

УДК 53.087.92

ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МАЛОГАБАРИТНОГО ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО МАГНИТОРЕЗИСТОРНОГО МАГНИТОМЕТРА

С.С. Сошин¹, М.С. Кустов¹, М.К. Дьячков²

¹Тверской государственный университет,

кафедра прикладной физики

²ООО "ВНИИГАЗ" (Москва)

Разработан малогабаритный переносной измеритель модуля магнитного поля на основе трёх первичных магниторезисторных преобразователей. Предложен метод градуировки магнитометра в однородном внешнем магнитном поле, позволяющий учитывать неортогональность магнитных осей и смещение нуля преобразователей. Устройство имеет возможность визуального контроля изменений измеряемых значений модуля магнитного поля в режиме реального времени. Выбор модуля поля в качестве контрольного параметра исключает зависимость результатов испытаний от ориентации магнитометра, что повышает производительность методов магнитного неразрушающего контроля магистральных газопроводов и облегчает работу оператора.

Введение. Измерение модуля слабых магнитных полей широко используется в исследованиях и приложениях [1; 2]. Наиболее востребованным является диапазон геомагнитного поля (20–80 мкТл), в котором ведутся разнообразные геофизические исследования и измерения, связанные с магнитной разведкой, – контроль трассы и состояния токонесущих кабелей и трубопроводов, поиски рудных тел, археологические изыскания, многочисленные виды военных разведок, такие, как обнаружение подводных лодок, мин и захороненных боеприпасов, поиски затонувших кораблей, создание охранных барьерных линий и др. В настоящее время наивысшие характеристики в измерении модуля слабых полей реализуются с помощью квантовых магнитометров с оптической накачкой парамагнитных атомов или ядер [1–3]. Вместе с тем квантовые магнитометры имеют высокую стоимость и сравнительно большую массу и габариты, что ограничивает их применение в полевых переносных приборах.

В связи с этим в настоящей работе была поставлена цель создания макета малогабаритного и простого в эксплуатации измерителя модуля вектора магнитного поля, ориентированного в основном на решение задач контроля трассы и дефектов магистральных трубопроводов.

Описание магнитометра. Для изготовления трехкомпонентного магнитометра в качестве первичных преобразователей были использованы магниторезисторные микросборки НМС1022 производства компании Honeywell [4]. Каждая микросхема НМС1022 состоит из двух магниторезистивных датчиков с взаимно перпендикулярными магнитными осями. Две микросхемы (четыре датчика) размещались на общем основании так, чтобы направления магнитных осей трех датчиков были взаимно

перпендикулярны (четвертый преобразователь не использовался). Схема расположения магниторезисторов представлена на рис. 1. Крепление микросхем осуществлялось на внутренние стороны уголка из фольгированного стеклотекстолита с нанесенной электрической разводкой. Отклонение магнитных осей от ортогональной ориентации не превышало 10° .

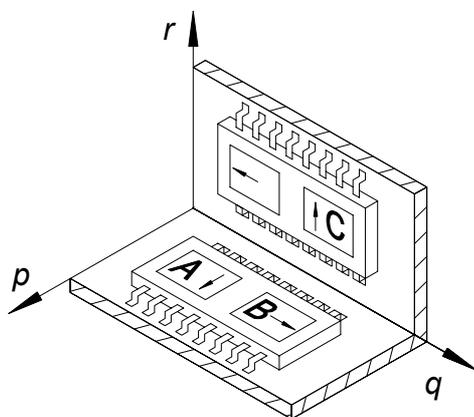


Рис. 1. Схема расположения микросхем НМС1022 в трехкомпонентном датчике. Орты системы координат pqr направлены вдоль осей чувствительности магниторезистивных преобразователей A , B и C соответственно. Система координат pqr не является ортогональной

Питание преобразователей осуществлялось источником стабилизированного напряжения 5 В, суммарный ток питания – 20 мА. Выходные сигналы каждого преобразователя поступали на независимые входы четырехканального аналого-цифрового преобразователя Е24 [5] (рис. 2).

Каждый магниторезистивный датчик представляет собой мост Уитстона. В общем случае плечи моста не сбалансированы, причем значение разбаланса не является постоянным и зависит от температуры. Для НМС1022 при напряжении питания 5 В разбаланс лежит в диапазоне от -10 до 10 мВ, а температурный коэффициент разбаланса составляет $5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

В диапазоне исследуемых полей с высокой степенью точности зависимость выходного сигнала (u) от поля можно представить в виде линейной функции

$$u = kB_l + \Delta, \quad (1)$$

где k – чувствительность датчика, Δ – разбаланс моста, B_l – проекция поля на ось чувствительности датчика.

Для корректировки напряжения разбаланса мост оснащен перемещающимися витками, с помощью которых можно инвертировать направление намагничивания каждого чувствительного элемента. При этом знак чувствительности преобразователя меняется на противоположный, а разбаланс моста остается постоянным. При цифровой обработке (вычитании значений сигнала, соответствующего разным направлениям намагниченности и делением разности на два) можно исключить разбаланс моста.

В результате зависимость выходного сигнала от поля будет описываться формулой

$$u = kB_l. \quad (2)$$

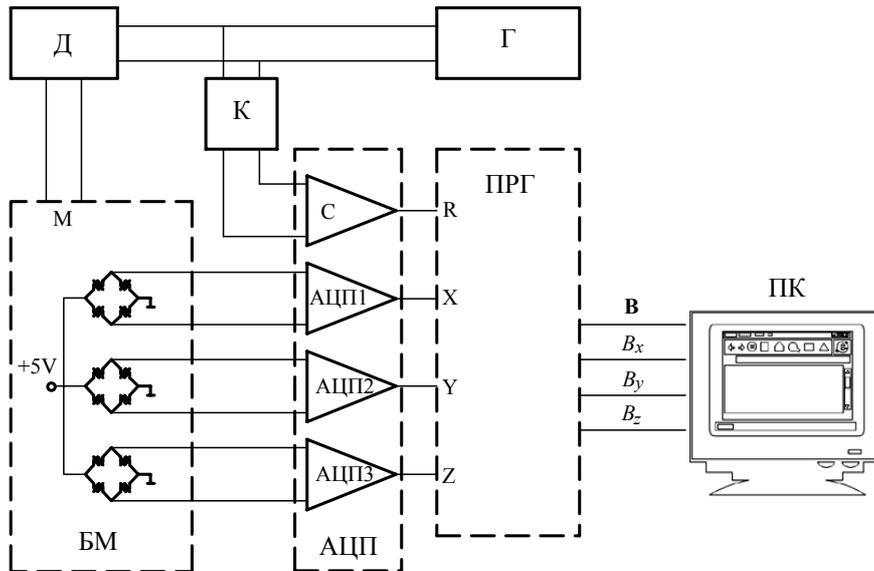


Рис. 2. Схема цифрового трехкомпонентного магнитометра: Г – генератор прямоугольных импульсов; Д – дифференциатор; К – оптический ключ; БМ – блок магниторезисторов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь E24; ПРГ – программа регистрации и обработки сигналов; ПК – портативная ЭВМ

Перемагничивание датчика осуществляется коротким токовым импульсом, создаваемым импульсным генератором. Генератор создает сигнал в форме меандра, который после прохождения через дифференциатор и усилитель тока поступает на перемагничивающие обмотки микросхемы. Частота генератора и соответственно частота следования импульсов перемагничивания составляла 5 Гц.

Выходной сигнал трехкомпонентного магнитометра с неортогональными магнитными осями. В общем случае магнитные оси преобразователей не ортогональны. Введем две системы координат: xuz – прямоугольная система и pqr – система, орты которой ориентированы вдоль магнитных осей трёх преобразователей (рис. 3). Модуль поля будет определяться выражением

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (3)$$

где B_x , B_y и B_z – проекции вектора \mathbf{B} на соответствующие оси системы xuz . Таким образом, из (2) и (3) видно, что для определения модуля магнитного поля, как функции выходных сигналов с преобразователей (u_p , u_q и u_r), необходимо выразить проекции B_x , B_y и B_z через проекции B_p , B_q , и B_r . Найдем эти соотношения.

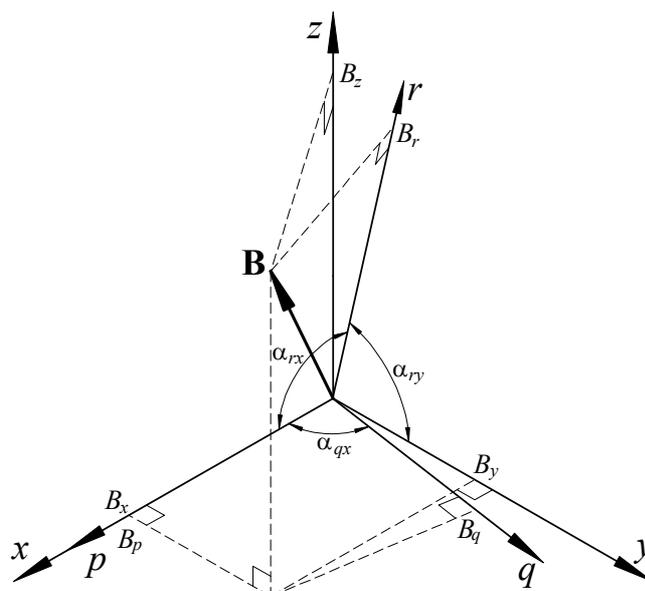


Рис. 3. Система координат pqr с ортами, коллинеарными магнитным осям преобразователей, и прямоугольная система xuz

Обозначим через l одну из осей системы pqr . Запишем скалярное произведение вектора \mathbf{B} и вектора $B_l \mathbf{e}_l$, где B_l – проекция \mathbf{B} на ось l , а \mathbf{e}_l – орт этой оси:

$$(B_l \mathbf{e}_l, \mathbf{B}) = B_l B \cos(\mathbf{e}_l, \mathbf{B}) = B_l B_l. \quad (4)$$

С другой стороны,

$$(B_l \mathbf{e}_l, \mathbf{B}) = B_l (e_{lx} B_x + e_{ly} B_y + e_{lz} B_z). \quad (5)$$

e_{lx}, e_{ly}, e_{lz} есть направляющие косинусы оси l в системе координат xuz :

$$\begin{aligned} e_{lx} &= \cos \alpha_{lx}, \\ e_{ly} &= \cos \alpha_{ly}, \\ e_{lz} &= \cos \alpha_{lz}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_{lx}, \alpha_{ly}, \alpha_{lz}$ – углы между осью l и соответственно осями x, y и z .

Из (4), (5) и (6) следует:

$$B_l = B_x \cos \alpha_{lx} + B_y \cos \alpha_{ly} + B_z \sin \alpha_{lz} \quad (7)$$

Запишем выражения для углов между осями систем координат pqr и xuz , учитывая построение и соотношение между направляющими косинусами ($\cos^2 \alpha_{lx} + \cos^2 \alpha_{ly} + \cos^2 \alpha_{lz} = 1$):

$$\begin{aligned} \alpha_{px} &= 0, \alpha_{py} = \frac{\pi}{2}, \alpha_{pz} = \frac{\pi}{2}, \\ \alpha_{qy} &= \frac{\pi}{2} - \alpha_{qx}, \alpha_{qz} = \frac{\pi}{2}, \\ \alpha_{rz} &= \arccos \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{rx} - \cos^2 \alpha_{ry}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Последовательно подставляя в (7) p , q и r вместо l и учитывая (8), получим:

$$\begin{aligned} B_p &= B_x, \\ B_q &= B_x \cos \alpha_{qx} + B_y \sin \alpha_{qx}, \\ B_r &= B_x \cos \alpha_{rx} + B_y \cos \alpha_{ry} + B_z \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{rx} - \cos^2 \alpha_{ry}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Выразим B_x , B_y и B_z из системы (9) и с учетом соотношения (2) запишем:

$$\begin{aligned} B_x &= b_1 u_p, \\ B_y &= b_2 u_q + b_3 u_p, \\ B_z &= b_4 u_r + b_5 u_q + b_6 u_p, \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты b_1, b_2, \dots, b_6 определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{k_p}, \\ b_2 &= \frac{1}{k_q \sin \alpha_{qx}}, \\ b_3 &= -\frac{\cos \alpha_{qx}}{k_p \sin \alpha_{qx}}, \\ b_4 &= \frac{1}{k_r \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{rx} - \cos^2 \alpha_{ry}}}, \\ b_5 &= -\frac{\cos \alpha_{ry}}{k_q \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{rx} - \cos^2 \alpha_{ry}} \sin \alpha_{qx}}, \\ b_6 &= -\frac{1}{k_p} \left(\frac{\cos \alpha_{rx}}{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{rx} - \cos^2 \alpha_{ry}}} - \frac{\cos \alpha_{qx} \cos \alpha_{ry}}{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{rx} - \cos^2 \alpha_{ry}} \sin \alpha_{qx}} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Квадрат значения поля

$$\begin{aligned} B^2 &= (b_1^2 + b_3^2 + b_6^2) u_p^2 + (b_2^2 + b_5^2) u_q^2 + b_4^2 u_r^2 + 2(b_2 b_3 + b_5 b_6) u_p u_q + \\ &+ 2b_4 b_6 u_p u_r + 2b_4 b_5 u_q u_r. \end{aligned} \quad (12)$$

Обозначая коэффициенты многочлена (12) через a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 и a_6 , получаем

$$B^2 = a_1 u_p^2 + a_2 u_q^2 + a_3 u_r^2 + a_4 u_p u_q + a_5 u_p u_r + a_6 u_q u_r \quad (13)$$

и окончательно для модуля поля

$$B = \sqrt{a_1 u_p^2 + a_2 u_q^2 + a_3 u_r^2 + a_4 u_p u_q + a_5 u_p u_r + a_6 u_q u_r} . \quad (14)$$

Градуировка трехкомпонентного магнитометра. Параметры a_1, a_2, \dots, a_6 в выражении (14) для модуля поля не зависят от поля, они характеризуются только свойствами измерительной системы и могут быть найдены в процессе градуировки.

В основе предлагаемого метода градуировки лежит то обстоятельство, что при изменении ориентации измерительной системы в постоянном однородном магнитном поле сигнал на выходе системы должен быть постоянен и пропорционален модулю магнитного поля. Основываясь на этом, процедуру градуировки можно осуществить путем вращения системы в постоянном однородном поле и последующей обработки полученных данных. Обработка заключается в минимизации взвешенной средней квадратической ошибки вида

$$\sum_{k=1}^M (B_k^2(u_1, u_2, u_3, a_1, a_2, \dots, a_6) - B_{cal}^2)^2 \rightarrow \min , \quad (15)$$

где B_k – отсчеты выходного сигнала, M – число отсчетов, B_{cal} – значение поля, в котором осуществляется вращение системы. Решение экстремальной задачи (15) дает следующая система шести уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial a_i} \sum_{k=1}^M (B_k^2(u_1, u_2, u_3, a_1, a_2, \dots, a_6) - B_{cal}^2)^2 = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (16)$$

Решение этой системы можно получить, например, методом Крамера с использованием хорошо известных алгоритмов.

При практическом осуществлении процедуры градуировки целесообразно придерживаться некоторого рационального выбора числа отсчетов и ориентаций датчика. Будем характеризовать угловые ориентации датчика в процессе градуировки с помощью сферы единичного радиуса. В сферических координатах элемент площади сферы $ds = \sin \theta d\theta d\phi$. Наилучшим условиям градуировки соответствует равномерное распределение элементов ds по всей поверхности сферы, что достигается соответствующими вариантами изменений полярных θ_i и азимутальных углов ϕ_{ij} .

Выводы. Предложенная схема градуировки измерителя модуля магнитного поля с тремя первичными преобразователями с помощью их вращения в однородном внешнем поле позволяет избежать сложных и трудоёмких процедур юстировки датчиков, разработанных для векторных магнитометров [6–10]. Применение для градуировки земного поля, имеющего естественную высокую пространственную однородность, позволяет отказаться от использования дорогостоящих токовых систем типа Гельмгольца [3]. Эти упрощающие факторы способствуют более широкому внедрению измерителей модуля поля в производственную практику. Описанная градуировка может быть применена и для других типов датчиков, особенно в тех случаях, когда магнитные оси первичных преобразователей по технологическим причинам не совпадают с геометрическими осями [11].

Список литературы

1. Александров Е.Б. Современное состояние техники измерения модуля слабых магнитных полей от нуля до десятка эрстед //УФН. 2001. Т. 171, № 11. С. 1272–1273.
2. Бледнов В.А.. Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных объектах (основы теории разделения полей) //УФН. 1997. Т. 167, № 10. С. 1113–1118.
3. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
4. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т.1. М.: ДМК пресс, 2001.
5. Модуль Е-24. Техническое описание и инструкция по эксплуатации L-Card. 1998.
6. Афанасьев Ю.В., Бондаренко С.И., Козлов А.Н., Пак В.П., Шеремет В.И. Магнитоизмерительные приборы для геофизических и других исследований //Метрология. 1989. № 10. С. 3–16.
7. Смирнов Б.М. Метод измерения параметров магнитного поля с подвижной платформы //Измерит. техника. 1992. № 5. С. 55–57.
8. Merayo J.M.G., Brauer P., Primdahl F., Petersen J.R., Nielsen O.V. Scalar calibration of vector magnetometers //Meas. Sci. Techn. 2000. V. 11. P. 120–132.
9. Auster H.U., Auster V. A new method for performing an absolute measurement of the geomagnetic field //Meas. Sci. Techn. 2003. V. 14. P. 1013–1017.
10. Primdahl F., Brauer P., Merayo J.M.G., Petersen J.R., Risbo T. Determining the direction of a geometrical optical reference axis in the coordinate system of a triaxial magnetometer sensor //Meas. Sci. Techn. 2002. V. 13. P. 2094–2098.
11. Roumenin Ch., Dimitrov K., Ivanov A. Integrated vector sensor and magnetic compass using a novel 3D Hall structure // Sensors & Actuators. 2001. V. A92. P. 119–122.