

УДК 621.317.44

КАТУШКИ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ

Добродеев П.Н., Волохов С.А.

Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, г. Харьков, Украина

Определена оптимальная конфигурация сдвоенных катушек Гельмгольца для измерения дипольных магнитных моментов. Установлено, что измерительные катушки должны быть круглыми, а компенсационные – квадратными. Аналитически подтверждена целесообразность применения предложенной конфигурации катушек в качестве первичного измерительного преобразователя дипольных магнитных моментов.
(E-mail: dobrod@list.ru)

Ключевые слова: магнитный момент, селектирующие катушки, чувствительность, помехоустойчивость, избирательность.

Введение

Измерение магнитных моментов технических объектов, например космических аппаратов [1] или судового оборудования [2], стало частью технологического процесса их промышленного производства. Разработка необходимых средств измерений и, в частности, первичного измерительного преобразователя (ПИП) магнитных моментов представляет сложную научно-техническую задачу. ПИП служит для преобразования магнитного поля изделия в сигнал измеряемого параметра, удобный для дальнейших преобразований, обработки, индикации, хранения или передачи. Он должен иметь нормативные метрологические характеристики. Такой ПИП представляет собой весьма громоздкое устройство, так как должен охватывать объект испытаний и не препятствовать его свободному доступу в рабочее пространство. Наиболее перспективными на сегодня являются ПИП на основе селектирующих катушек, а из них самыми удобными в эксплуатации являются ПИП статических измерительных устройств, в которых измерения выполняются при взаимно неподвижном положении селектирующих катушек и объекта испытаний. Целью настоящей работы является определение оптимальной конфигурации ПИП статического измерительного устройства в виде сдвоенных катушек Гельмгольца для измерения магнитных моментов технических объектов.

Первичный измерительный преобразователь магнитных моментов из катушек Гельмгольца

Катушками Гельмгольца (КГ) называют, в частности: 1) пару круглых катушек (колец) с одинаковым числом витков W и одинаковым диаметром D , расположенных соосно на расстоянии $L_1 = 0,5D$ друг от друга; 2) пару квадратных катушек с одинаковым числом витков и одинаковой стороной A , расположенных соосно на расстоянии $L_2 = A/1,5^{1,5} = 0,544 A$ [3]. Использование КГ и других катушек (мер, эталонов) магнитной индукции для измерения магнитных моментов основано на том, что электромагнитная связь КГ и магнитного диполя (элементарной токовой петли) остается неизменной при положении магнитного диполя в любой точке зоны равномерного магнитного поля. Это положение напрямую вытекает из известного в теоретической электротехнике равенства взаимной индуктивности контуров: $M_{12} = M_{21}$. Таким образом, если объект испытаний находится в пределах рабочего пространства (объема равномерного поля), его магнитный момент может быть определен по наведенному сигналу в катушках, используемых в качестве ПИП, вне зависимости от распределения магнитных диполей в объеме объекта испытаний. Особенности связаны с тем, что сигналы от магнитного момента объекта испытаний бывают соизмеримы с сигналами от нестабильности магнитной обстановки в

зоне испытаний. Поэтому для повышения помехозащищенности средства измерений, наряду с обеспечением определенных требований к магнитной обстановке в зоне испытаний, используются безмоментные ПИП. Лучшим безмоментным ПИП является трехкатушечный [4]. Однако для измерения трех компонент магнитного момента с одной установки объекта испытаний необходимо иметь три ПИП, ориентированных по трем ортогональным осям. Но поскольку при этом центральная катушка будет препятствовать свободному доступу объекта в рабочее пространство, такой ПИП не может быть использован. В этом случае целесообразно использовать безмоментный ПИП из катушек Гельмгольца [5]. Сдвоенные КГ расположены соосно, имеют одинаковую суммарную площадь витков и включены встречно. Внутренние КГ имеют меньшие габариты и называются измерительными, а наружные КГ имеют большие габариты и называются компенсационными. Из этих двух типов КГ можно составить 4 конфигурации безмоментных ПИП магнитных моментов: измерительные и компенсационные КГ круглые; измерительные и компенсационные КГ квадратные; измерительные КГ круглые, компенсационные – квадратные; измерительные КГ квадратные, компенсационные – круглые. На рисунке 1 изображен безмоментный ПИП по одной из указанных конфигураций.

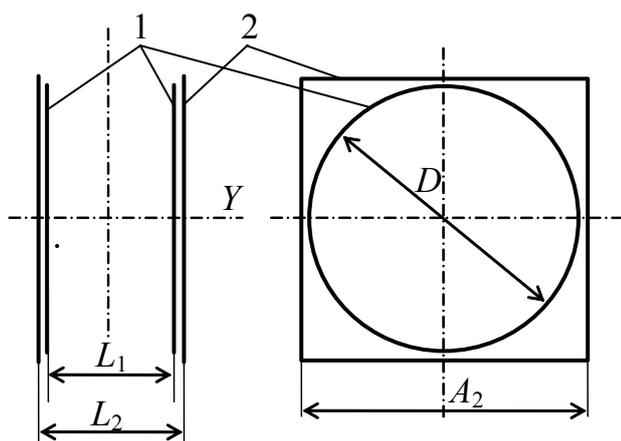


Рисунок 1 – Безмоментный первичный измерительный преобразователь из катушек Гельмгольца конфигурации «круг/квадрат»: 1 – измерительные круглые катушки Гельмгольца; 2 – компенсационные квадратные катушки Гельмгольца

Магнитный поток Φ от расположенного в центре магнитного момента m равен:

– через круглые катушки Гельмгольца:

$$\Phi = 1,8 \cdot m \cdot W/D, \quad (1)$$

– через квадратные катушки Гельмгольца:

$$\Phi = 1,63 \cdot m \cdot W/A. \quad (2)$$

На основе этих формул и из условия равенства суммарной площади витков W измерительных и компенсационных КГ легко получить формулы для магнитного потока через любой ПИП из указанных выше конфигураций.

Сравнительная оценка ПИП различных конфигураций выполнена при следующих условиях, вытекающих из практики измерений магнитных моментов технических объектов. Обычно объект испытаний доставляется в рабочее пространство ПИП на транспортной тележке. Окно для проезда тележки с объектом испытаний ограничивается по ширине и высоте расстоянием между измерительными катушками L_1 . Из этого получим, что при разных конфигурациях ПИП и одинаковых размерах окна диаметр окружности и сторона квадрата измерительного контура относятся как: $D/A = 0,544/0,5 = 1,09$. Отношение продольных габаритов измерительных и компенсационных катушек примем равным $L_1/L_2 = 0,8$. При этих условиях выполнены расчеты чувствительности ПИП единичного диаметра на виток измерительной катушки: $(\Phi \cdot D)/(m \cdot W)$. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

Чувствительность первичного измерительного преобразователя различных конфигураций

Конфигурация КГ (измерительные/компенсационные)	1 (круг/круг)	2 (квадрат/квадрат)	3 (круг/квадрат)	4 (квадрат/круг)
Приведенная чувствительность	0,88	0,87	1,15	0,5

Из таблицы следует, что наилучшим является безмоментный ПИП конфигурации «круг/квадрат». Его чувствительность выше чувствительности ПИП конфигураций «круг/круг» и «квадрат/квадрат» примерно в 1,3 раза, а конфигурации «квадрат/круг» – в 2,3 раза.

Метрологические характеристики первичного измерительного преобразователя конфигурации «круг/квадрат»

Основными характеристиками ПИП магнитных моментов являются [6]: чувствительность, помехоустойчивость, избирательность и рабочее пространство.

Чувствительность. Магнитный момент, размещенный в рабочем пространстве ПИП, создает магнитный поток, часть которого Φ сцеплена с контурами ПИП. Отношение этого магнитного потока Φ к создавшему его магнитному моменту m и определяет чувствительность ПИП. Она зависит от размеров ПИП и числа витков W . Для безмоментного ПИП «круг/квадрат» чувствительность по данным таблицы определяется формулой:

$$\Phi/m = 1,15 \cdot W/D. \quad (3)$$

В качестве метрологической характеристики чувствительность имеет свою величину для каждого из ортогональных контуров X , Y , Z , носит название «постоянная ПИП» и обозначается k_i , где $i = X, Y, Z$. Значение постоянной ПИП равно значению постоянной катушек индукции этой же конфигурации. Это обусловлено известным равенством взаимных индуктивностей ($M_{12} = M_{21}$) и подтверждается взаимным переходом размерностей:

$$k = \frac{\Phi}{m} \succ \frac{Вб}{А \cdot м^2} = \frac{Tл \cdot м^2}{А \cdot м^2} = \frac{Tл}{А} \prec \frac{В}{I} = k_B. \quad (4)$$

Чтобы при проектировании ПИП правильно установить чувствительность (постоянную ПИП) необходимо учесть следующие факторы:

– уровни измеряемых магнитных моментов (например, для космических аппаратов они находятся в диапазоне 0,1–10 А·м², для комплектующих их изделий – в диапазоне 0,01–1 А·м²);

– высокие требования к точности измерений (погрешность не более 1–5 %);

– дрейф нуля современных флюксометров, который составляет порядка 1 мкВб за время одного наблюдения и представляет только часть допустимой погрешности.

При взвешенном подходе величина чувствительности должна быть порядка 100 мкВб/А·м² для космических аппаратов и 1000 мкВб/А·м² для комплектующих их изделий.

Помехоустойчивость. Учитывая, что в окружающем объект пространстве существуют магнитные поля других источников, ПИП также способен их обнаруживать. Преобразованные в сигнал измеряемого параметра, т.е. в сигнал магнитного момента объекта испытаний, они представляют помеху от магнитной обстановки в зоне испытаний.

Метрологической характеристикой, определяющей помехоустойчивость ПИП, является «магнитный момент нулевого объекта» – это результат измерений не обладающего магнитным моментом объекта в соответствии с предусмотренными методикой измерений процедурами. Это также характеристика помехозащитности средства измерений, определяющая его порог чувствительности, т.е. абсолютную погрешность измерений центрального диполя.

Помехозащитность ПИП в первую очередь обеспечивается его безмоментностью, т.е. равенством суммарных площадей витков измерительного и компенсационного контуров: $W_1 S_1 = W_2 S_2$. В однородном магнитном поле или магнитном поле с однородным градиентом индукции магнитные потоки в измерительном и компенсационном контурах равны и сигнал помехи отсутствует. Поэтому сигнал помехи связан с местными источниками, расположенными в окружении ПИП. Такими источниками являются, в частности, тестовые катушки индукции, которые служат для установки в зоне испытаний заданной индукции магнитного поля, в том числе компенсации магнитного поля Земли при установке «нулевого поля», а также могут быть:

– неподвижные ферромагнитные массы, расположенные вблизи ПИП и искажающие магнитное поле Земли и его вариации (например, пульта управления с ферромагнитной обшивкой);

– подвижные ферромагнитные массы (например, находящиеся поблизости транспортные средства), магнитный поток которых, связанный с ПИП, изменяется при их движении;

– технологические источники поля (например, токовые контуры при сварке);

– электротранспорт, имеющий большой рабочий ток и большие токовые контуры.

Разные руководящие документы устанавливают различные требования к магнитной обстановке в зоне испытаний. Например, стандарт США *MIL-STD-2142A* [7] устанавливает следующие общие требования: «4.5.1 Местоположе-

ние. Средства магнитных испытаний должны быть расположены в магнитно-чистых областях. Магнитно-чистая область определена как область, где окружающее магнитное поле изменяется не больше чем на 1 нТл в течение всего времени испытаний, и где металлические материалы удалены от датчика магнитного поля не меньше чем на 4,6 м. Область со скомпенсированным окружающим полем (любого значения) определена как магнитно-чистая, пока контролируемое поле устойчиво в пределах 1 нТл в течение всего времени испытаний».

Это очень жесткие, практически невыполнимые требования, особенно если учесть, что минутные вариации магнитного поля Земли в магнитных обсерваториях даже в условиях спокойной магнитной обстановки обычно находятся на уровне нескольких нТл. Поэтому установление ограничений на «магнитный момент нулевого объекта» является метрологически более правильным. Эти ограничения, по сути, устанавливают допустимое воздействие магнитной обстановки в зоне испытаний и могут быть обоснованы применительно к используемому ПИП, диапазону измеряемых магнитных моментов и принятой точности их измерений.

Безмоментные ПИП из селективирующих катушек, в том числе катушек Гельмгольца, обладают самой высокой помехоустойчивостью из всех известных ПИП магнитного момента. Поэтому принятие «магнитного момента нулевого объекта» в качестве метрологической характеристики ПИП может упростить и облегчить требования к магнитной обстановке.

Следует отметить, что обеспечение помехозащищенности безмоментных ПИП от переменного магнитного поля требует дополнительных исследований, связанных с возможным ее нарушением из-за отличия фаз сигналов измерительного и компенсационного контуров.

Избирательность и рабочий объем. Рассматриваемый ПИП обеспечивает измерение дипольного магнитного момента, который по определению является вектором, характеризующим магнитный диполь. А магнитный диполь – это объект, создающий на больших по сравнению с его размерами расстояниях распределение магнитного поля, идентичное распределению поля плоского контура тока, элементарного магнита или равномерно намагниченного шара. Магнитное поле магнитного диполя спадает с удалением от него обратно пропорционально расстоянию в 3-й степени, рас-

пределение этого поля называют пространственной гармоникой магнитного диполя, или дипольной гармоникой.

В соответствии с мультипольной моделью источника [8] во внешнем магнитном поле объекта испытаний имеется бесконечный спектр пространственных гармоник, отличающихся пространственным распределением и степенью спада амплитуды с удалением от источника. Избирательность ПИП определяет его способность из бесконечного спектра пространственных гармоник выбрать (селектировать) первую – дипольную пространственную гармонику, определяющую дипольный магнитный момент объекта испытаний. Эта же мысль может быть выражена другими словами. Заранее неизвестно, сколько и где расположено магнитных диполей в объеме объекта испытаний. А средство измерений должно обеспечить измерение результирующего магнитного момента объекта испытаний с установленной точностью вне зависимости от месторасположения в нем магнитных диполей.

В качестве метрологической характеристики, определяющей избирательность ПИП по дипольному магнитному моменту или учитывающей вероятностный характер распределения магнитных диполей по объему объекта испытаний, является дисперсия (относительное изменение) постоянной в рабочем объеме ПИП δ_e [9]. Для двояных катушек Гельмгольца «круг/квадрат» дисперсия постоянной взята из [9] и приведена на рисунке 2, где d/D – относительное рабочее пространство ПИП, d – диаметр шара, представляющего рабочее пространство ПИП; D – диаметр круглой измерительной катушки ПИП; A – сторона квадратной компенсационной катушки.

В первом приближении дисперсия постоянной пропорциональна отношению D/A , что позволяет использовать приведенный график для ПИП с разными отношениями D/A .

Из рисунка 2 следует, что рабочее пространство ПИП связано с дисперсией постоянной, которая входит составной частью в погрешность измерений магнитного момента. Из соотношения размеров колец Гельмгольца и условия доставки объекта испытаний в рабочее пространство ПИП на тележке следует, что диаметр рабочего пространства ПИП $d < 0,5D$. Возвращаясь к рисунку 2, находим, что дисперсия постоянной в рабочем объеме ПИП при этом не превышает 2,5 % .

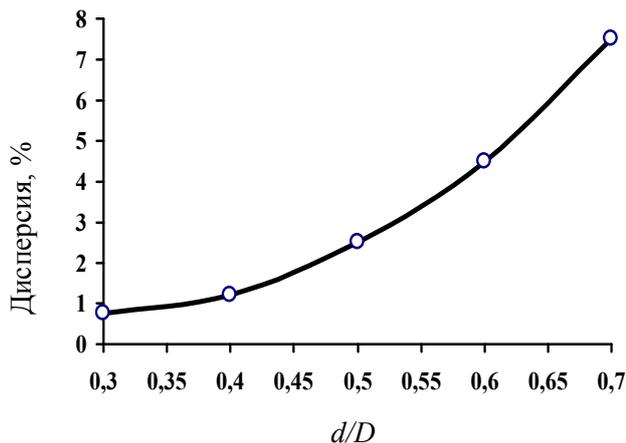


Рисунок 2 – Дисперсия постоянной безмоментного первичного измерительного преобразователя «круг/квадрат» (при отношении $D/A = 0,86$)

Если эту погрешность потребуется снизить, например, до уровня $\delta_g < 1\%$, относительное рабочее пространство ПИП по рисунку 2 составит $d/D < 0,37$, что при неизменном габарите тележки с объектом испытаний ведет к увеличению диаметра измерительных катушек.

Таким образом, особенности конфигурации безмоментного ПИП «круг/квадрат», ограничивающие его рабочий объем размером окна для въезда тележки с объектом испытаний, не вступают в противоречие с требованиями по избирательности, более того, способствуют достижению высокой точности измерений.

Заключение

Определена оптимальная конфигурация двояных катушек Гельмгольца для измерений магнитных моментов. Установлено, что измерительные катушки должны быть круглыми, а компенсационные – квадратными. Аналитически подтверждена целесообразность применения предложенной конфигурации катушек в качестве безмоментного первичного измерительного преобразователя магнитных моментов. Приведены результаты численной оценки основных метрологических свойств ПИП такой конфигурации: чув-

ствительности, помехоустойчивости, избирательности и рабочего пространства.

Список использованных источников

1. Kildishev, A.V. Measurement of the Spacecraft Main Magnetic Parameters. AUTOTESTCON'97 Conference Proceedings / A.V. Kildishev, S.A. Volokhov, J.D. Saltykov // IEEE systems readiness Technology Conference. September 22–25. – 1997. – Anaheim, California. – Pp. 669–675.
2. Волохов, С.А. Метрологическое обеспечение измерений магнитных параметров судового оборудования / С.А. Волохов [и др.] // Труды Второй международной конференции по судостроению (ISC'98). Секция Е. Том 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1998. – С. 28–34.
3. Афанасьев, Ю.В. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
4. Волохов, С.А. Совершенствование первичного индукционного преобразователя магнитного момента / С.А. Волохов, Л.Ф. Ивлева // Техническая электродинамика. – 1995. – № 6. – С. 66–69.
5. Студенцов, Н.В. Построение безмоментных мер магнитной индукции с однородным полем / Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев // Сб. науч. тр. НПО им. Д.И. Менделеева. – Л.: Энергоиздат. – 1983. – С. 7–13.
6. Гузев, С.Т. Метрологические характеристики магнитометрических антенн / С.Т. Гузев, В.И. Румакова, Н.В. Степанов // Труды Международной конференции по судостроению (ISC). Секция F. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1994. – С. 246–251.
7. MIL-STD-2142A. Magnetic silencing characteristics. Measurement of (metric). – Washington: – Naval Sea Systems Command (Ship Systems), 1990.
8. Розов, В.Ю. Мультипольная модель технического объекта и его магнитный центр / В.Ю. Розов [и др.] // Техническая электродинамика. – №2. – 2008. – С. 3–8.
9. Волохов, С.А. Методическая погрешность измерений магнитного момента / С.А. Волохов, Л.Ф. Ивлева // Техническая электродинамика. – 1996. – № 4. – С. 72–74.

Dobrodeyev P.N., Volkhov S.A.

Helmholtz coils for measuring magnetic moments

The optimal configuration of the double Helmholtz coils for measuring of the magnetic dipole moments was defined. It was determined that measuring coils should have round shape and compensative coils – the square one. Analytically confirmed the feasibility of the proposed configuration of these coils as primary transmitters of magnetic dipole moments. (E-mail: dobrod@list.ru)

Key words: magnetic moment, selective distributed winding, sensitivity interference immunity, selectivity.

Поступила в редакцию 15.07.2013.