

УДК 622.243.272.8

Д. Г. Миловзоров, кандидат технических наук, доцент
Уфимский государственный авиационный технический университет
Т. А. Редькина, старший преподаватель
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
Р. Р. Садрутдинов, генеральный директор
ОАО «НПФ «Геофизика», г. Уфа

О ПОСТРОЕНИИ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ФЕРРОЗОНДАМИ

В статье рассмотрены вопросы построения магнитометрических систем (ММС) с феррозондовыми датчиками, представлены аналитические зависимости измеряемых проекций полного вектора индукции магнитного поля на оси чувствительности произвольно ориентированных датчиков, приведены математические модели ММС в соответствии с теорией пространственной ориентации.

Ключевые слова: феррозондовые датчики, магнитометрические системы, позиционирование.

Магнитометрические системы, предназначенные для контроля параметров магнитных полей, находят широкое применение в различных областях науки и техники. При построении магнитометрической аппаратуры используются датчики, принцип действия которых основан на различных физических эффектах. Наибольшее распространение в рассматриваемой области получили феррозондовые датчики (или феррозонды) в силу ряда их преимуществ:

- наличие диаграммы направленности;
- высокая чувствительность и широкий диапазон измерений;
- малый порог чувствительности (единицы нТл);
- термоустойчивость в широком диапазоне рабочих температур;
- приемлемые габариты и стоимость.

Структура и функционирование магнитометрических систем во многом определяются конкретно решаемыми задачами. Различают одно-, двух- и трехкомпонентные магнитометры. Наиболее востребованы на сегодня, безусловно, трехкомпонентные феррозондовые датчики (ГФД), позволяющие получать измерительную информацию не только об абсолютном значении (модуле) индукции исследуемого поля, но и о его составляющих – проекциях полного вектора на оси чувствительности феррозондов, которые ориентируются по осям трехмерной прямоугольной, как правило, системы координат. По измеряемым проекциям в дальнейшем определяют горизонтальную и вертикальную составляющие полного вектора, их взаимосвязь через угол магнитного наклонения, а также угол пространственного позиционирования корпуса ММС в горизонтальной плоскости.

Практически во всех случаях измерение проекций полного вектора так или иначе связано с решением задач пространственной ориентации, при которых корпус ММС имеет определенное положение в базовой трехмерной системе координат, образованной прямоугольными осями и связанной с базовыми неколлинеарными векторами.

В общей теории пространственной ориентации твердых тел, и в инклинометрии в частности [1–3], основной базис $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$ представляет собой

правую систему координат, ось $0Z_0$ которой совпадает с вектором ускорения свободного падения \vec{G} , а ось $0X_0$ ориентирована в горизонтальной плоскости $0X_0Y_0$ и направлена на Север магнитного меридиана Земли (рис. 1). Общий вектор индукции магнитного поля \vec{M} изначально расположен в вертикальной плоскости $0X_0Z_0$ и раскладывается на две составляющие – горизонтальную \vec{N} и вертикальную \vec{K} , соотношения которых регламентируются конкретной широтой местности и определяются углом магнитного наклонения $\nu = \arctg \left\{ \frac{|\vec{K}|}{|\vec{N}|} \right\}$.

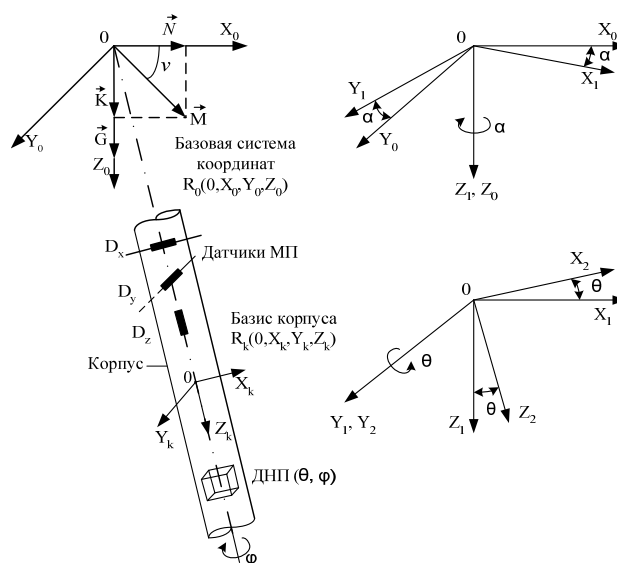


Рис. 1. Преобразование базовой системы координат и компоновка датчиков $D_{i(x,y,z)}$ в корпусе ММС

Позиционирование корпуса ММС в пространстве определяется последовательными поворотами основного базиса $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$ вокруг собственных осей на углы Эйлера – Крылова [4]. Так, при переходе к базису корпуса $R_k(0, X_k, Y_k, Z_k)$ осуществляются следующие плоские повороты (рис. 1):

- 1) вокруг оси $0Z_0$ на угол α ;
- 2) вокруг оси $0Y_0$ на угол θ ;

3) вокруг оси OZ_0 на угол φ .

При математическом моделировании магнитометрических систем ставится задача выявления аналитических зависимостей измеряемых проекций полного вектора индукции магнитного поля на оси чувствительности датчиков D_x, D_y, D_z с функциями самих углов α, θ, φ и ν .

В классическом исполнении ММС оси чувствительности датчиков магнитного поля (феррозондов) принято ориентировать строго по осям прямоугольного базиса корпуса $R_k(0, X_k, Y_k, Z_k)$, что в идеале позволяет измерять ортогональные проекции полного вектора \vec{M} .

При разработке математических моделей ММС применяют векторно-матричный аппарат, позволяющий формировать уравнения с учетом последовательности отдельных поворотов основного базиса вокруг собственных осей.

Так, для основных поворотов корпуса ММС (рис. 1) векторно-матричное уравнение (ВМУ) имеет вид:

$$\vec{M}_{g_{i(x,y,z)}} = A_{\varphi(z)} A_{\theta(y)} A_{\alpha(z)} \vec{M}_{R_0}, \quad (1)$$

где \vec{M}_{R_0} и $\vec{M}_{g_{i(x,y,z)}}$ – проекции полного вектора индукции магнитного поля \vec{M} , соответственно, в основном базисе $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$ и в базисе корпуса $R_k(0, X_k, Y_k, Z_k)$; $A_{\alpha(j=y,z)}$ – матрицы направляющих косинусов, соответствующие последовательным поворотам базисов R_i на углы ϵ вокруг j осей.

Решением данного ВМУ (1) является система скалярных уравнений (2) и базовые математические модели ТФД (3):

$$\left. \begin{aligned} m_x &= \cos\nu(\cos\theta\cos\alpha\cos\varphi - \sin\alpha\sin\varphi) - \sin\nu\cos\varphi, \\ m_y &= -\cos\nu(\cos\theta\cos\alpha\sin\varphi + \sin\alpha\cos\varphi) + \sin\theta\sin\varphi, \\ m_z &= \cos\nu\cos\alpha\sin\theta + \sin\nu\cos\theta, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \arctg \frac{-(m_x \sin\varphi + m_y \cos\varphi)}{(m_x \cos\varphi - m_y \sin\varphi) \cos\theta + m_z \sin\theta} \\ \nu &= \arctg \frac{m_z \cos\theta + \sin\theta(-m_x \cos\varphi + m_y \sin\varphi)}{\sqrt{[\cos\theta(m_x \cos\varphi - m_y \sin\varphi) + m_z \sin\theta]^2 + (m_x \sin\varphi + m_y \cos\varphi)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Представленные математические модели (3) являются идеальными и справедливы для ММС, в которых феррозонды фиксируются в корпусе ортогонально друг другу (рис. 2, а).

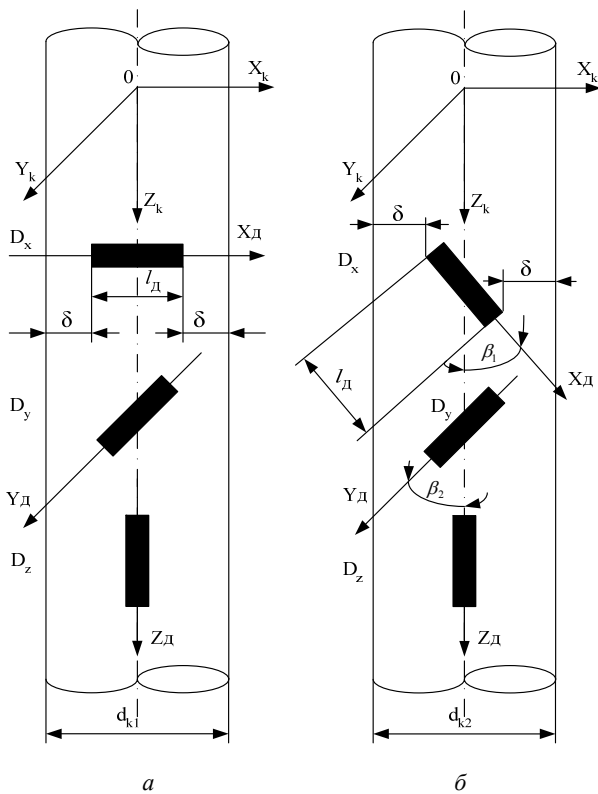


Рис. 2. Компонвочные схемы датчиков $D_{i(i=x,y,z)}$ в корпусе ММС

Элементарный анализ базовых математических моделей (3) показывает, что для однозначного определения искомых углов α и ν необходимы не только значения измеряемых проекций с феррозондов $m_{i(x,y,z)}$ (2), но и значения углов θ и φ . Поэтому компоновочную структуру ММС (рис. 1) дополняют отдельным датчиком наклона и поворота (ДНП), с помощью которого и получают численные значения углов θ и φ , которые в дальнейшем используются в моделях (3) при определении углов α и ν .

Применительно к аппаратуре, содержащей феррозондовые датчики D_x, D_y и D_z , линейный размер феррозонда l_d определяет диаметр прибора d_{k1} с учетом параметра δ , включающего толщину стенки охранного кожуха и величину зазора от внутренней поверхности кожуха до торца феррозонда (рис. 2, а). В общем случае габаритный диаметр d_{k1} определяется как сумма

$$d_{k1} = l_d + 2\delta. \quad (4)$$

Как известно из классической теории феррозондовых измерительных преобразователей [5], линейный размер сердечника, отнесенный к площади его поперечного сечения, во многом определяет метрологические характеристики ММС в целом. А стремление разработчиков и специалистов к созданию малогабаритных магнитометров, обладающих малым диаметром корпуса, в данном случае входит в явное противоречие с этим утверждением.

Одним из путей решения данного противоречия является разработка и создание ММС, в котором феррозондовые датчики располагаются не ортогонально друг другу, а под некоторыми углами (рис. 2, б).

При этом датчик D_z ориентируется по продольной оси корпуса ММС, датчик D_x лежит в плоскости OX_kZ_k и отклонен от оси OX_k на угол β_1 , а датчик D_y лежит в плоскости OY_k и отклонен от оси OY_k на угол β_2 [6].

Такая компоновка датчиковой части ММС позволит создавать устройства, в которых диаметр корпуса d_{k2} будет меньше линейного размера l_d самого феррозонда. Конкретные соотношения геометрических параметров данного варианта ММС представлены в таблице для различных исходных размеров d_{k1} , l_d и δ . Сравнительные конструктивные показатели для величин углов в диапазоне $\beta \in \{15...75 \text{ град.}\}$ при условии $\beta = \beta_1 = \beta_2$ определяются коэффициентами K_1 и K_2 , характеризующими соотношения диаметров d_{k1} , d_{k2} и линейного размера феррозондовых датчиков:

$$d_{k2} = l_d \cos\beta + 2\delta; \Delta = d_{k1} - d_{k2}; K_1 = \frac{d_{k2}}{d_{k1}}; K_2 = \frac{\Delta}{d_{k2}}. \quad (5)$$

На рис. 3 в виде гистограмм показаны изменения коэффициента K_1 в зависимости от значений угла β для различных диаметров корпуса, а на рис. 4 – графики $\Delta = f(\beta)$.

Коэффициенты K_1 и K_2 можно представить в следующем виде:

$$K_1 = \frac{l_d \cos\beta + 2\delta}{d_{k1} + \frac{2\delta}{d_{k1}}}; K_2 = \frac{l_d(1 - \cos\beta)}{d_{k1} \cos\beta + \frac{2\delta}{d_{k1}}}. \quad (6)$$

| d_{k1} , мм | 60 | | | | | | 48 | | | | 36 | | | |
|---------------|-------------|----------|---------------|-----------|--------------|----------|---------------|-----------|--------------|----------|---------------|-----------|--------------|--|
| l_d , мм | 50 | | | | | | 40 | | | | 30 | | | |
| δ | 5 | | | | | | 4 | | | | 3 | | | |
| β | $\cos\beta$ | d_{k2} | Δ , мм | K_1 , % | K_2 , о.е. | d_{k2} | Δ , мм | K_1 , % | K_2 , о.е. | d_{k2} | Δ , мм | K_1 , % | K_2 , о.е. | |
| 15 | 0,966 | 58,3 | 1,7 | 97,17 | 0,029 | 46,64 | 1,36 | 97,17 | 0,029 | 34,98 | 1,02 | 97,17 | 0,029 | |
| 30 | 0,866 | 53,3 | 6,7 | 88,83 | 0,126 | 42,64 | 5,36 | 88,83 | 0,126 | 31,98 | 4,02 | 88,83 | 0,126 | |
| 45 | 0,707 | 45,35 | 14,65 | 75,58 | 0,323 | 36,28 | 11,72 | 75,58 | 0,323 | 27,21 | 8,79 | 75,58 | 0,323 | |
| 60 | 0,5 | 35 | 25 | 58,33 | 0,714 | 28 | 20 | 58,33 | 0,714 | 21 | 15 | 58,33 | 0,714 | |
| 75 | 0,256 | 22,8 | 37,2 | 38 | 1,631 | 18,24 | 29,76 | 38 | 1,631 | 13,68 | 22,32 | 38,0 | 1,631 | |

Для рассматриваемой компоновочной схемы ММС с произвольно ориентированными феррозондами $D_x(\beta_1)$ и $D_y(\beta_2)$ выражения (2) для измеряемых проекций $m_{i(x,y,z)}$ и математические модели (3) должны быть дополнены и включать в себя функции аргументов β_1 и β_2 . Поскольку в данной компоновочной схеме ММС каждый из феррозондов D_x , D_y , D_z образует свой ортогональный базис, то и рассматривать каждый из них при математическом моделировании следует отдельно. Так, для каждого $D_{i(x,y,z)}$ векторно-матричные уравнения (1) будут выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \overline{M}_{g_x} &= A_{\beta_1(y)} A_{\phi(z)} A_{\theta(y)} A_{\alpha(z)} \overline{M}_{R_0}, \\ \overline{M}_{g_y} &= A_{\beta_2(x)} A_{\phi(z)} A_{\theta(y)} A_{\alpha(z)} \overline{M}_{R_0}, \\ \overline{M}_{g_z} &= A_{\phi(z)} A_{\theta(y)} A_{\alpha(z)} \overline{M}_{R_0}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При конкретных линейных размерах параметров, указанных в таблице, коэффициенты K_1 и K_2 (6) упрощаются и примут вид:

$$K_1 = \frac{1}{6}(5\cos\beta + 1); K_2 = \frac{5(1 - \cos\beta)}{5\cos\beta + 1}.$$

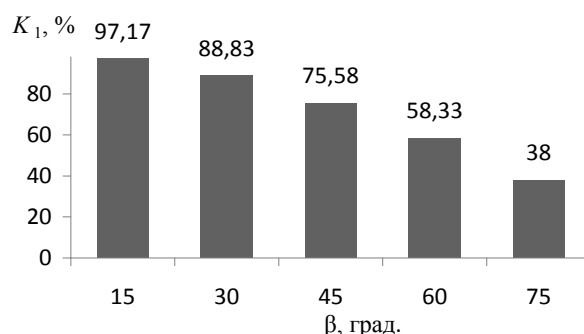


Рис. 3. Зависимость коэффициента K_1 от значений угла β

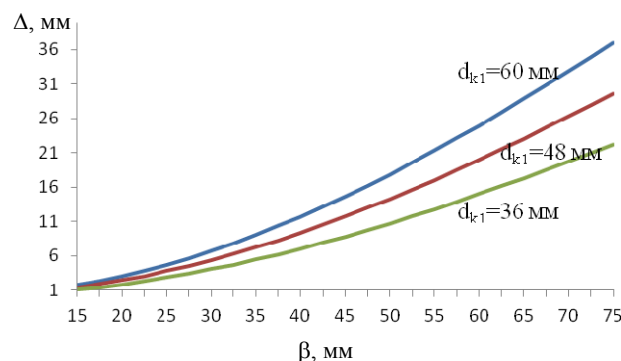


Рис. 4. Функциональная зависимость $\Delta = f(\beta)$ для различных значений d_{k1}

где $A_{\beta_1(y)}$ и $A_{\beta_2(x)}$ – матрицы направляющих косинусов, соответствующие дополнительным поворотам базиса корпуса R_k на угол β_1 вокруг оси OY_k и на угол β_2 оси OX_k .

Раскрыв матрицы и выполнив преобразования в ВМУ (7), не сложно получить систему скалярных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \overline{m}_x &= m_x \cos\beta_1 - m_z \sin\beta_1, \\ \overline{m}_y &= m_y \cos\beta_2 + m_z \sin\beta_2, \\ \overline{m}_z &= m_z, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $m_{i(x,y,z)}$ – проекции, определяемые выражениями (2) и соответствующие взаимно ортогональной проекции датчиков в корпусе; $\overline{m}_{i(x,y,z)}$ – измеряемые (реальные) проекции, соответствующие произвольной ориентации датчиков в корпусе.

Решением уравнений (8) относительно $m_{i(x, y, z)}$ являются следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} m_x &= \frac{\bar{m}_x + \bar{m}_z \sin \beta_1}{\cos \beta_1} \\ m_y &= \frac{\bar{m}_y - \bar{m}_z \sin \beta_2}{\cos \beta_2} \\ m_z &= \bar{m}_z \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя данные выражения (9) в базовые модели (3) также не сложно получить новые математические модели ММС для варианта с произвольно ориентированными феррозондовыми датчиками D_x и D_y :

$$\left. \begin{aligned} v &= -\arctg \frac{A \sin \theta - \bar{m}_z \cos \theta}{\sqrt{[\bar{m}_z \sin \theta + A \cos \theta]^2 + [B]^2}} \\ \alpha &= \arctg \frac{-B}{A \cos \theta + \bar{m}_z \sin \theta} \end{aligned} \right\}$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= -\left[\frac{\bar{m}_y - \bar{m}_z \sin \beta_2}{\cos \beta_2} \right] \sin \phi + \left[\frac{\bar{m}_x + \bar{m}_z \sin \beta_1}{\cos \beta_1} \right] \cos \phi \\ B &= \left[\frac{\bar{m}_x + \bar{m}_z \sin \beta_1}{\cos \beta_1} \right] \sin \phi + \left[\frac{\bar{m}_y - \bar{m}_z \sin \beta_2}{\cos \beta_2} \right] \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

На рис. 5 показан внешний вид датчиковой части предлагаемой ММС, в которой феррозонды D_x и D_y ориентированы в корпусе под определенными углами β_1 и β_2 .

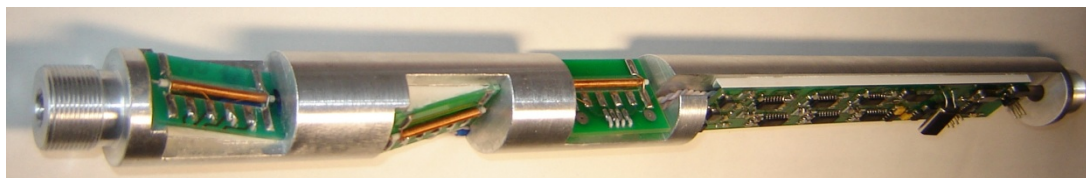


Рис. 5. Внешний вид датчика части ММС

В этом устройстве при линейном размере феррозондов D_x и D_y в 28 мм габаритный диаметр шасси датчиковой части ММС составляет 20 мм.

Таким образом, представленный вариант компоновочной схемы позволяет создавать ММС, габаритный диаметр датчиковой части которой имеет меньшую величину, чем линейные размеры феррозондов в плоскостях $OX_k Z_k$ и $OY_k Z_k$ базиса корпуса, а полученные математические модели (8) и (3), учитывающие дополнительные углы β_1 и β_2 , позволяют однозначно определять искомые углы α , v по измеряемым сигналам с произвольно ориентированных датчиков $D_{i(x, y, z)}$ в корпусе ММС.

Библиографические ссылки

1. Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. – М. : Наука, 1978. – 320 с.

2. Миловзоров Г. В. Анализ инструментальных погрешностей инклинометрических устройств. – Уфа : Гилем, 1997. – 184 с.

3. Миловзоров Д. Г., Зигангиров Л. Р., Миловзоров Г. В. Векторно-матричный аппарат в моделировании трехкомпонентных инклинометрических систем // Датчики и системы. – 2011. – № 7. – С. 30–35.

4. Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М., 1978. 320 с.

5. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. – М. : Энергия, 1976. – 168 с.

6. Миловзоров Д. Г., Ардаширов А. Р., Садрутдинов Р. Р. Малогабаритный трехкомпонентный магнитометр с произвольно ориентированными феррозондами // Приборостроение в XXI веке – 2012. Интеграция науки, образования и производства: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (Ижевск, 14–16 ноября 2012 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. – С. 313–315.

D. G. Milovzorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University

T. A. Redkina, Senior lecturer, Kalashnikov ISTU

R. R. Sadrutdinov, General Director, "SPC "Geophysics" OJSC, UFA

To development of magnetometer systems with arbitrarily oriented flux-gate sensors

The article describes the questions of developing the magnetometer systems (MMS) with flux-gate sensors, analytical dependences are presented for the measured projections of the total vector for magnetic field induction on the axis of sensitivity for arbitrarily oriented sensors, mathematical models for MMS in accordance with the theory of spatial orientation are given.

Keywords: flux-gate sensors, magnetometer systems, positioning.

Получено: 05.05.15