

И. В. Брякин, д-р техн. наук, зав. лаб., bivas2006@yandex.ru,

Институт автоматизации и информационных технологий НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек

## Магнитометр с тестовым алгоритмом функционирования

*Для решения задач в области измерений геомагнитных полей при проведении геофизических и космических исследований предлагаются новый способ измерения вектора напряженности геомагнитного поля и вариант устройства для его реализации. Представлены тестовый алгоритм измерения и вариант структурной блок-схемы магнитометра. Рассмотрены особенности измерительных процедур и режимов функционирования магнитометра.*

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, магнитометр, феррозондовый датчик, измерительная процедура, синхронный детектор, синфазная и квадратурная составляющие, электрический сигнал, тестовый алгоритм

### Введение

В настоящее время существует целый ряд конкретных практических задач прикладной геофизики, решение которых требует надежного и точного измерения характеристик геомагнитного поля [1, 2].

Известно множество способов исследования геомагнитных полей, большинство из которых основано на тесной связи между магнитными и электрическими явлениями [3, 4]. При реализации этих способов наибольшее распространение нашли феррозондовые магнитометры, которые осуществляют измерение физических величин при использовании в качестве рабочей среды магнитного поля и характеризуются не только достаточно высокой чувствительностью, но и возможностью непосредственного измерения составляющих вектора магнитного поля, обеспечивая тем самым получение полной информации о структуре поля и его источниках [5].

Широкое распространение нашел способ для измерения трех взаимно перпендикулярных составляющих  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  вектора напряженности  $\mathbf{T}$  геомагнитного поля трехкомпонентным магнитометром, содержащим три взаимно ортогонально ориентированных феррозондовых датчика (ФД) [6]. Каждая компонента вектора напряженности геомагнитного поля измеряется соответствующим ФД данного магнитометра. Модуль вектора напряженности магнитного поля определяется по результатам измерений трех компонент данного вектора путем вычисления следующей зависимости:

$$|\mathbf{T}| = \sqrt{\left(\frac{U_1}{K_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{K_2}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{K_3}\right)^2},$$

где  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  — результаты измерений электрических сигналов на выходах трех измерительных каналов (ИК) соответствующих ФД;  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  — суммарные коэффициенты преобразования соответствующих трех последовательно соединенных между собой ФД и ИК;  $U_1/K_1 = T_1$ ,  $U_2/K_2 = T_2$ ,  $U_3/K_3 = T_3$  — составляющие вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{T}$ .

Недостатком данного способа является необходимость использования трех ФД, объективно имеющих неидентичные коэффициенты преобразования. Индивидуальные конструктивные и технологические особенности ФД определяют и специфичность функционирования каждого из них. В этом случае наблюдается временной дрейф, а при работе магнитометра в диапазоне температур имеется существенная погрешность из-за температурного дрейфа нулевого сигнала. Наличие трех измерительных каналов в магнитометре усугубляет все перечисленные выше факторы и значительно снижает точность реализуемого способа измерения.

Подобные недостатки присущи и другим методам измерения геомагнитных полей, а соответственно, и устройствам их реализации [7, 8]. Поэтому исследования, направленные на решение проблем дальнейшего совершенствования магнитометров в плане повышения их надежности и долговечности, устойчивости к помехам, снижения веса и уменьшения габаритных размеров, по-прежнему остаются актуальными.

На основе проведенных исследований, базирующихся на анализе и обобщении научных результатов в области алгоритмических методов повышения точности измерения физических величин, предлагается новый способ измерения вектора напряженности геомагнитного поля и вариант построения устройства его реализации.

## Обоснование принципа построения магнитометра

Рассмотрим возможность применения в качестве трехкомпонентной системы измерения параметров геомагнитного поля магнитометр с одним ФД [9].

Пусть  $\{X, Y, Z\}$  — прямоугольная система координат, связанная с неподвижной платформой 1, на которой расположен однокомпонентный магнитометр 2 (рис. 1). Координатные оси системы ориентации платформы  $\{X, Y, Z\}$  совмещены с соответствующими координатными осями географической системы  $\{X_G, Y_G, Z_G\}$ , т.е. ось  $X$  ориентирована на север,  $Y$  — на восток,  $Z$  — направлена вертикально вниз по отвесу.

ФД магнитометра имеет возможность равномерного вращения с угловой скоростью  $\omega$  относи-

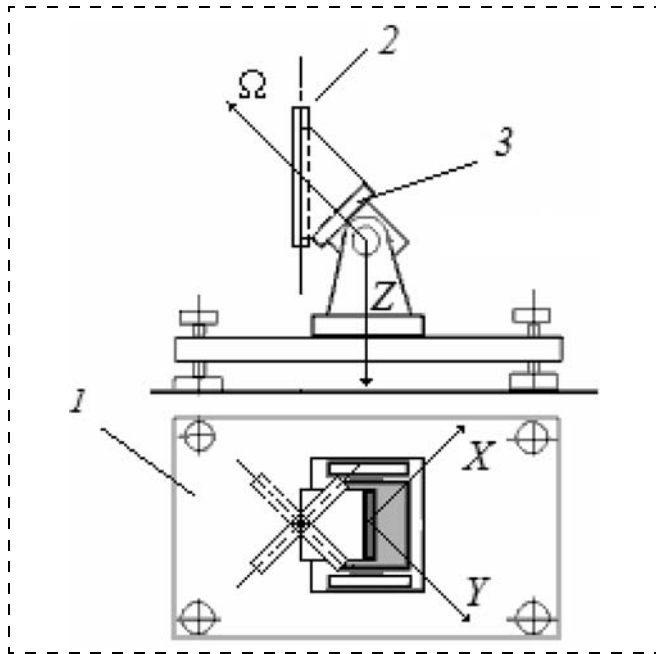


Рис. 1. Общий вид магнитометра на базе неподвижной платформы

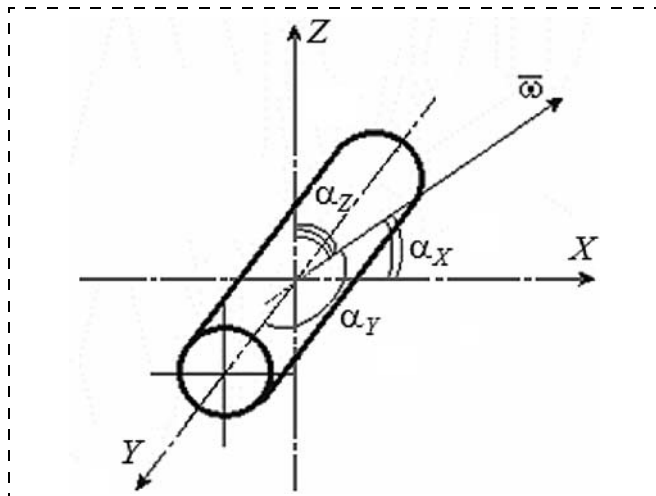


Рис. 2. Пространственное расположение ФД относительно оси вращения

тельно неподвижной оси  $\Omega$  с угловыми координатами  $\alpha_X = \alpha_Y = \alpha_Z = \alpha = \arctg(\sqrt{2})$ , а его ось чувствительности (продольная ось) расположена к оси вращения  $\Omega$  под углом  $\alpha$  (рис. 2). Вращение ФД осуществляется посредством шагового двигателя 3.

Если рассматривать координатную ось  $X$  как образующую поверхности конуса, то координатные оси  $Y$  и  $Z$  в силу указанных выше условий также будут принадлежать этой поверхности. В этом случае координатные оси  $Y$  и  $Z$  можно интерпретировать как результаты пространственного перемещения координаты  $X$  при вращении относительно неподвижной оси  $\Omega$  соответственно на  $120^\circ$  и  $240^\circ$ . Выделим дополнительно на поверхности рассматриваемого конуса образующую  $\Theta$ , смещенную относительно координатной оси  $X$  на угол в  $270^\circ$  (рис. 3).

На ФД магнитометра воздействует измеряемое геомагнитное поле  $T$  (естественное) и направленное вдоль оси вращения  $\Omega$  вспомогательное переменное магнитное поле  $T_0$  (искусственное) с угловой частотой  $\omega_0$ , равной по величине угловой скорости ФД  $\omega$  и синхронизированной с ней (рис. 3).

Полагаем, что во время проведения измерений вектор измеряемого магнитного поля  $T$  постоянен и неподвижен в пространстве и составляет угол  $\beta$  с осью  $\Omega$  (рис. 4), а параметры вспомогательного переменного магнитного поля  $T_0$  являются изначально заданными и известными.

Угол  $\beta$  между векторами  $\Omega\{\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z\}$  и  $T\{T_X, T_Y, T_Z\}$  определяется согласно следующему выражению [10]:

$$\cos \beta = \frac{\Omega_X T_X + \Omega_Y T_Y + \Omega_Z T_Z}{\sqrt{\Omega_X^2 + \Omega_Y^2 + \Omega_Z^2} \sqrt{T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2}}. \quad (1)$$

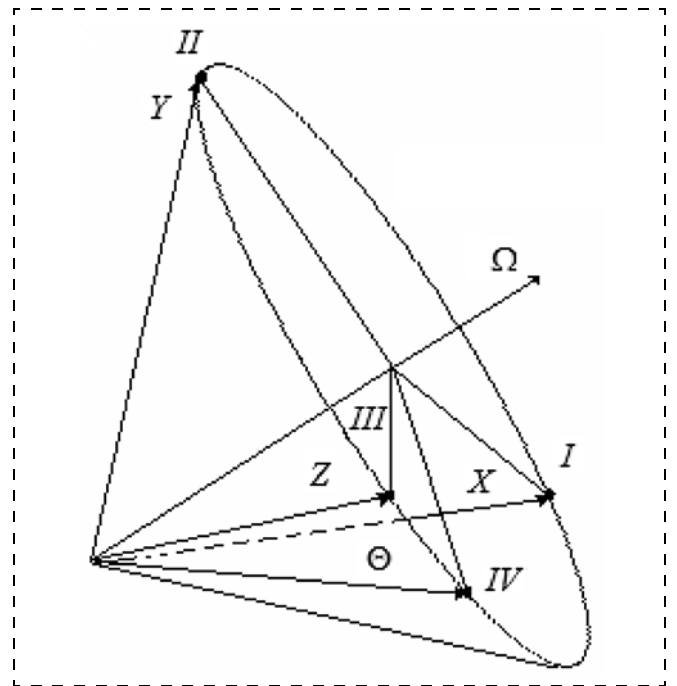


Рис. 3. Пространственное расположение координатных осей

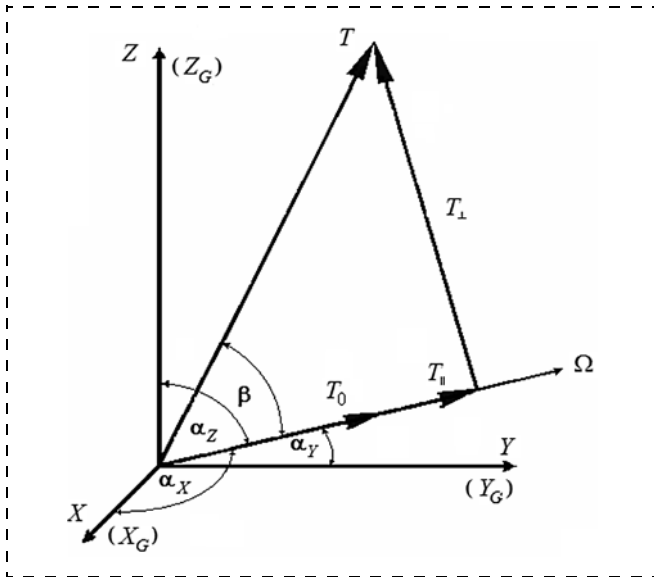


Рис. 4. Пространственное расположение магнитных полей  $T$  и  $T_0$

В силу того, что  $\alpha_X = \alpha_Y = \alpha_Z = \alpha = \arctg(\sqrt{2})$  можем записать:

$$\Omega_X = \Omega_Y = \Omega_Z = \Omega \cos \alpha.$$

Тогда выражение (1) примет вид

$$\cos \beta = \frac{(T_X + T_Y + T_Z)}{\sqrt{3(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}}.$$

Учитывая, что

$$\cos \varphi_X = \frac{T_X}{\sqrt{(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}},$$

$$\cos \varphi_Y = \frac{T_Y}{\sqrt{(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}},$$

$$\cos \varphi_Z = \frac{T_Z}{\sqrt{(T_X^2 + T_Y^2 + T_Z^2)}},$$

выражение (1) трансформируется к виду

$$\cos \beta = (\cos \varphi_X + \cos \varphi_Y + \cos \varphi_Z) / \sqrt{3}. \quad (2)$$

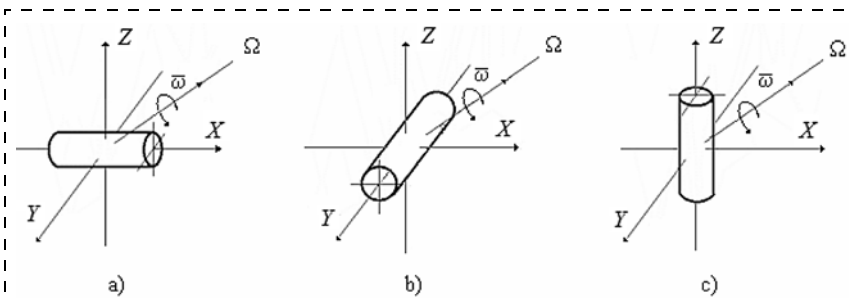


Рис. 5. Три основных рабочих пространственных положения ФД

Регулярно вращающийся вокруг оси  $\Omega$  ФД непрерывно перемещается в пространстве таким образом, что в результате его магнитная ось периодически с частотой  $\omega$  совпадает с соответствующими географическими координатными осями (рис. 5).

Тогда для каждой компоненты суммарного магнитного поля, направленной вдоль осей  $X, Y, Z$  и  $\Theta$ , в общем случае соответствующие изменения можем записать в виде исходной системы уравнений:

$$\begin{cases} T_X = T \cos \beta \cos \alpha_X + T_0 \cos \alpha_X \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_X \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_Y = T \cos \beta \cos \alpha_Y + T_0 \cos \alpha_Y \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_Y \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_Z = T \cos \beta \cos \alpha_Z + T_0 \cos \alpha_Z \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_Z \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_\Theta = T \cos \beta \cos \alpha_\Theta + T_0 \cos \alpha_\Theta \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha_\Theta \cos(\omega t + \varphi_\Theta), \end{cases}$$

где  $\varphi_X, \varphi_Y, \varphi_Z$  и  $\varphi_\Theta$  — начальные фазы, определяющиеся начальным положением вектора  $T$  в системе координатных осей  $X, Y, Z$  и  $\Theta$ ;  $T$  — модуль вектора измеряемого геомагнитного поля  $T$ .

С учетом ранее сделанных замечаний исходную систему уравнений представим следующим образом:

$$\begin{cases} T_X = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_Y = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_Z = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_\Theta = T \cos \beta \cos \alpha + T_0 \cos \alpha \cos \omega t + \\ + T \sin \beta \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_\Theta). \end{cases} \quad (3)$$

В рассматриваемом случае вектор измеряемого магнитного поля  $T$  можно разложить на две компоненты: продольную  $T_{||}$  (вдоль си вращения  $\Omega$ ) и поперечную  $T_{\perp}$  (под прямым углом к оси вращения  $\Omega$ ), которые образуют дополнительный ортонормированный базис (ДОБ). Измеренная величина  $T_{||}$  зависит от смещения нуля компонент магнитометра и магнитного поля объекта. Поперечная компонента  $T_{\perp}$  не зависит от этих величин и измеряется абсолютно, а вспомогательное переменное магнитное поле  $T_0$  фактически является продольной компонентой  $T_{0||}$  в рассматриваемом ДОБ.

Обозначим:  $T_{||} = T \cos \beta$  — составляющая вектора измеряемого магнитного поля  $T$ , направленная вдоль оси  $\Omega$ ;  $T_{\perp} = T \sin \beta$  — составляющая вектора измеряемого магнитного поля  $T$ , перпендикулярная к оси  $\Omega$ .

Каждая компонента суммарного магнитного поля, направленная вдоль осей  $X, Y$  и  $Z$ , имеет синусоидальную составляющую с амплитудой, равной

проекция  $T_{\perp}$  на соответствующую ось, постоянную составляющую, равную проекции  $T_{\parallel}$  на ту же ось, и косинусоидальную составляющую с амплитудой, равной проекции  $T_{0\parallel}$  на ту же ось. В этом случае система уравнений (3) преобразуется к виду

$$\begin{cases} T_{\Sigma X} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_{\Sigma Y} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_{\Sigma Z} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_{\Sigma \Theta} = T_{\parallel} \cos \alpha + T_{0\parallel} \cos \alpha \cos \omega_0 t + T_{\perp} \sin \alpha \cos(\omega t + \varphi_{\Theta}). \end{cases} \quad (4)$$

Обозначив постоянную составляющую  $A_{\parallel}$ , амплитуды переменных косинусоидальной и синусоидальной составляющих — соответственно  $B_{\parallel}$  и  $C_{\perp}$ , для системы уравнений (4) с учетом того, что  $\omega_0 = \omega$ , можем записать

$$\begin{cases} T_{\Sigma X} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_X); \\ T_{\Sigma Y} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Y); \\ T_{\Sigma Z} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Z); \\ T_{\Sigma \Theta} = A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_{\Theta}). \end{cases} \quad (5)$$

Из ортогональности системы  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  следует

$$\begin{cases} T^2 \cos^2 \beta = 3A_{\parallel}^2; \\ T^2 \sin^2 \beta = C_{\perp}^2 (\cos^2 \varphi_X + \cos^2 \varphi_Y + \cos^2 \varphi_Z). \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, можно констатировать, что в рассматриваемом случае возможно измерение трех компонент вектора  $\mathbf{T}$  и его модуля  $|\mathbf{T}| = T$  с помощью одного и того же ФД, осуществляющего регулярное вращение относительно некоторой неподвижной оси  $\Omega$ .

Теперь перейдем от анализа компонент магнитного поля в рассматриваемой системе координат с вращающимися в пространстве ФД к анализу сигналов в выходной цепи измерительного канала магнитометра.

В общем случае для ФД в зафиксированном в пространственном положении, когда его чувствительная ось совпадает с направлением вектора  $\mathbf{T}$ , можно записать следующее уравнение [9]:

$$U(t) = 6\omega^* b s w H_m^2 T \sin 2\omega^* t, \quad (7)$$

где  $U(t)$  — выходное напряжение с выхода ФД;  $H_m$  и  $\omega^*$  — соответственно амплитуда и круговая частота возбуждающего ФД поля;  $b$  — коэффициент, характеризующий магнитное свойство сердечника;  $s$  — площадь поперечного сечения сердечника;  $w$  — число витков измерительной катушки;  $T$  — модуль вектора измеряемого геомагнитного поля.

Для простоты анализа введем следующие обозначения:

$$q = 6\omega^* b s w H_m^2,$$

где  $q$  — коэффициент прямого преобразования ФД.

С учетом возможности углового перемещения ФД уравнение (7) можно трансформировать к следующему виду:

$$U_i(t) = q T_i \sin 2\omega^* t, \quad (8)$$

где  $T_i$  — проекция вектора измеряемого геомагнитного поля на одну из возможных координатных осей.

Обобщая уравнения (5) и (8), получаем уравнение вида

$$U_i(t) = q [A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_i)] \sin 2\omega^* t, \quad (9)$$

где  $\varphi_i$  — угловая координата расположения ФД в  $i$ -й точке пространства в рассматриваемой системе координат.

Из уравнения (9) видно, что на выходах перемещающегося в пространстве ФД наблюдаются амплитудно-модулированные электрические сигналы с несущим колебанием частотой  $2\omega^*$  и с модулирующим колебанием частотой  $\omega$ .

Для последующей обработки таких сигналов воспользуемся известным способом реализации селективного преобразования с периодической весовой функцией, в основе которого лежит применение синхронных детекторов (СД), т.е. аналоговых перемножителей с интегратором или фильтром нижних частот.

После соответствующего амплитудного детектирования этих сигналов с помощью такого СД на частоте  $2\omega^*$  на выходе измерительного канала ФД будет выделяться огибающая несущего сигнала:

$$U_{O_i}(t) = dq [A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_i)], \quad (10)$$

где  $d$  — коэффициенты преобразования СД.

Согласно выражению (10) составляем систему уравнений для сигналов, полученных в результате амплитудного детектирования для соответствующих пространственных позиций ФД:

$$\begin{cases} U_{\Sigma X} = Q [A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_X)]; \\ U_{\Sigma Y} = Q [A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Y)]; \\ U_{\Sigma Z} = Q [A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_Z)]; \\ U_{\Sigma \Theta} = Q [A_{\parallel} + B_{\parallel} \cos \omega t + C_{\perp} \cos(\omega t + \varphi_{\Theta})], \end{cases} \quad (11)$$

где  $Q = dq$ .

При ближайшем рассмотрении системы уравнений (11) видно, что электрические сигналы, вырабатываемые ФД пропорционально измеряемым компонентам поля, можно условно разделить на "синфазные"  $U_C$  и "квадратурные"  $U_K$  составляющие по отношению к фазе вектора угловой скорости вращения  $\omega$  относительно неподвижной оси  $\Omega$ , а значит, и по отношению к фазе напряжения возбуждения  $U_B$  угловой частоты  $\omega_0$  вспомогательного переменного магнитного поля  $\mathbf{T}_0$ , т.е. примени-

тельно к: координатным осям  $X, Y, Z$  и  $\Theta$  можем записать:

$$\begin{cases} U_0 = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 0^\circ] + QC_{\perp}\cos\varphi_X = U_{0C} + U_{0K}; \\ U_{120} = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 120^\circ] + QC_{\perp}\cos\varphi_Y = \\ = U_{120C} + U_{120K}; \\ U_{240} = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 240^\circ] + QC_{\perp}\cos\varphi_Z = \\ = U_{240C} + U_{240K}; \\ U_{270} = Q[A_{\parallel} + B_{\parallel}\cos 270^\circ] + QC_{\perp}\cos\varphi_{\Theta} = \\ = U_{270C} + U_{270K}. \end{cases} \quad (12)$$

Поэтому, применяя два дополнительных СД, опорное напряжение первого из которых настроено соответственно "синфазно" (фазовый сдвиг равен 0), а опорное напряжение второго — "квадратурно" (фазовый сдвиг равен  $\pi/2$ ) по отношению к фазе возбуждающего напряжения  $U_B$ , можем составить согласно уравнениям (12) следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} U_{0C} = S_1[A_{\parallel} + B_{\parallel}], U_{0K} = S_2C_{\perp}\cos\varphi_X; \\ U_{120C} = S_1[A_{\parallel} - 0,5B_{\parallel}], U_{120K} = S_2C_{\perp}\cos\varphi_Y; \\ U_{240C} = S_1[A_{\parallel} - 0,5B_{\parallel}], U_{240K} = S_2C_{\perp}\cos\varphi_Z; \\ U_{270C} = S_1A_{\parallel}, U_{270K} = S_2C_{\perp}\cos\varphi_{\Theta}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $S_1$  — коэффициент преобразования первого измерительного канала магнитометра, включающего "синфазный" СД;  $S_2$  — коэффициент преобразования второго измерительного канала магнитометра, включающего "квадратурный" СД;  $U_{120}, U_{240}, U_{270}$  — электрические напряжения сигналов на выходе ФД при его вращении в моменты совпадения его продольной оси с соответствующими координатными осями  $X, Y, Z$  и  $\Theta$ ;  $U_{0C}, U_{120C}, U_{240C}, U_{270C}$  — электрические напряжения "синфазных" составляющих сигналов на выходе магнитометра при вращении ФД в моменты совпадения продольной оси ФД с соответствующими координатными осями  $X, Y, Z$  и  $\Theta$ ;  $U_{0K}, U_{120K}, U_{240K}, U_{270K}$  — электрические напряжения "квадратурных" составляющих на выходе магнитометра при вращении ФД в моменты совпадения продольной оси ФД с соответствующими координатными осями  $X, Y, Z$  и  $\Theta$ .

Из уравнений (13) следует, что после синхронного детектирования электрических сигналов на выходе магнитометра в моменты прохождения ФД через пространственные позиции, расположенные на координатах  $X, Y, Z$  и  $\Theta$ , будут выделяться соответствующие огибающие несущего сигнала.

Считая  $S_1 = S_2 = S$  и исходя из того, что

$$\begin{cases} U_{0C} = SA_{\parallel} + SB_{\parallel}, \\ U_{270C} = SA_{\parallel}, \end{cases}$$

определим коэффициент преобразования измерительного канала магнитометра:

$$S = (U_{0C} - U_{270C})/B_{\parallel} = (U_{0C} - U_{270C})/[|T_0|\cos\alpha].$$

Для упрощения математических преобразований введем следующие обозначения:

$$a = U_{0K}/U_{270C}; b = U_{120K}/U_{270C}; c = U_{240K}/U_{270C}.$$

Тогда с учетом (13) можем записать

$$a = \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\cos\varphi_X; b = \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\cos\varphi_Y; c = \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\cos\varphi_Z. \quad (14)$$

Подставляя выражения (14) в уравнение (2), получим

$$\cos\beta = (a + b + c)/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta\sqrt{3}). \quad (15)$$

Из уравнения (15) находим:

$$\sin\beta = (a + b + c)\operatorname{ctg}\alpha/\sqrt{3}$$

или

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \frac{(a + b + c)^2}{3}\operatorname{ctg}^2\alpha}. \quad (16)$$

Из выражения (16) определим:

$$\beta = \arccos\left[\sqrt{1 - \frac{(a + b + c)^2}{3}\operatorname{ctg}^2\alpha}\right]. \quad (17)$$

Используя свойства тригонометрических преобразований, можем записать

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\sin\beta}{\cos\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{3\operatorname{tg}^2\alpha}{(a + b + c)^2} - 1}}.$$

Исходя из того, что

$$\begin{aligned} \cos\varphi_X &= a/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta); \cos\varphi_Y = b/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta); \\ \cos\varphi_Z &= c/(\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta), \end{aligned}$$

подставив значение  $\operatorname{tg}\beta$ , определяем угловые координаты вектора  $\mathbf{T}$ :

$$\begin{cases} \varphi_X = \\ = \arccos\left[U_{0K}\sqrt{\frac{3}{(U_{0K} + U_{120K} + U_{240K})^2} - \frac{1}{U_{270C}^2\operatorname{tg}^2\alpha}}\right], \\ \varphi_Y = \\ = \arccos\left[U_{120K}\sqrt{\frac{3}{(U_{0K} + U_{120K} + U_{240K})^2} - \frac{1}{U_{270C}^2\operatorname{tg}^2\alpha}}\right], \\ \varphi_Z = \\ = \arccos\left[U_{240K}\sqrt{\frac{3}{(U_{0K} + U_{120K} + U_{240K})^2} - \frac{1}{U_{270C}^2\operatorname{tg}^2\alpha}}\right]. \end{cases} \quad (18)$$

Из систем уравнений (2) и (6) после несложных математических преобразований определяем величину модуля полного вектора  $\mathbf{T}$  напряженности геомагнитного поля:

$$|\mathbf{T}| = \frac{\sqrt{3U_C^2 + U_{0K}^2 + U_{120K}^2 + U_{240K}^2}}{S},$$

где  $U_C = U_{0C} = U_{120C} = U_{240C}$ .

Окончательно можем записать:

$$|\mathbf{T}| = \frac{\sqrt{3U_{270C}^2 + U_{0K}^2 + U_{120K}^2 + U_{240K}^2}}{(U_{0C} - U_{270C})} T_0 \cos \alpha. \quad (19)$$

Полученные аналитические выражения (18) и (19) фактически являются тестовыми измерительными алгоритмами, посредством которых определяют значения параметров исследуемого геомагнитного поля.

Из анализа измерительных алгоритмов (18) и (19) видно, что необходимые параметры магнитного поля определяются исходя из результатов четырех измерительных процедур: 1) регистрируются значения величин  $U_{0C}$  и  $U_{0K}$ ; 2) регистрируется значение величины  $U_{120K}$ ; 3) регистрируется значение величины  $U_{240K}$ ; 4) регистрируется значение величины  $U_{270C}$ . С учетом заданных параметров  $T_0$  и  $\cos \alpha$ , по результатам измерительных процедур алгоритмически определяются значения основных параметров полного вектора напряженности  $\mathbf{T}$  геомагнитного поля, т.е. его модуля  $|\mathbf{T}|$ , и угловые координаты  $\varphi_X$ ,  $\varphi_Y$  и  $\varphi_Z$ . Кроме того, особенности структуры полученных измерительных алгоритмов определения значения основных параметров полного вектора напряженности  $\mathbf{T}$  геомагнитного поля обеспечивают свойство инвариантности результатов измерения к изменениям коэффициентов преобразования измерительных каналов магнитометра.

### Структурная блок-схема магнитометра

Исходя из полученных измерительных алгоритмов можно предложить вариант магнитометра с тестовым алгоритмом функционирования, структурная схема которого представлена на рис. 6.

Магнитометр состоит из следующих функциональных модулей: 1 — ФД; 2 — вторичный измерительный преобразователь (селективный усилитель); 3 — СД на удвоенную частоту напряжения возбуждения ФД; 4.1 и 4.2 — СД соответственно синфазной и квадратурной составляющих выходного сигнала ФД на частоте вспомогательного переменного магнитного поля; 5.1 и 5.2 — стробируемые АЦП

соответственно для синфазной и квадратурной составляющих выходного сигнала ФД; 6 — генератор для шагового двигателя; 7 — генератор возбуждения для ФД; 8 — блок управления и синхронизации; 9 — кодоуправляемый мультиплексор; 10 — вычислительный блок; 11 — шаговый двигатель; 12 — катушка возбуждения вспомогательного переменного магнитного поля. Выходом магнитометра является информационный выход вычислительного блока 10.

ФД 1 выполнен с возможностью равномерного пространственного перемещения через четыре фиксированных положения, образующих измерительные позиции ФД и совпадающих с осями географической (астрономической) системы координат  $X_G$ ,  $Y_G$ ,  $Z_G$  и координатной осью  $\Theta$ . Перемещение ФД с одной измерительной позиции на другую осуществляется поворотным устройством на базе шагового двигателя 11 с фиксированной угловой частотой  $\omega$ .

С помощью блока 8 фиксируются моменты прохождения компонентным ФД координатных осей  $X_G$ ,  $Y_G$ ,  $Z_G$ ,  $\Theta$  и осуществляется необходимая синхронизация и управление режимами работы всех основных функциональных узлов магнитометра.

Таким образом, весь измерительный процесс реализуется одним ФД магнитометра путем его равномерного вращения с угловой скоростью  $\omega$  под углом  $\alpha$  вокруг оси  $\Omega$  с угловыми координатами  $\alpha_X = \alpha_Y = \alpha_Z = \alpha = \arctg(\sqrt{2})$ , а сами векторные измерения осуществляются при одновременном воздействии измеряемого магнитного поля  $\mathbf{T}$  и направленного вдоль оси вращения  $\Omega$  вспомогательного переменного магнитного поля  $\mathbf{T}_0$  с угловой частотой  $\omega_0 = \omega$ , синхронизированной соответствующим образом блоком 8.

Измерительный процесс, реализуемый рассматриваемым магнитометром, состоит из четырех измерительных тактов, каждый из которых с определенной периодичностью реализуется соответствующим образом на одной из четырех измерительных позиций (I, II, III и IV).

Первому измерительному такту соответствует расположение ФД на первой измерительной позиции I, для которой характерно совпадение продольной оси ФД с географической координатной осью  $X_G$ , и на которой фиксируют значения синфазной  $U_{0C}$  и квадратурной  $U_{0K}$  составляющих суммарного сигнала  $U_0$ .

Второму измерительному такту соответствует расположение ФД на второй измерительной позиции II, которая, в свою очередь, характеризуется совпадением продольной оси ФД с географической координатной осью  $Y_G$ , и на которой фиксируют значение квадратурной составляющей  $U_{120K}$  суммарного сигнала  $U_{120}$ .

Третьему измерительному такту соответствует расположение ФД на

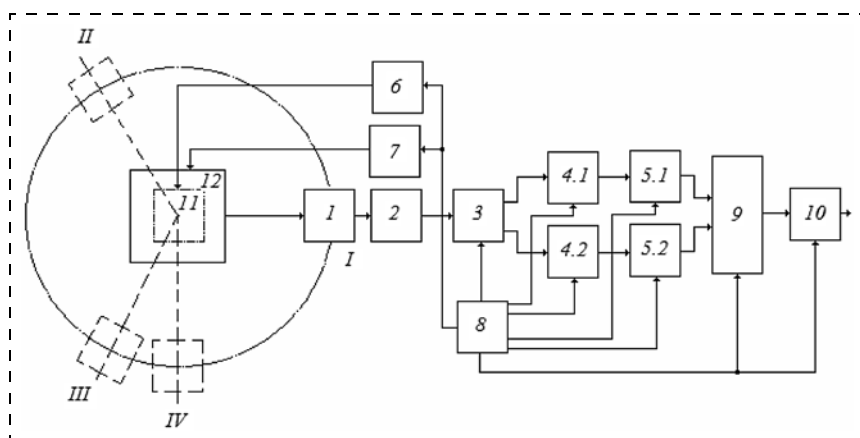


Рис. 6. Блок-схема магнитометра с тестовым алгоритмом функционирования

третьей измерительной позиции *III*, которая характеризуется совпадением продольной оси *ФД* с географической координатной осью *Z<sub>G</sub>*, и на которой фиксируют значение квадратурной составляющей *U<sub>240K</sub>* суммарного сигнала *U<sub>240</sub>*.

Четвертому измерительному такту соответствует расположение *ФД* на четвертой измерительной позиции *IV*, которая характеризуется совпадением продольной оси *ФД* с координатной осью *Θ*, и на которой фиксируют значение синфазной составляющей *U<sub>270C</sub>* суммарного сигнала *U<sub>270</sub>*.

Текущая информация о результатах измерения четырех измерительных тактов последовательно в цифровом виде с выходов АЦП 5.1 и 5.2 через мультиплексор 9 вводится в вычислительный блок 10, который, реализуя алгоритмы (18) и (19), определяет требуемые параметры магнитного поля *T* в виде конкретных числовых значений.

### Заключение

Использование дополнительного эффекта модуляции полезных сигналов, который возникает при вращении *ФД* в остаточном поле и при его подмагничивании тестовым переменным магнитным полем, позволяет минимизировать практически все погрешности измерения компонент поля: ошибки градуировки и непостоянства чувствительности (мультипликативную погрешность); смещение и флуктуацию нуля (аддитивную погрешность) [10].

Рассматриваемый магнитометр предназначен для измерения трех ортогональных компонент слабого магнитного поля, жестко связанных с осями платформы, на которой он установлен. При заранее известной ориентации осей платформы с помощью магнитометра определяется вектор исследуемого поля, если же ориентация осей неизвестна, то данные измерений достаточны для оценки скалярной величины поля. Данный тип магнитометра в сочетании с отдельными видами *ФД* обладает высокой надежностью, устойчивостью к помехам и незначи-

тельным энергопотреблением, сравнительно малыми массой и габаритными размерами [9].

По существу, данный магнитометр является прецизионным нуль-индикатором, с помощью которого можно довольно точно измерять компоненты геомагнитного поля, проводить работы, связанные с геофизическими исследованиями, с определением магнитной девиации, создаваемой различными подвижными объектами [11]. Обладая приемлемой чувствительностью и высокой точностью преобразования, а также острой диаграммой направленности, магнитометр может быть использован также в следящих системах, обеспечивающих ориентацию тех или иных объектов по геомагнитному полю.

### Список литературы

1. Логачев А. А., Захаров В. П. Магниторазведка. Л.: Недра, 1979. 351 с.
2. Гордин В. М. Очерки по истории геомагнитных измерений. М.: ИФЗ РАН, 2004. 162 с.
3. Ляховицкий Ф. М., Хмелевской В. К. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989. 252 с.
4. Lanza R., Meloni A. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists. Berlin: Springer, 2006. 280 p.
5. Звездинский С. С. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2009. № 1. С. 16–29.
6. Бугай А. И., Линко Ю. Р., Соборов А. Н. и др. Феррозондовый магнитометр // А. С. № 930176 (СССР) МК G01R 33/02. Оpubл. 23.05.82, Бюл. № 19.
7. Bratland T., Caruso M. J., Schneider R. A., Smith C. H. New Perspective on Magnetic Field Sensing // Sensors. 1998. Vol. 5, N. 12. P. 34–46.
8. Ripka P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Norwood, United States: Artech House, 2001. 516 p.
9. Брякин И. В. Электромодуляционный феррозондовый магнитометр // Труды третьей Российской конференции с международным участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения" (УКИ-12). М.: ИПУ РАН, 2012. С. 610–618.
10. Брякин И. В. Магнитометр для систем ориентации объектов по магнитному полю // Труды "Четвертой Международной конференции по проблемам управления" (МКПУ-IV). М.: ИПУ РАН, 2009. С. 1944–1953.
11. Мухаметшин А. М. Подземная векторная магнитометрия в рудничной геологии. Екатеринбург: ИГД УрО АН СССР, 1997. 214 с.

## Magnetometer with a Test Algorithm of Functioning

I. V. Bryakin, [bivas2006@yandex.ru](mailto:bivas2006@yandex.ru),

Institute of Automation and Information Technologies

of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic

Corresponding author: **Bryakin Ivan V.**, D. Sc., Senior Researcher, Chief of Laboratory of Information-Measuring Systems, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, e-mail: [bivas2006@yandex.ru](mailto:bivas2006@yandex.ru)

Received on July 01, 2016

Accepted on July 25, 2016

*A new method for measuring of the geomagnetic field vector and magnetometer option for its implementation was proposed as a solution to the problems in the sphere of the geomagnetic fields' measurements during geophysical and cosmic investigations. Under consideration is a magnetometer option, which uses one flux-gate sensor, as a basic functional element, oriented on measurement of three orthogonal components of a weak magnetic field, rigidly connected with the platform axes, on which the magnetometer is installed. The vector parameters of the investigated field are defined by means of the magnetometer at the previously known orientation of the platform axes. Application of the additional effect of the useful signals modulation,*

which arises during rotation of the flux-gate sensor in the residual field and during its biasing by the test alternating magnetic field, allows us to minimize all the measurement errors of the field components: graduation errors and sensibility variations (multiplicative error); zero shift and fluctuation (additional error). In the work a new test measurement algorithm is substantiated; an option of magnetometer structural block-diagram is considered; peculiarities of the measuring procedures and magnetometer functioning modes are analyzed. The proposed option of the magnetometer in combination with separate types of flux-gate sensors has high reliability, resistance to interferences, insignificant power consumption, relatively small weight and dimensions. The use of such an option of magnetometer as a precision null-indicator will allow us to measure accurately the geomagnetic field components, to carry out the works, connected with different geophysical investigations; with determination of the magnetic deviation, created by different movable objects. With its sufficient sensitivity and high precision of transformation, as well as a sharp directivity graph, the magnetometer option under consideration may be used also in the tracking systems, allowing orientation of different objects on the geomagnetic field.

**Keywords:** geomagnetic field, magnetometer, flux-gate sensor, measuring procedure, synchronous detector, in-phase and quadrature-phase components, electric signal, test algorithm

For citation:

**Bryakin I. V.** Magnetometer with a Test Algorithm of Functioning, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 49–56.

DOI: 10.17587/mau.18.49-56

#### References

1. **Logachev A. A., Zaharov V. P.** *Magnitorazvedka* (Geomagnetics), Leningrad, Nedra, 1979, 351 p. (in Russian).
2. **Gordin V. M.** *Ocherki po istorii geomagnitnykh izmerenij* (Sketches on history of geomagnetic measurements), Moscow, IFZ RAN, 2004, 162 p. (in Russian).
3. **Ljahovickij F. M., Hmelevskoj V. K.** *Inzhenernaja geofizika* (The engineering geophysics), Moscow, Nedra, 1989, 252 p. (in Russian).
4. **Lanza R., Meloni A.** *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*, Berlin, Springer, 2006, 280 p.
5. **Zvezhinskij S. S.** *Magnitometricheskie ferrozondovye gradien-tometrii dlya poiska vzryvoopasnykh predmetov* (Magnitometrichesky of flux-gate the gradiometers for search of explosive subjects), *Specteh-nika i Syjaz'*, 2009, no. 1, pp. 16–29 (in Russian).
6. **Bugaj A. I., Linko Ju. R., Soborov A. N. i dr.** *Ferrozondovyy magnitometr* (The flux-gate magnetometer), A. S., no. 930176 (SSSR), 1982, Bjul. no. 19 (in Russian).
7. **Bratland T., Caruso M. J., Schneider R. A., Smith C. H.** New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensors*, 1998, vol. 5, no. 12, pp. 4–46.
8. **Ripka P.** *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Norwood, United States, Artech House, 2001, 516 p.
9. **Bryakin I. V.** *Jelektromoduljacionnyj ferrozondovyy magnitometr* (electromodulation of flux-gate the magnetometer), *Trudy tre'ej Rossijskoj Konferencii s Mezhdunarodnym Uchastiem "Tehnicheskie i Programmnye Sredstva Sistem Upravljenja, Kontrolja i Izmerenija" (UKI-12)*, Moscow, IPU RAN, 2012, pp. 610–618.
10. **Bryakin I. V.** *Magnitometr dlya sistem orientacii ob'ektov po magnitnomu polju* (The Magnetometer for systems of orientation of the objects on a magnetic field), *Trudy "Chetvertoj Mezhdunarodnoj Konferencii po Problemam Upravljenja" (MKPU-IV)*, Moscow, IPU RAN, 2009, pp. 1944–1953.
11. **Muhametshin A. M.** *Podzemnaja vektornaja magnitometrija v rudnichnoj geologii* (A underground vector magnetometry in miner geology), Ekaterinburg, IGD UrO AN SSSR, 1997, 214 p.

УДК 681.516.3

DOI:10.17587/mau.18.56-63

**С. Г. Герман-Галкин**, д-р техн. наук, проф., ggsg@yandex.ru,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики "ИТМО", Морская академия, г. Щецин,

**Р. С. Гаврилов**, канд. техн. наук, доц., roman\_gavrilov85@mail.ru,

**Ю. Н. Мустафаев**, доц., mustafaev-spb@mail.ru,

Санкт-Петербургский Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова "Военмех"

## Структурные и имитационные модели в модельно-ориентированном проектировании вентильного электропривода для опорно-поворотного устройства

Представлены результаты модельных исследований структурных и имитационных моделей вентильного электропривода опорно-поворотного устройства. Выделены этапы модельно-ориентированного проектирования (Model-Based Design, MBD) мехатронных систем в пакете MATLAB-Simulink. Рассмотрены алгоритмы генерации исполняемого кода для микроконтроллеров встраиваемых систем с помощью пакета MATLAB-Simulink.

**Ключевые слова:** структурная модель, имитационная модель, MATLAB-Simulink, электропривод, модельно-ориентированное проектирование, генерация кода

### Введение

Проблемы разработки современных систем управления приборным электроприводом непосредственно связаны с задачами моделирования реальных физических объектов, с проектированием систем

управления, с тестированием и созданием рабочих прототипов. Надежность функционирования таких систем тесно связана с их телеметрией, которая также требует решения целого ряда сложных задач — от разработки алгоритмов кодирования, модуляции и фильтрации до оптимизации каналов связи,