

УДК 622.243.272.8

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-33-40

Об оценке предельных погрешностей инклинометрических систем с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками

Д. Г. Миловзоров, кандидат технических наук, доцент,

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

В статье рассматриваются вопросы построения инклинометрических систем с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками, приводится структура инклинометрической системы и фотографии блоков двухосевых акселерометрических датчиков и трехкомпонентного феррозондового магнитометра. Рассматривается методика математического моделирования инклинометрических систем, основанная на формировании векторно-матричных уравнений и получении систем скалярных уравнений связи измеряемых проекций векторов ускорения свободного падения и индукции геомагнитного поля на оси чувствительности феррозондов и акселерометров. Приводятся базовые математические модели инклинометрических систем, позволяющие однозначное определение искомым угловых параметров пространственной ориентации по измеряемым сигналам с феррозондов и акселерометров. Получены общие аналитические выражения погрешностей измерений и выполнена оценка их предельных значений, позволяющая сформулировать требования к точности измеряемых сигналов в зависимости от предъявляемых требований в целом к метрологическим характеристикам инклинометрических систем. На основе анализа предельных значений погрешностей определения зенитного и визирного углов показана их зависимость от параметра наклона корпуса инклинометрической системы и от конкретных значений погрешностей измерений информационных сигналов с акселерометров. На основе анализа предельных значений погрешностей определения азимута показана их зависимость от угла магнитного наклона и от конкретных значений погрешностей измерений информационных сигналов с феррозондов. Приведены графики зависимостей предельных значений погрешностей определения искомым углов.

Ключевые слова: инклинометрическая система, феррозонды, акселерометры, математические модели, предельные погрешности.

Введение

Под инклинометрическими системами (ИнС) понимают комплекс гравичувствительных и магниточувствительных (или инерциальных) датчиков совместно с электронными функциональными блоками, работа которых объединена в совокупности с математическим и программно-алгоритмическим обеспечением, реализация которого имеет целью определение значений параметров пространственной ориентации подвижных и квазистационарных объектов по отношению к базовой системе координат. Области применения ИнС довольно обширны. Это нефтегазодобывающая промышленность, в которой ИнС используются для контроля пространственной ориентации траектории скважины и скважинных объектов. Это строительство, в котором ИнС применяют для контроля пространственной ориентации зданий, сооружений и строительной техники [1, 2]. Это геонавигационные системы летательных, космических аппаратов, морских надводных и подводных су-

дов, транспортных средств различного назначения. Тем не менее состав и функционирование ИнС являются практически однотипными и представляют собой информационно-измерительную систему, общая структура которой условно представлена на рис. 1.

Структура ИнС

ИнС включает в себя блок датчиков БД, электронный блок обработки измерительных сигналов ЭБОИС, телекоммуникационный канал ТКК и систему сбора и обработки данных ССОД. БД представляет собой обособленную конструктивную единицу с собственным базисом корпуса $R_k(0, X_k, Y_k, Z_k)$, содержащую триаду гравичувствительных датчиков $A_{i(x,y,z)}$ и триаду магниточувствительных датчиков $F_{i(x,y,z)}$. В современных ИнС в качестве датчиков $A_{i(x,y,z)}$ используются акселерометрические измерительные преобразователи (акселерометры), а в качестве датчиков $F_{i(x,y,z)}$ – магнитомодуляционные измерительные преобразователи (феррозонды) [3].

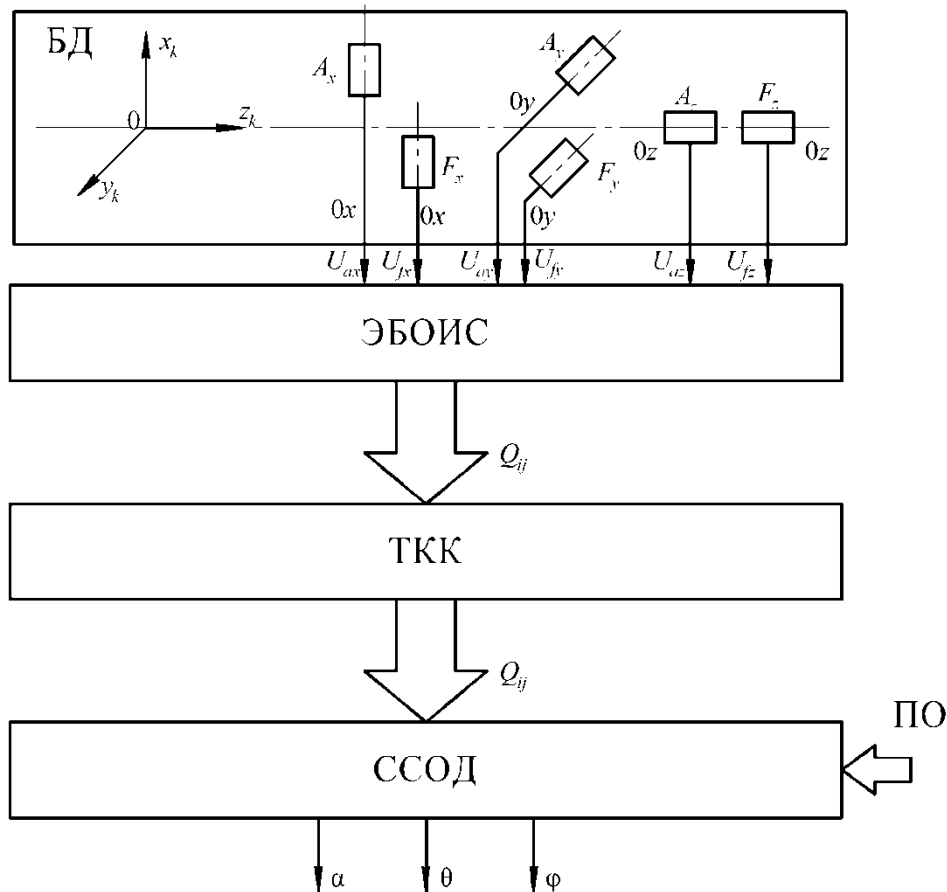


Рис. 1. Структура ИнС

На рис. 2 показан внешний вид блока акселерометрических датчиков, содержащего два двухосевых акселерометра $A1$ и $A2$, причем оси чувствительности акселерометров $A1$ ориентированы по осям OX_k и OZ_k , а ось чувствительности одного из акселерометров $A2$ ориентирована по оси OY_k . На рис. 3 показан внешний вид блока феррозондовых датчиков, содержащего три одноосевых ортогонально ориентированных феррозонда.

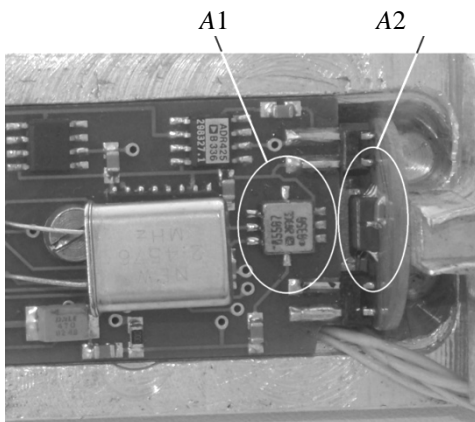


Рис. 2. Блок акселерометрических датчиков

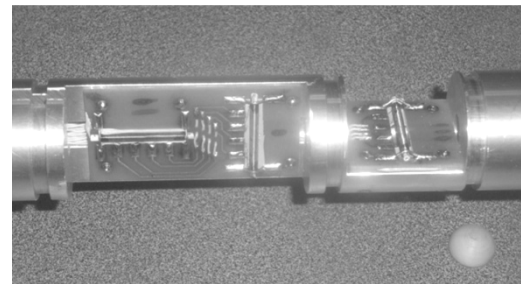


Рис. 3. Блок феррозондовых датчиков

Такие ИнС относят к классу магнитометрических, работающих в естественном магнитном поле Земли. Следует отметить, что известны и гироскопические ИнС, в которых роль триады $F_{i(x,y,z)}$ выполняют датчики угловой скорости вращения Земли. Такие ИнС представляют собой отдельный класс, относящийся к инерциальным навигационным системам. В современных магнитометрических ИнС (рис. 1) акселерометры $A_{i(x,y,z)}$ и феррозонды $F_{i(x,y,z)}$, обладающие диаграммами направленности, позиционируют в корпусе так, что их собственные оси чувствительности были ориентированы, соответственно, по осям ортогонального базиса $R_k(0, X_k, Y_k, Z_k)$. Измерительные сигналы $U_{ai(x,y,z)}$ с акселерометров $A_{i(x,y,z)}$ и $U_{Fi(x,y,z)}$ с феррозондов $F_{i(x,y,z)}$ в ЭБОИС преобра-

зуются в соответствующие цифровые коды Q_{ij} и через ТКК передаются в ССОД, в которой в соответствии со специализированным программным обеспечением ПО осуществляется математическая обработка результатов измерений сигналов $U_{ai(x,y,z)}$ и $U_{Fi(x,y,z)}$ с получением численных значений углов пространственной ориентации корпуса ИнС (α, θ, φ). Безусловно, что в рассматриваемой ИнС точность определения искомым углов непосредственно связана с погрешностями измерений сигналов $U_{ai(x,y,z)}$ с акселерометров $A_{i(x,y,z)}$ и $U_{Fi(x,y,z)}$ с феррозондов $F_{i(x,y,z)}$.

Математическое моделирование ИнС

Решение задачи инклинометрии напрямую связано с классической теорией пространственной ориентации твердых тел и представляет собой частный случай преобразования координат [3]. ИнС с акселерометрами $A_{i(x,y,z)}$ и феррозондами $F_{i(x,y,z)}$ эволюционируют в пространстве совместно с подвижными или квазистационарными объектами в естественных гравитационном и геомагнитном полях, которые определяют базовую правую систему прямоугольных координат $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$ для конкретных точек поверхности Земли, представленную на рис. 2. В основном базисе $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$, связанном с Землей, ось $0Z_0$ – вертикальна и направлена по вектору ускорения свободного падения \vec{g} , ось $0X_0$ лежит в горизонтальной плоскости и направлена на север магнитного меридиана, а ось $0Y_0$ дополняет ортогональную систему координат. Полный вектор индукции геомагнитного поля \vec{T} лежит в плоскости $0X_0Z_0$ и раскладывается для конкретной широты местности на вертикальную \vec{Z} и горизонтальную \vec{H} составляющие, связанные между собой углом магнитного наклона v . Начальное положение корпуса ИнС принимается вертикальным. При движении ИнС по криволинейной траектории L (рис. 4) происходит изменение пространственного положения ее корпуса, что соответствует последовательным плоским поворотам основного базиса $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$: на азимут α вокруг оси $0Z_0$; на зенитный угол θ вокруг оси $0Y_0$; на визирный угол φ вокруг оси $0Z_0$ [4]. Этим поворотам соответствуют векторно-матричные уравнения (ВМУ) [5]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{G}_{Rk} &= A_{\varphi(z)} A_{\theta(y)} \vec{G}_{R0}, \\ \vec{T}_{Rk} &= A_{\varphi(z)} A_{\theta(y)} A_{\alpha(z)} \vec{T}_{R0}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \vec{G}_{R0} и \vec{T}_{R0} – проекции векторов \vec{g} и \vec{T} в основном базисе $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$; \vec{G}_{Rk} и \vec{T}_{Rk} – про-

екции векторов \vec{g} и \vec{T} в базисе корпуса ИнС $R_k(0, X_k, Y_k, Z_k)$; $A_{\varphi(z)}$, $A_{\theta(y)}$ и $A_{\alpha(z)}$ – матрицы направляющих косинусов.

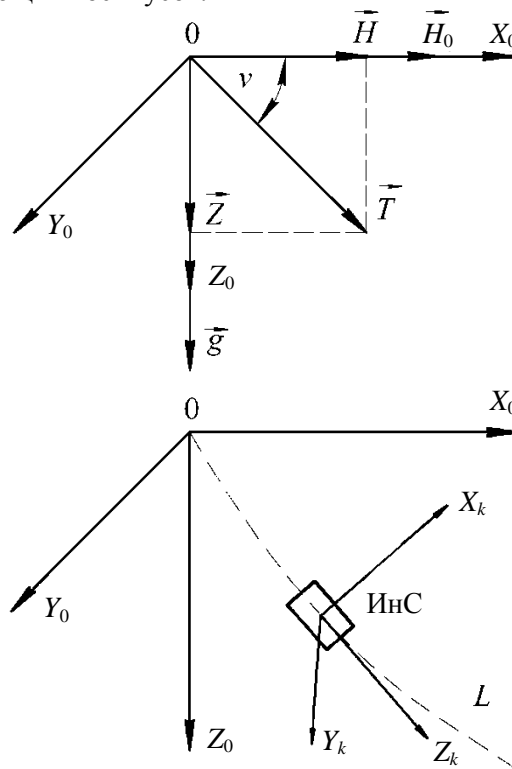


Рис. 4. Основной базис $R_0(0, X_0, Y_0, Z_0)$ и траектория ИнС L

Решением ВМУ (1) являются системы скалярных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} g_x &= (-\cos \varphi \sin \theta) |\vec{g}|, \\ g_y &= (\sin \varphi \sin \theta) |\vec{g}|, \\ g_z &= (\cos \theta) |\vec{g}|; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} t_x &= \left[\begin{array}{l} -\sin v \cos \varphi \sin \theta + \\ + \cos v (\cos \alpha \cos \theta \cos \varphi - \sin \varphi \sin \alpha) \end{array} \right] |\vec{T}|, \\ t_y &= \left[\begin{array}{l} \sin v \sin \varphi \sin \theta - \\ - \cos v (\cos \alpha \cos \theta \sin \varphi + \cos \varphi \sin \alpha) \end{array} \right] |\vec{T}|, \\ t_z &= [\sin v \cos \theta + \cos v \cos \alpha \sin \theta] |\vec{T}|, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $g_{i(x,y,z)}$ – измеряемые проекции вектора \vec{g} с помощью акселерометров; $t_{i(x,y,z)}$ – измеряемые проекции вектора \vec{T} с помощью феррозондов; α, θ и φ – искомые углы; v – угол магнитного наклона для конкретной широты местности.

Причем второе ВМУ (1), применяя матрицы отрицательных поворотов с учетом $(A_{\theta(y)}^{-1} A_{\theta(y)}) = E$ и $(A_{\varphi(z)}^{-1} A_{\varphi(z)}) = E$, можно представить в ином виде:

$$A^{-1}_{\theta(y)} A^{-1}_{\varphi(z)} \vec{T}_{Rk} = A_{\alpha(z)} \vec{T}_{R0},$$

где -1 – символ обратного поворота, E – единичная матрица.

Из полученного выражения также следует система скалярных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \cos\theta(t_x \cos\varphi - t_y \sin\varphi) + t_z \sin\theta &= (\cos\alpha \cos\nu) |\vec{T}|, \\ t_x \sin\varphi + t_y \cos\varphi &= -(\sin\alpha \cos\nu) |\vec{T}|, \\ \sin\theta(-t_x \cos\varphi + t_y \sin\varphi) + t_z \cos\theta &= (\sin\nu) |\vec{T}|. \end{aligned} \right\}$$

Решая системы уравнений (2) и (3) относительно искомых углов, не сложно получить математические модели ИнС, выражающие связь угловых параметров θ и φ в зависимости от измеряемых сигналов $g_{i(x,y,z)}$ и α от измеряемых сигналов $t_{i(x,y,z)}$:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{g_y}{-g_x}, \\ \theta &= \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}{g_z}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{-(t_x \sin\varphi + t_y \cos\varphi)}{\cos\theta(t_x \cos\varphi - t_y \sin\varphi) + t_z \sin\theta}. \quad (5)$$

Представленная совокупность статических математических моделей (1)–(5) адекватна идеальному случаю, характерному следующим допущениям:

– Измеряемые проекции векторов с помощью акселерометров и с помощью феррозондов на оси их чувствительности ортонормированы, т. е. имеют в результате идентичные масштабирующие коэффициенты, приведенные к единице.

– Оси чувствительности акселерометров и феррозондов взаимно ортогональны и совпадают с направлениями осей базиса корпуса ИнС.

– Акселерометры и феррозонды имеют идентичные линейные статические характеристики «выход – вход» и одинаковую крутизну в динамических диапазонах измерений.

– Измеряемые сигналы с акселерометров и с феррозондов не содержат дополнительных температурных и динамических погрешностей.

Исключение любого из перечисленных допущений приводит к появлению погрешностей, величины которых входят в состав величин измеряемых сигналов с акселерометров и феррозондов [6, 7].

Анализ погрешностей ИнС

Теоретические исследования и анализ погрешностей определения искомых углов α , θ и φ

по математическим моделям (1)–(5) представляет вполне определенный научный и практический интерес [8]. В соответствии с теоремой о полном дифференциале функции для математических моделей (4), выраженных в неявном виде, справедливы следующие уравнения в частных производных (здесь измеряемые сигналы с акселерометров $U_{ai(x,y,z)}$ тождественны проекциям $g_{i(x,y,z)}$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial\varphi} [\operatorname{tg}\varphi] \Delta\varphi &= \frac{\partial}{\partial(U_{ax})} \left[\frac{(U_{ay})}{-(U_{ax})} \right] \Delta(U_{ax}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial(U_{ay})} \left[\frac{(U_{ay})}{-(U_{ax})} \right] \Delta(U_{ay}); \\ \frac{\partial}{\partial\theta} [\operatorname{tg}^2\theta] \Delta\theta &= \frac{\partial}{\partial(U_{ax})} \left[\frac{(U_{ax})^2 + (U_{ay})^2}{(U_{az})^2} \right] \Delta(U_{ax}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial(U_{ay})} \left[\frac{(U_{ax})^2 + (U_{ay})^2}{(U_{az})^2} \right] \Delta(U_{ay}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial(U_{az})} \left[\frac{(U_{ax})^2 + (U_{ay})^2}{(U_{az})^2} \right] \Delta(U_{az}), \end{aligned}$$

из которых следуют аналитические выражения погрешностей определения искомых углов $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{1}{\sin\theta} [\Delta(U_{ax}) \sin\varphi + \Delta(U_{ay}) \cos\varphi], \\ \Delta\theta &= [\Delta(U_{ay}) \sin\varphi - \Delta(U_{ax}) \cos\varphi] \cos\theta - \\ &- \Delta(U_{az}) \sin\theta. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Аналогично, для математической модели определения азимута α (5) также справедливо следующее уравнение (здесь также измеряемые сигналы с феррозондов $U_{Fi(x,y,z)}$ тождественны проекциям $t_{i(x,y,z)}$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\operatorname{tg}(\alpha)]}{\partial\alpha} \Delta(\alpha) &= \\ &= \sum_{(i=x,y,z)}^3 \frac{\partial}{\partial(U_{fi})} [F(U_{fi}; \theta, \varphi)] \Delta(U_{fi}) + \\ &+ \sum_{(i=x,y,z)}^2 \frac{\partial}{\partial(\delta_k)} [F(U_{fi}; \theta, \varphi)] \Delta(\delta_k), \end{aligned}$$

где $F(U_{fi}; \theta, \varphi)$ – аргумент арктангенса правой части уравнения (5), а $\delta_k \in (\theta, \varphi)$.

Погрешности $\Delta\alpha$ целесообразно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{1}{\cos v} [-\sin \varphi \cos \alpha - \sin \alpha \cos \theta \cos \varphi] \Delta(U_{fx}), \\ \Delta\alpha &= \frac{1}{\cos v} [-\cos \varphi \cos \alpha + \sin \alpha \cos \theta \sin \varphi] \Delta(U_{fy}), \\ \Delta\alpha &= \frac{1}{\cos v} [-\sin \alpha \sin \theta] \Delta(U_{fz}), \\ \Delta\alpha &= \frac{1}{\cos v} [\sin v \cos \alpha \sin \theta - \cos v \cos \theta] \Delta\varphi, \\ \Delta\alpha &= \frac{1}{\cos v} [-\sin \alpha \sin v] \Delta\theta. \end{aligned} \right\} (7)$$

Полученные выражения (6) и (7) представляют собой математические модели погрешностей определения визирного угла, зенитного угла $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ и погрешности определения азимута $\Delta\alpha$. При этом погрешности $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ функционально зависят не только от погрешностей измеряемых сигналов с акселерометров $\Delta U_{ai(x,y,z)}$, но и от тригонометрических функций синусов и косинусов зенитного и визирного углов. Кроме того, величина погрешности определения визирного угла $\Delta\varphi$ является обратно пропорциональной синусу зенитного угла и при уменьшении наклона (зенитного угла) до нуля, т. е. до вертикали, погрешность $\Delta\varphi$ гипотетически стремится к бесконечности, охватывая неопределенностью практически весь диапазон, т. е. $\Delta\varphi \rightarrow (\pm\pi)$.

Погрешности определения азимута $\Delta\alpha$ (7) функционально зависят не только от погрешностей измеряемых сигналов с феррозондов $\Delta U_{fi(x,y,z)}$, но и от тригонометрических функций синусов и косинусов всех трех углов пространственной ориентации корпуса ИнС – α , θ , φ , а также и от угла магнитного наклонения v для конкретной широты местности.

Представленные математические модели погрешностей $\Delta\varphi$, $\Delta\theta$ (6) и $\Delta\alpha$ (7) позволяют выполнять их анализ с определением численных значений в зависимости от количественных характеристик $\Delta U_{ai(x,y,z)}$ и $\Delta U_{fi(x,y,z)}$, $\Delta\varphi$, $\Delta\theta$, а также и исследовать характер распределения этих погрешностей по диапазонам углов (α , θ , φ).

Тем не менее в практике разработки, проектирования и создания ИнС с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками особое значение имеет априорная оценка предельных значений погрешностей определения искомых угловых параметров, которая позволит получить прогнозное представление о метрологических

характеристиках аппаратуры и определять требования к точностным параметрам датчиков ИнС [9, 10]. При выполнении данного анализа принимаются элементарные свойства тригонометрических функций, а именно $|\sin \delta_k| \leq 1$; $|\cos \delta_k| \leq 1$; $(\sin \delta_k)^2 + (\cos \delta_k)^2 = 1$; $\delta_k \in (\alpha, \theta, \varphi, v)$.

Так, из моделей (6) и (7) следуют выражения предельных значений погрешностей:

$$|\Delta\varphi| \leq \frac{\sqrt{|\Delta(U_{ax})|^2 + |\Delta(U_{ay})|^2}}{|\sin \theta|}; \quad (8)$$

$$|\Delta\theta| \leq \sqrt{\sum_{i=1}^3 |\Delta(U_{ai(x,y,z)})|^2};$$

$$|\Delta\alpha| \leq \frac{1}{|\cos v|} \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^3 |\Delta(U_{fi(x,y,z)})|^2} + |\Delta\varphi| + |\Delta\theta| \right\}. \quad (9)$$

Данные выражения являются обобщенными результатами моделей (6) и (7) и позволяют сформулировать требования к наибольшему по величине значениям $\Delta(U_{ai(x,y,z)})$ и к наибольшему по величине значениям $\Delta(U_{fi(x,y,z)})$, исходя из общих требований к допустимым значениям погрешностей определяемых углов $\Delta\varphi$, $\Delta\theta$, $\Delta\alpha$. В табл. 1 представлены данные о численных значениях $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ для конкретных равновероятных значений погрешностей измеряемых сигналов с акселерометров $\Delta(U_{ai(x,y,z)})$. При расчетах табличных значений необходимо пользоваться формулами перевода «радианы – градусы» и «проценты – относительные единицы». На рис. 5 показано семейство кривых погрешности $|\Delta\varphi|$ в зависимости от зенитного угла θ при различных равновероятных значениях ΔU_a ($\Delta U_{ax} = \Delta U_{ay} = \Delta U_{az} = \Delta U_a$), выраженных в процентах.

Таблица 1

θ , град	$\Delta\varphi$, град			
	$\Delta U_a=0,05\%$	$\Delta U_a=0,1\%$	$\Delta U_a=0,15\%$	$\Delta U_a=0,2\%$
3	0,774114	1,548228	2,322342	3,096456
4	0,580792	1,161584	1,742376	2,323168
5	0,464846	0,929692	1,394538	1,859384
6	0,387588	0,775176	1,162765	1,550353
7	0,332438	0,664876	0,997314	1,329752
8	0,291105	0,58221	0,873315	1,16442
9	0,258984	0,517968	0,776952	1,035935
10	0,233311	0,466622	0,699932	0,933243
$\Delta\theta$, угл. мин	2,977	5,954	8,931	11,908

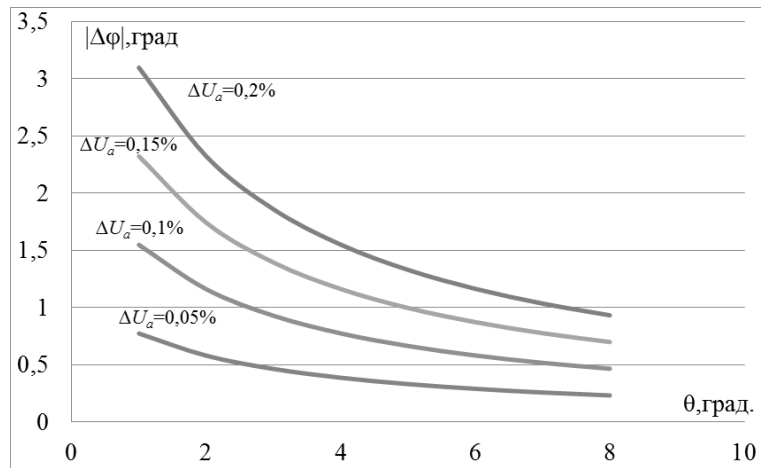


Рис. 5. Распределение погрешности $|\Delta \phi| = f(\theta)$

На рис. 6 представлена зависимость изменения погрешности $|\Delta\theta|$ в виде гистограммы также

при различных равновероятных значениях ΔU_α , выраженных в процентах.

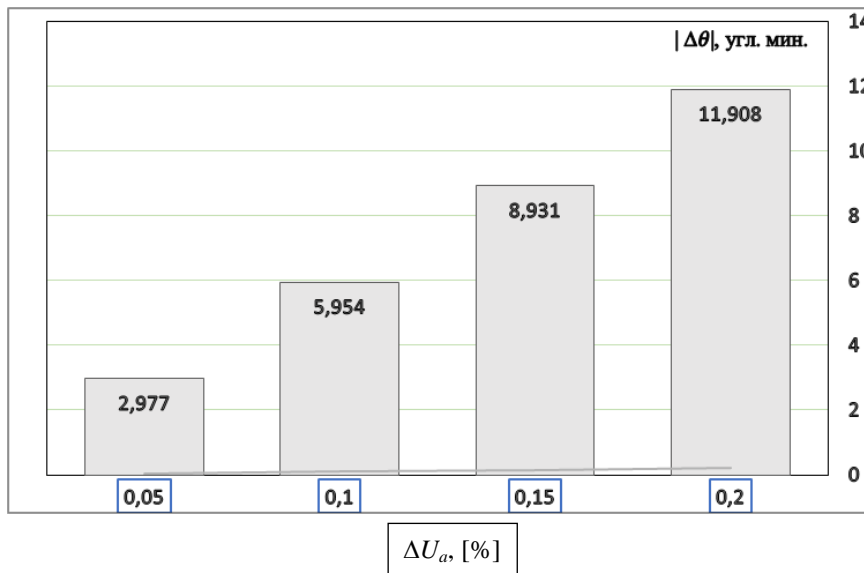


Рис. 6. Погрешности $|\Delta\theta|$ [угл. мин] = $f(\Delta U_\alpha, [\%])$

Аналогичным образом выполняется анализ предельных значений погрешности $\Delta\alpha$ по выражению (9). В табл. 2 представлены результаты расчетов для равновероятных значений $\Delta U_f (\Delta U_{fx} = \Delta U_{fy} = \Delta U_{fz} = \Delta U_f)$, выраженных в процентах.

Таблица 2

v, град	Δα, град.			
	ΔU _f = 0,05%	ΔU _f = 0,1%	ΔU _f = 0,15%	ΔU _f = 0,2%
0	0,871114	0,920734	0,970353	1,019973
15	0,901844	0,953214	1,004584	1,055954
30	1,005876	1,063172	1,120467	1,177763
45	1,231941	1,302114	1,372287	1,442459
60	1,742228	1,841467	1,940706	2,039946
75	3,365726	3,557442	3,749157	3,940872

На рис. 7 показано семейство кривых погрешности $|\Delta\alpha| = f(\Delta U_f)$ в зависимости от угла магнитного наклонения v.

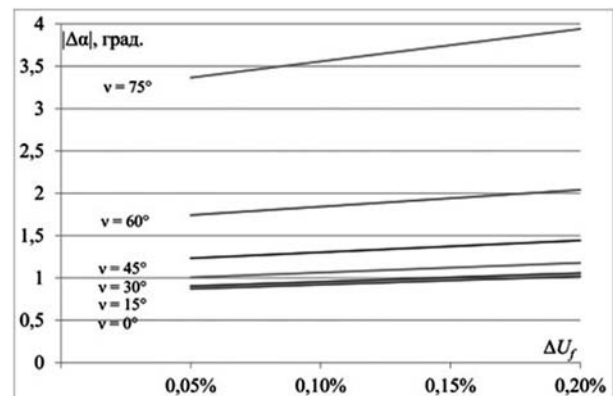


Рис. 7. Семейство кривых погрешности $|\Delta\alpha| = f(\Delta U_f)$ в зависимости от угла магнитного наклонения v

На рис. 8 показано семейство кривых погрешности $|\Delta\alpha| = f(v)$ при различных равновероятных значениях ΔU_f , выраженных в процентах.

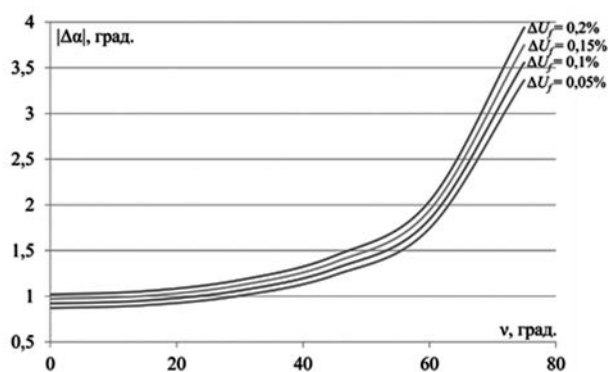


Рис. 8. Семейство кривых погрешности $|\Delta\alpha| = f(v)$ при различных равновероятных значениях ΔU_f

Анализ результатов и выводы

Численные значения, приведенные в табл. 1 и 2, и их графическая интерпретация (рис. 3–5) позволяют не только выполнять оценку предельных значений по модулю погрешностей определения искомого угла пространственной ориентации корпуса ИнС, но и формулировать требования к метрологическим характеристикам самих датчиков – акселерометров и феррозондов. Так, для того чтобы обеспечить требуемые значения предельных погрешностей определения зенитного угла θ , не более 0,1 град., необходимо обеспечить точность измерений сигналов с акселерометров не хуже, чем 0,1 %.

Аналогичную оценку следует выполнять для погрешностей определения визирного угла $\Delta\varphi$ и для погрешностей определения азимута $\Delta\alpha$ с привязкой к конкретным значениям зенитного угла, а именно – к регламентированному наименьшему значению зенитного угла θ , при котором выполняется нормирование метрологических характеристик ИнС в целом.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проектировании инклинометрической аппаратуры, а также при проведении технологических операций калибровки датчиков и формировании алгоритмической обработки результатов измерений.

Библиографические ссылки

1. Функция преобразования феррозонда с однополярным импульсным возбуждением / В. С. Безкорвайный, О. В. Тарасенко, В. В. Яковенко, А. А. Ивженко // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2018. № 4 (10). С. 159–166.
2. Никишечкин А. П., Дубровин Л. М., Давыденко В. И. Частота напряжения запитки обмотки возбуждения феррозонда как полезный сигнал в устройствах измерения напряженности магнитного поля // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 7. С. 8–12.

3. Грунев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н. Классификация погрешностей магнитометрических инклинометров // Каротажник. 2019. № 2 (296). С. 67–70.

4. Milovzorov D. G., Yasoveev V. Kh. Mathematical modeling of fluxgate magnetic gradiometers, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2017. Vol. 53. № 4. DOI: 10.3103/S8756699017040112. Pp. 388–394.

5. Milovzorov D. G., Yasoveev V. Kh. Angular installation options errors correction for three-component vector-measuring transducers with accelerometer at calibration phase. 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2017. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120682. Pp. 23–28.

6. L. Yu et al., "Error Compensation and Implementation of Embedded High-Precision Magnetometer," 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, 2010, pp. 911–914, doi: 10.1109/ICECE.2010.232.

7. G. Liu, Y. Geng and K. Pahlavan, "Direction Estimation Error Model of Embedded Magnetometer in Indoor Navigation Environment," in 2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom), Beijing, China, 2015, pp. 1842–1846, doi: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCCom-IoP.2015.334.

8. Z. Qi, P. Mengchun, C. Dixiang, L. Ji and L. Feilu, "Integrated Compensation Method of Three-axis Magnetometer in Geomagnetic Navigation," in Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, International Conference on, Beijing, China, 2011, pp. 929–932, doi: 10.1109/IMCCC.2011.234.

9. Z. Zhang, C. Xiao, K. Yin and H. Yan, "A Magnetic Field Correction Method for the Non-ideally Placed 3-Axial Magnetometer Sensor," in 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha, China, 2010, pp. 130–133, doi: 10.1109/ICMTMA.2010.208.

10. A. Plotkin, E. Paperno, A. Samohin and I. Sasada, "Compensation of Temperature-Drift Errors in Fundamental-Mode Orthogonal Fluxgates," 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Sorrento, 2006, pp. 1201–1204, doi: 10.1109/IMTC.2006.328450.

References

1. Bezkorovainy V.S., Tarasenko O.V., Yakovenko V.V., Ivzhenko A.A. [Conversion function of a flux gate with unipolar pulse excitation]. Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya. 2018. No. 4 (10), pp. 159–166. (in Russ.).
2. Nikishechkin A.P., Dubrovin L.M., Davydenko V.I. [The frequency of the voltage supplying the excitation winding of the flux gate as a useful signal in devices for measuring the magnetic field strength]. Pribory

i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. 2019. No. 7, pp. 8-12 (in Russ.).

3. Grinev I.V., Korolev A.B., Sitnikov V.N. [Error classification of magnetometric inclinometers]. *Karotazhnik*. 2019. No. 2 (296), pp. 67-70 (in Russ.).

4. Milovzorov D. G., Yasoveev V. Kh. Mathematical modeling of fluxgate magnetic gradiometers, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017. Vol. 53. № 4. DOI: 10.3103/S8756699017040112. Pp. 388-394.

5. Milovzorov D. G., Yasoveev V. Kh. Angular installation options errors correction for three-component vector-measuring transducers with accelerometer at calibration phase. 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2017. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120682. Pp. 23-28.

6. L. Yu et al., "Error Compensation and Implementation of Embedded High-Precision Magnetometer," 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, 2010, pp. 911-914, doi: 10.1109/iCECE.2010.232.

7. G. Liu, Y. Geng and K. Pahlavan, "Direction Estimation Error Model of Embedded Magnetometer in Indoor Navigation Environment," in 2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and

2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom), Beijing, China, 2015 pp. 1842-1846, doi: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCom-IoP.2015.334.

8. Z. Qi, P. Mengchun, C. Dixiang, L. Ji and L. Feilu, "Integrated Compensation Method of Three-axis Magnetometer in Geomagnetic Navigation," in *Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, International Conference on, Beijing, China, 2011, pp. 929-932, doi: 10.1109/IMCCC.2011.234.

9. Z. Zhang, C. Xiao, K. Yin and H. Yan, "A Magnetic Field Correction Method for the Non-ideally Placed 3-Axial Magnetometer Sensor," in 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha, China, 2010, pp. 130-133, doi: 10.1109/ICMTMA.2010.208.

10. A. Plotkin, E. Paperno, A. Samohin and I. Sasada, "Compensation of Temperature-Drift Errors in Fundamental-Mode Orthogonal Fluxgates," 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Sorrento, 2006, pp. 1201-1204, doi: 10.1109/IMTC.2006.328450.

On Estimation of Maximum Errors for Inclinometric Systems with Fluxgate and Accelerometric Sensors

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

The paper deals with the construction of inclinometric systems with fluxgate and accelerometric sensors; the structure of the inclinometric system and photos of two-axis accelerometer sensors block and a three-component fluxgate magnetometer are provided. A method for mathematical modeling of inclinometric systems is considered, based on the formation of vector-matrix equations and obtaining systems of scalar equations for the relationship of the measured projections of the gravitational acceleration vector and the geomagnetic flux density vector on the sensitivity axis of fluxgates and accelerometers. Basic mathematical models of inclinometric systems are presented, which allow the unambiguous determination of the sought angular parameters of the spatial orientation by the measured signals from the fluxgates and accelerometers. General analytical expressions for the measurement errors are obtained and an assessment of their maximum values is performed, which makes it possible to formulate the requirements for the accuracy of the measured signals, depending on the requirements imposed on the metrological characteristics of inclinometric systems in general. Based on the analysis of the maximum errors in determining the zenith and sighting angles, their dependence on the inclination parameter of the inclinometric system body and on the specific values of the measurement errors of information signals from accelerometers is shown. Based on the analysis of the maximum values of the azimuth determination errors, their dependence on the magnetic inclination angle and on the specific values of the measurement errors of information signals from the fluxgates is shown. The graphs of the dependences of the maximum errors values in determining the desired angles are presented.

Keywords: inclinometric system, fluxgates, accelerometers, mathematical models, maximum errors.

Получено: 10.01.2021