технического объекта через измерительный контур позволяет существенно снизить методическую погрешность по сравнению с системами на основе точечных датчиков.

Альтернативой измерительным системам с линейным перемещением технического объекта является система, основанная на измерении магнитной сигнатуры при повороте источника магнитного момента внутри измерительного контура.

Целью работы является теоретическая оценка величины методической погрешности измерения магнитного момента системами на основе вращения технического объекта внутри кругового измерительного контура.

## 2. Постановка задачи

Представим ТО его упрощенной магнитной моделью в виде источника дипольного магнитного момента, произвольно ориентированного и смещенного

внутри технического объекта. При этом габариты технического объекта должны быть в несколько раз меньше диаметра кругового измерительного контура для обеспечения возможности вращения ТО с помощью специального поворотного устройства. Тогда упрощенная модель вращения ТО с дипольным магнитным моментом  $M$  может быть иллюстрирована рис. 1.

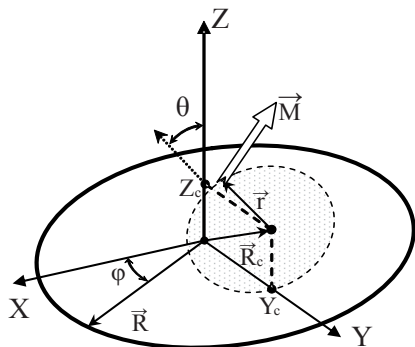


Рис. 1. Геометрические параметры кругового измерительного контура и положения дипольного магнитного момента

Согласно рис. 1, были выбраны следующие геометрические параметры:

$R$  – радиус кругового измерительного контура, для оценочных расчетов принят равным 2,23 м;

$r$  – расстояние от диполя до оси вращения, которая, для простоты выкладок, выбрана параллельной оси ординат в системе координат, связанной с центром измерительного контура;

$\theta$  – угол поворота, откладываемый в плоскости вращения дипольного магнитного момента от нормали к контуру;

$Y_c$  – ордината плоскости вращения дипольного магнитного момента;

$Z_c$  – аппликата оси вращения ТО.

Откуда для радиус-вектора  $R_c$  положения центра вращения диполя справедливо:

$$R_c = \sqrt{(Y_c)^2 + (Z_c)^2} \tag{1}$$

Для декартовых проекций  $M_x, M_y, M_z$  начального положения произвольно ориентированного диполя при его вращении справедливо представление:

$$\vec{M} = (M_x \cos\theta + M_z \sin\theta, M_y, M_z \cos\theta - M_x \sin\theta) \tag{2}$$

Считая относительную магнитную проницаемость воздуха равной единице, для магнитного потока  $\Phi$ , сцепленного с измерительным контуром, справедливо выражение

$$\Phi = \oint_L (\vec{A})_\varphi R d\varphi, \tag{3}$$

где  $A$  – векторный потенциал, определяемый по формуле [5]

$$\vec{A} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \vec{M} \times \text{grad} \left( \frac{1}{|\vec{R} - \vec{R}_c - \vec{r}|} \right) \tag{4}$$

### 3. Методика обработки магнитной сигнатуры

Из формул (3-4) вытекает, что магнитный поток может быть представлен как функция угла поворота технического объекта (дипольного магнитного момента) внутри кругового измерительного контура.

В самом простейшем варианте геометрии – центральном положении диполя ( $r=0, Y_c=0, Z_c=0$ ) выражение для магнитного потока принимает вид:

$$\Phi(\theta) = \frac{\mu_0}{2R} \{M_z \cos\theta - M_x \sin\theta\}, \tag{5}$$

что дает возможность практически определять величины двух декартовых проекций магнитного момента (в привязке к начальному положению ТО) с помощью интегральной обработки зафиксированной контурной измерительной системой магнитной сигнатуры  $\Phi(\theta)$ :

$$M_x = -\frac{2R}{\pi\mu_0} \int_0^{2\pi} \Phi(\theta) \sin(\theta) d\theta; M_z = \frac{2R}{\pi\mu_0} \int_0^{2\pi} \Phi(\theta) \cos(\theta) d\theta. \tag{6}$$

Для определения  $M_y$  необходимо аналогично обработать вторую магнитную сигнатуру для  $M_x$ , зафиксированную при ориентации оси ординат ТО (предварительного поворота) в направлении оси OX в соответствии с рис. 1, при неизменяемом направлении оси аппликат относительно измерительного контура.

Таким образом, практическое определение трех проекций магнитного момента с помощью контурной измерительной системы сводится к математической обработке по формулам (6) двух сигнатур магнитного потока, зафиксированных для двух разных начальных положений источника.

### 4. Погрешность определения магнитного момента

Полученные из формул (3-4) компактные соотношения (5-6) для центрально расположенного источника магнитного момента при наличии смещения диполя относительно центра измерительного контура принимают громоздкий вид, содержащий эллиптические интегралы:

$$M_x^{\text{изм}} = -\frac{R^2}{2\pi^2} \oint \oint \frac{M_x^{\text{ист}} \{ [Y_c \sin(\phi) - R] \sin(\theta) + [r + Z_c \cos(\theta)] \cos(\phi) \}}{|\vec{R} - \vec{R}_c - \vec{r}|^3} \sin(\theta) d\theta d\phi, \tag{7}$$

$$M_z^{\text{изм}} = \frac{R^2}{2\pi^2} \oint \oint \left[ \frac{M_z^{\text{ист}} \{ [R - Y_c \sin(\phi)] \cos(\theta) + Z_c \cos(\phi) \sin(\theta) \}}{|\vec{R} - \vec{R}_c - \vec{r}|^3} + \frac{M_y^{\text{ист}} \{ r \cos(\theta) \sin(\phi) + Z_c \sin(\phi) \}}{|\vec{R} - \vec{R}_c - \vec{r}|^3} \right] \cos(\theta) d\theta d\phi. \tag{8}$$

Расчеты на основе формул (7-8) проведены с помощью математического пакета MathCAD и представлены ниже в виде графиков зависимости от геометриче-

ских параметров смещения методической погрешности  $\Delta$ , определяемой как:

$$\Delta = \left| \frac{M_{изм} - M_{ист}}{M_{ист}} \right| \cdot 100\% \quad (9)$$

При наличии смещения несколько изменяется синусоидальность магнитной сигнатуры, вид которой для смещенного на  $r=0,5$  м диполя показан на рис. 2.

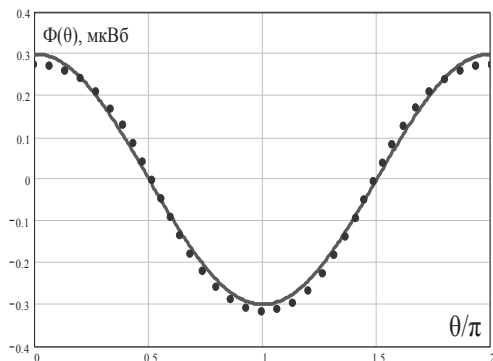


Рис. 2. Изменение вида сигнатуры при наличии смещения у диполя

Такое отклонение от синусоидальной функциональной зависимости магнитного потока от угла поворота является причиной методической погрешности определения магнитного момента при использовании методики на основе (6). При этом величина методической погрешности в общем случае определяется вкладами двух составляющих. Первая составляющая методической погрешности, определяемая по (7) и первым слагаемым справа в (8), вызвана исключительно смещением дипольного источника относительно центра измерительного контура и не зависит от соотношений величин проекций магнитного момента. Вторая составляющая методической погрешности, определяемая вторым слагаемым справа в (8), вызвана влиянием неизмеряемой проекции магнитного момента (в нашем случае  $M_y^{ист}$ ) на результат измерения проекции  $M_z^{изм}$  (для проекции  $M_x^{изм}$  в нашем случае ориентации начального положения смещенного диполя такой эффект отсутствует).

Однако следует отметить, что применение методики определения на основе (6) позволяет полностью исключить взаимное влияние измеряемых проекций  $M_x^{изм}$  и  $M_z^{изм}$  на результат, независимо от величины и характера смещения источника магнитного момента.

Поскольку методическая погрешность является функциональной зависимостью нескольких геометрических параметров смещения диполя, то ниже рассмотрим характерные варианты с разными наборами максимальных значений постоянных параметров, при изменяющемся значении расстояния диполя до оси вращения ( $r=0 \div 0,5$  м).

Рассмотрим вариант вращения смещенного диполя при смещенной относительно плоскости измерительного контура оси вращения ( $Y_c=0, Z_c \neq 0$ ). В этом случае отсутствует эффект влияния неизмеряемой проекции магнитного момента на результат. Методическая погрешность определяется исключительно параметрами отклонения диполя от центра измерительного контура. Зависимость методической погрешности от расстояния

диполя до оси вращения представлена на рис. 3 для значений аппликаты оси вращения  $Z_c=0,1$  м,  $0,25$  м,  $0,5$  м.

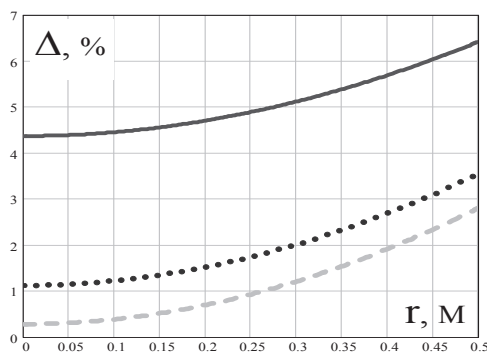


Рис. 3. Погрешность при смещении оси вращения на расстояния 0,1 м, 0,25 м, 0,5 м от плоскости измерительного контура

В другом варианте смещения плоскости вращения вдоль оси ординат ( $Y_c \neq 0, Z_c = 0$ ) следует учитывать влияние величины компоненты  $M_y^{ист}$  на результат измерения  $M_z^{изм}$  (поскольку на измерение проекции  $M_x^{изм}$  он не влияет). Поэтому, для определенности в расчетах, было положено  $M_y^{ист} = M_z^{изм}$ . Зависимость методической погрешности от расстояния диполя до оси вращения представлена на рис. 4 для значений ординаты плоскости вращения  $Y_c=0,1$  м,  $0,25$  м,  $0,5$  м.

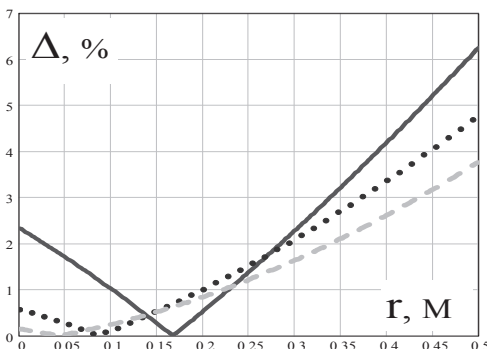


Рис. 4. Погрешность при смещении плоскости вращения источника на расстояния 0,1 м, 0,25 м, 0,5 м от центра измерительного контура

Таким образом, анализ методической погрешности определения величины дипольного источника на основе сигнатур магнитного потока, полученных при вращении ТО внутри кругового контура, показал возможность применения описанной методики определения магнитного момента ТО. При этом величина методической погрешности практического определения магнитного момента ТО будет соответствовать современным требованиям при испытаниях ТО с габаритными размерами до полурадиуса круговой контурной обмотки измерительной системы.

## 5. Выводы

В работе проведен анализ методической погрешности определения магнитного момента на основе магнитных сигнатур вращения произвольно смещенного дипольного источника.

Установлено, що в общем случае смещения вращаемого диполя в методической погрешности его определения присутствуют две составляющие. Первая зависит только от геометрических параметров смещения, а вторая отлична от нуля лишь при некоторых направлениях смещения дипольного источника и зависит от величины другой неизмеряемой проекции магнитного момента.

Показано, что при отношении величины смещения диполя к радиусу измерительного контура не более чем один к четырем величина методической погрешности не превысит 7%.

Таким образом, величина методической погрешности при использовании контурной измерительной системы на основе магнитных сигнатур вращения технического объекта в 1,5-2 раза меньше погрешности аналогичных по габаритам систем на основе «точечных» датчиков магнитной индукции.

*Описано можливості застосування новітніх матеріалів (зокрема, наноматеріалів) у електрохемілюмінесцентному (ЕХЛ) аналізі. Розглянуто типи наноматеріалів, специфіку фізико-хімічної поведінки, ряд унікальних властивостей, що обумовлюють перспективність їхнього використання у ЕХЛ-сенсорах*

*Ключові слова: електрохемілюмінесценція, наноматеріали, квантові точки*

*Описаны возможности использования новейших материалов (в частности, наноматериалов) в электрохемилуминесцентном (ЭХЛ) анализе. Рассмотрены типы наночастиц, специфика их физико-химического поведения, ряд уникальных свойств, обеспечивающих перспективность их применения в ЭХЛ-сенсорах*

*Ключевые слова: электрохемилуминесценция, наноматериалы, квантовые точки*

*Possibilities of the newest materials using (in particular, nanomaterials) in electrochemiluminescent (ECL) analysis are described. The nanoparticles types, specificity of their physical and chemical behavior, and a number of the unique properties providing perspectivity of their application in ECL sensor are considered*

*Keywords: electrochemiluminescence, nanomaterials, quantum dots*

## Литература

1. Holmes John J. Theoretical Development of Laboratory Techniques For Magnetic Measurement of Large // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. - Vol.37, № 5. – P. 3790-3797.
2. Волохов С.А., Ивлева Л.Ф. Методическая погрешность измерений магнитного момента // Технічна електродинаміка. -1996. -№ 4. –С. 72-74.
3. Тетьман А.В. Определение пространственных гармоник магнитного поля вблизи поверхности технического объекта // Электричество. – 2005. –№1. –С. 55-60.
4. Розов В.Ю., Тетьман А.В. Структура контурных динамических систем для практического гармонического анализа магнитного поля технических объектов // Техническая электродинамика. – 2008.- Тематический выпуск. Ч. 3. Проблемы современной электротехники. –С. 97-100.
5. Шимони К. Теоретическая электротехника. -М.: Мир, 1964. -774 с.

УДК 53.085.5:535.621.373.826

# НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ В ЕЛЕКТРОХЕМІ- ЛЮМІНЕСЦЕНТНОМУ АНАЛІЗІ

**К. М. Музика**

Старший науковий співробітник  
Кафедра біомедичних електронних пристроїв та систем  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166  
E-mail: mkm@kture.kharkov.ua

## 1. Вступ

Електрохемілюмінесцентний аналіз відноситься до одного з найчутливіших методів аналізу, межа вияв-

лення якого становить фемтомолі [1] Подальший процес у розвитку ЕХЛ-методу пов'язаний з поліпшенням його аналітичних характеристик за рахунок освоєння й використання **нових типів електродних матеріалів і**