

УДК 621.317

## К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ КАРДАНЫХ РАМОК

ПОНОМАРЕВА Е. А.<sup>1\*</sup> к.т.н., доц.,  
ПОНОМАРЕВ С. М.<sup>2\*</sup> асс.,  
РЫЖКОВ И. В.<sup>3\*</sup> к.т.н., доц.

<sup>1\*</sup>Кафедра Информационно-измерительных технологий и систем, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38(0562) 47-08-98, e-mail: pricmech@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1254-4403.

<sup>2\*</sup>Кафедра Информационно-измерительных технологий и систем, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38(0562) 47-08-98.

<sup>3\*</sup>Кафедра Информационно-измерительных технологий и систем, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38(0562) 47-08-98.

**Аннотация. Цель.** Важнейшим компонентом системы пространственной ориентации бурового инструмента является инклинометрический преобразователь, воспринимающий изменение измеряемого параметра. Конструкции инклинометрических преобразователей, предназначенные для измерения азимута  $\alpha$ , зенитного угла  $\theta$  и угла установки отклонителя  $\varphi$  наклонно-направленных, горизонтальных, вертикальных скважин очень разнообразны. Целью данной работы является построение математической модели инклинометрического преобразователя на основе карданных рамок, как компонента системы пространственной ориентации, с учетом инструментальных погрешностей. **Методика.** Улучшение технических характеристик инклинометров (повышение их точности, возможности контроля при движении снаряда по скважине и в процессе бурения, уменьшения диаметра снаряда, расширение диапазона рабочих температур) возможно на основе применения в них феррозондов в качестве чувствительных элементов магнитного поля Земли. Распространенной кинематической схемой преобразователя азимута инклинометра с линейными феррозондами является схема на основании карданных подвесов. Решается задача построения математической модели инклинометрического преобразователя на основе карданных рамок, как компонента системы пространственной ориентации, с учетом инструментальных погрешностей. **Результаты.** Установлено, что погрешность измерения азимута при использовании инклинометрического преобразователя на основе карданных подвесов не превышает  $\pm 2^\circ$ , если инструментальные погрешности не выходят за пределы:  $\Delta\beta = \rho = 0,12^\circ$ ,  $\Delta\delta = 0,17^\circ$ ,  $\lambda = 0,5^\circ$ . Доказано, что на точность измерения азимута существенное влияние оказывает магнитное наклонение. Разработана математическая модель инклинометрического преобразователя с карданными рамками, как компонента системы ориентации, в которой использованы новые формулы для нахождения функциональных зависимостей между углами наклона относительно вертикали и поворота относительно магнитного меридиана в диапазоне изменения углов ориентации. **Научная новизна.** Получил развитие метод определения углов ориентации бурового инструмента, в котором использованы новые формулы расчета погрешности от неидентичности технических характеристик первичных преобразователей, что позволило повысить точность измерений за счет ее предварительного определения и компенсации. **Практическая значимость.** Проведенные теоретические исследования позволяют разработать методику определения погрешностей первичных преобразователей, которая приводит к улучшению метрологических характеристик инклинометрических приборов и повышению точности измерений углов пространственной ориентации.

**Ключевые слова:** инклинометр; феррозонд; синусно-косинусный вращающийся трансформатор; математическая модель; погрешность

## ДО ПИТАННЯ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ НА ОСНОВІ КАРДАНИХ ПІДВІСІВ

ПОНОМАРЬОВА О. А.<sup>1\*</sup> к.т.н., доц.,  
ПОНОМАРЬОВ С. М.<sup>2\*</sup> ас.,  
РИЖКОВ І. В.<sup>3\*</sup> к.т.н., доц.

<sup>1\*</sup>Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та систем, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-08-98, e-mail: pricmech@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1254-4403.

<sup>2\*</sup> Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та систем, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-08-98.

<sup>3\*</sup> Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та систем, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-08-98.

**Анотація. Мета.** Найважливішим компонентом системи просторової орієнтації бурового інструмента є інклінометричний перетворювач, що сприймає зміну вимірюваного параметра. Конструкції інклінометричних перетворювачів, призначених для вимірювання азимута  $\alpha$ , зенітного кута  $\theta$  і кута установки відхилювача  $\varphi$  похило-спрямованих, горизонтальних, вертикальних свердловин дуже різноманітні. Метою даної роботи є побудова математичної моделі інклінометричного перетворювача на основі карданних рамок, як компонента системи просторової орієнтації, з урахуванням інструментальних похибок. **Методика.** Поліпшення технічних характеристик інклінометрів (підвищення їх точності, можливості контролю при русі снаряда по свердловині й у процесі буріння, зменшення діаметра снаряда, розширення діапазону робочих температур) можливо на основі застосування в них ферозондів як чутливих елементів магнітного поля Землі. Розповсюдженою кінематичною схемою перетворювача азимута інклінометра з лінійними ферозондами є схема на підставі карданних підвісів. Вирішується завдання побудови математичної моделі інклінометричного перетворювача на основі карданних рамок, як компонента системи просторової орієнтації, з урахуванням інструментальних похибок. **Результати.** Встановлено, що похибка вимірювання азимута при використанні інклінометричного перетворювача на основі карданних підвісів не перевищує  $\pm 2^\circ$ , якщо інструментальні похибки не виходять за межі:  $\Delta\beta = \rho = 0,12^\circ$ ,  $\Delta\delta = 0,17^\circ$ ,  $\lambda = 0,5^\circ$ . Доведено, що на точність вимірювання азимута істотний вплив виявляє магнітне нахилення. Розроблена математична модель інклінометричного перетворювача з карданними рамками, як компонента системи орієнтації, у якій використані нові формули для знаходження функціональних залежностей між кутами нахилу щодо вертикалі й повороту щодо магнітного меридіана у діапазоні зміни кутів орієнтації. **Наукова новизна.** Одержав розвиток метод визначення кутів орієнтації бурового інструмента, у якому використані нові формули розрахунків похибки від неідентичності технічних характеристик первинних перетворювачів, що дозволило підвищити точність вимірювань за рахунок її попереднього визначення й компенсації. **Практична значимість.** Проведені теоретичні дослідження дозволяють розробити методику визначення похибок первинних перетворювачів, яка приводить до поліпшення метрологічних характеристик інклінометричних приладів і підвищенню точності вимірювань кутів просторової орієнтації.

**Ключові слова:** інклінометр; ферозонд; синусно-косинусний обертовий трансформатор; математична модель; похибка

## ON THE QUESTION OF CONSTRUCTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF COMPONENTS THE ORIENTATION SYSTEM BASED ON THE CARDANIC SUSPENSION

PONOMARYOVA E. A.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor*

PONOMARYOV S. M.<sup>2\*</sup>, *Assistant Professor,*

RYZHKOV I. V.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor*

<sup>1\*</sup> Department of Informatively-measuring technologies and systems, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-08-98, e-mail: pricmech@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1254-4403

<sup>2\*</sup> Department of Informatively-measuring technologies and systems, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-08-98.

<sup>3\*</sup> Department of Informatively-measuring technologies and systems, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-08-98.

**Abstract. Purpose.** An important component of the system of spatial orientation of the drilling tool is the inclinometer, which senses the change in the measured parameter. The designs of the inclinometer sensors designed to measure the azimuth  $\alpha$ , the zenith angle  $\theta$  and the angle of installation of the deflector  $\varphi$  of the directional, horizontal, vertical wells are very diverse. The aim of this work is to construct a mathematical model of an inclinometer sensor based on cardanic suspension, as a component of the system of spatial orientation, taking into account instrumental errors. **Methodology.** Improving the technical characteristics of inclinometers (increasing their accuracy, controlling the movement of the projectile through the well and during drilling, reducing the diameter of the projectile, expanding the operating temperature range) is possible on the basis of the use of ferroprobs in them as sensitive elements of the Earth's magnetic field. A widespread kinematic scheme of the azimuth sensors of the inclinometer with linear ferroprobes is a circuit based on cardanic suspension. The problem of constructing a mathematical model of an inclinometer sensor based on cardanic suspension is solved, as a component of the system of spatial orientation, taking into account instrumental errors. **Findings.** It is established that the error in measuring azimuth when using an inclinometer sensor based on cardanic suspension does not exceed  $\pm 2^\circ$  if the instrumental errors do not exceed the limits:  $\Delta\beta = \rho = 0,12^\circ$ ,  $\Delta\delta = 0,17^\circ$ ,  $\lambda = 0,5^\circ$ . It is proved that the

magnetic inclination has a significant influence on the accuracy of the azimuth measurement. A mathematical model of an inclinometer with a cardanic suspension is developed as a component of the orientation system in which new formulas are used to find the functional dependencies between the angles of inclination relative to the vertical and the rotation relative to the magnetic meridian in the range of orientation angles. **Originality.** A method for determining the angles of the orientation of the drilling tool has been developed, in which new formulas for calculating the error from the non-identity of the technical characteristics of primary converters have been used, which has made it possible to increase the accuracy of measurements by means of its preliminary determination and compensation. **Practical value.** The carried out theoretical researches allow to develop a technique for determining the errors of primary converters, which leads to improved metrological characteristics of inclinometer instruments and to an increase in the accuracy of measurements of the angles of spatial orientation.

**Keywords:** inclinometer; ferroprobe, rezolver; mathematical model; an error

## Введение

Важнейшим компонентом системы пространственной ориентации бурового инструмента является инклинометрический преобразователь (ИП), воспринимающий изменение измеряемого параметра.

Конструкции ИП, предназначенные для измерения азимута  $\alpha$ , зенитного угла  $\theta$  и угла установки отклонителя  $\varphi$  наклонно-направленных, горизонтальных, вертикальных скважин очень разнообразны.

Достаточно распространенной конструкцией на сегодняшний день остается кинематическая схема на основании карданных подвесов [1, 2, 3, 4, 6]. В качестве чувствительного элемента ИП наиболее часто используются феррозондовые преобразователи. Это объясняется простотой конструкции, высокой точностью, вибростойкостью, термостойкостью [5, 7, 8, 9].

Решение задачи построения моделей инклинометрических преобразователей для оптимального выбора структуры устройства, определения связи между отдельными параметрами, оценка их влияния на характер установившихся режимов является важной и актуальной.

## Цель

Целью данной работы является построение математической модели инклинометрического преобразователя на основе карданных рамок, как компонента системы пространственной ориентации, с учетом инструментальных погрешностей.

## Методика

Улучшение технических характеристик инклинометров (повышение их точности, возможности контроля при движении снаряда по скважине и в процессе бурения, уменьшения диаметра снаряда, расширение диапазона рабочих температур) возможно на основе применения в них феррозондов в качестве чувствительных элементов магнитного поля Земли. Распространенной кинематической схемой преобразователя азимута инклинометра с линейными феррозондами является схема, представленная на рис. 1.

В наклонной скважине наружная карданная рамка 1 устанавливает ось чувствительности феррозонда 3 перпендикулярно плоскости наклона, а внутренняя рамка 2 – ось чувствительности феррозонда 4 в плоскости наклона и, одновременно, за счет смещенного центра тяжести, в плоскости горизонта. Напряжение, снимаемое с феррозондов, реагирующих на горизонтальную составляющую вектора напряженности магнитного поля Земли, пропорционально синусу и косинусу угла азимута наклонной скважины. Однако в реальных условиях из-за моментов трения в опорах карданных рамок, феррозонды измеряют и вертикальную составляющую магнитного поля Земли, что приводит к погрешности измерения азимута. Кроме того, к погрешности измерения азимута приводит неточность сборки и регулировки осей чувствительности феррозондов.

Выведем конкретные аналитические выражения погрешности для датчика азимута представленной кинематической схемы.

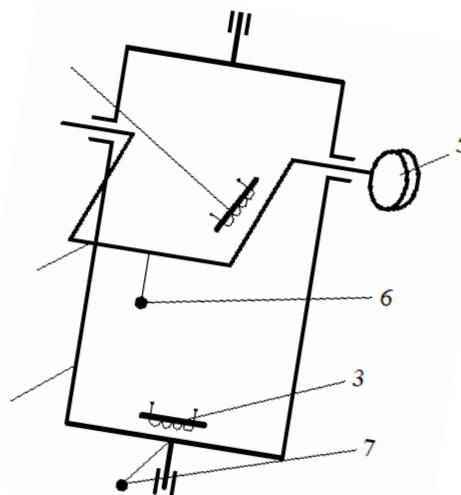


Рис. 1. Кинематическая схема преобразователя азимута инклинометра: 1 – наружная карданная рамка; 2 – внутренняя карданная рамка; 3,4 – феррозонды; 5 – синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы; 6,7 – устанавливающие грузы /Kinematics chart of inclinometer sensor: 1 – outer cardanic suspension; 2 – internal cardanic suspension; 3,4 – ferroprobes; 5 – revolvers; 6,7 – settings loads

Матрицы направляющих косинусов угла азимута, зенитного и визирного углов определяются в соответствии с выражениями, которые хорошо известны из литературы [3, 4]. Положение репера  $R_3$ , соответствующего системе координат, связанной с корпусом инклинометра, выражается матрицей:

$$L = A_{\varphi(3)}A_{\theta(2)}A_{\alpha(3)}. \quad (1)$$

Рассмотрим вектор напряженности магнитного поля Земли  $\vec{T}(H, 0, Z)$ , заданного в неподвижном репере  $R$ . Координаты вектора  $\vec{T}$  в репере  $R_3$  определяются из матричного равенства:

$$\vec{T}_{R3} = L\vec{T}_R \quad (2)$$

Свяжем с чувствительным элементом инклинометра подвижный репер  $R_i$ , в котором координаты вектора  $\vec{T}$  вычисляется из следующего выражения:

$$\vec{T}_{Ri} = N\vec{T}_{R3}, \quad \vec{T}_{R3} = N^{-1}\vec{T}_{Ri}, \quad (3)$$

где  $N^{-1}$  – обратная матрица направляющих косинусов углов поворотов рамок. Матрица  $N^{-1}$  имеет вид  $N^{-1} = \prod_i A_{i(k)}^T$ , где  $k = 1, 2, 3$ .

Из выражений (2) и (3) получим:

$$\vec{T}_{Ri} = NL\vec{T}_R. \quad (4)$$

С учетом равенства  $\vec{T}_{Ri} = A_{\alpha(3)}\vec{T}$  для идеального преобразователя азимута

$$NL = A_{\alpha}. \quad (5)$$

В реальных условиях это равенство не выполняется, т.к. в результирующую матрицу  $N$  входят матрицы  $A_{\Delta j}$  дополнительных углов  $\Delta j$ , являющихся инструментальными погрешностями.

Так как углы  $\Delta j$  малы и  $\sin \Delta j = \Delta j$ ,  $\cos \Delta j = 1$ , то матрицы  $A_{\Delta j}$  можно представить в виде:

$$A_{\Delta j} = E + \varepsilon_{\Delta j}, \quad (6)$$

где  $E$  – единичная матрица.  $\varepsilon_{\Delta j}$  – матрица малых вращений. Матрица  $N$  с учетом инструментальных погрешностей запишется в виде

$$N = \prod_{i,j} A_{i(k)}A_{\Delta j} \quad (7)$$

Учитывая (6) и пренебрегая составляющими высших порядков малости, перепишем выражение (7)

$$N = \prod_i A_{i(k)} \left[ E + \sum_j \Delta j \varepsilon_{(k)} \right] \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{(k)}$  – кососимметричная матрица вида:

$$\varepsilon_{(1)} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}; \quad \varepsilon_{(2)} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad \varepsilon_{(3)} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Координаты вектора  $T$  с учетом инструментальных погрешностей определяются из векторного равенства:

$$\begin{aligned} \vec{T}_{Ri} &= \vec{T}_{Ri} + \prod_i A_{i(k)} \sum \Delta j \varepsilon_{(k)} L \vec{T}_R, \\ \vec{T}'_{Ri} &= \vec{T}_{Ri} + \sum_j \Delta j \cdot M \vec{T}_R, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $M = \prod A'_{i(k)} \varepsilon_{(k)} L$ .

Из векторного равенства (9) следует два скалярных уравнения:

$$\begin{cases} H \cos \chi = H \left[ \cos \alpha + \sum_j \Delta j M_{11} \right] + Z \sum_j \Delta j M_{13} \\ -H \sin \chi = H \left[ \sin \alpha + \sum_j \Delta j M_{21} \right] + Z \sum_j \Delta j M_{23} \end{cases} \quad (10)$$

где  $\chi$  – измеряемый азимут,  $M_{11}, M_{13}, M_{21}, M_{23}$  – элементы матрицы  $M$ .

Разделив второе уравнение на первое, получим решение системы уравнений:

$$\chi = \text{arctg} \frac{\sin \alpha - \sum_j \Delta j (M_{21} + bM_{23})}{\cos \alpha + \sum_j \Delta j (M_{11} + bM_{13})}, \quad (11)$$

где  $b$  – магнитное наклонение.

Обозначим через  $\beta$  угол поворота внешней карданной рамки относительно корпуса, через  $\delta$  – внутренней карданной рамки относительно внешней. Введем углы, соответствующие инструментальным погрешностям:  $\varphi - \beta = \Delta\beta$  – угол неточной установки внешней рамки в плоскость наклона,  $\theta - \delta = \Delta\delta$  – внутренней рамки в плоскость горизонта,  $\rho$  – угол негоризонтальности осей чувствительности феррозондов,  $\lambda$  – угол неортогональности осей чувствительности феррозондов. Проекции вектора  $\vec{T}$  на оси чувствительности феррозондов определяются из уравнений:

$$\begin{cases} \vec{T}_{R4} = A_{\rho(1)}A_{(\varphi-\beta)(3)}A_{\theta(2)}A_{\alpha(3)}\vec{T}_R \\ \vec{T}_{R5} = A_{\lambda(3)}A_{\delta(2)}A_{(\varphi-\beta)(3)}A_{\theta(2)}A_{\alpha(3)}\vec{T}_R \end{cases} \quad (12)$$

Учитывая выражение (9) и произведя преобразование в соответствии с (11), из (12) получим:

$$\left. \begin{aligned} \vec{T}_{R4} &= [E + \rho \varepsilon_{(1)} + \Delta \beta \varepsilon_{(3)}] A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \vec{T}_R \\ \vec{T}_{R5} &= [E + \Delta \delta \varepsilon_{(2)} + \lambda \varepsilon_{(3)} + A_{\delta(2)}^T \Delta \beta \varepsilon_{(3)} A_{\theta(2)}] A_{\alpha(3)} \vec{T}_R \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решая выражение (13), найдем азимут из отношения проекций  $T_{Y5}/T_{X4}$  в соответствии с формулой (11):

$$\chi = \arctg \frac{\sin \alpha - \rho(\cos \alpha \sin \theta + b \cos \theta)}{\cos \alpha - \Delta \delta b - \lambda \sin \alpha - \Delta \beta \sin \alpha \cos(\theta - \Delta \delta)} + \frac{\Delta \beta(\cos \alpha \cos \theta - b \sin \theta)}{\cos \alpha - \Delta \delta b - \lambda \sin \alpha - \Delta \beta \sin \alpha \cos(\theta - \Delta \delta)} \quad (14)$$

Если погрешности  $\Delta \beta, \Delta \delta, \lambda, \rho$  равны нулю, то из выражения (14) определяем азимут скважины  $\chi = \alpha$ .

Разложим в ряд Маклорена по степеням  $\Delta \beta, \Delta \delta, \lambda, \rho$  в окрестностях точки ноль и, ограничившись первым приближением, запишем общее выражение для погрешности в азимуте от инструментальных ошибок:

$$\Delta \chi = \Delta \beta(\cos \theta - b \sin \theta \cos \alpha) + \Delta \delta b \sin \alpha + \rho(\cos \alpha \sin \theta + b \cos \theta) \cos \alpha + \lambda \sin^2 \alpha \quad (15)$$

Оценим погрешность по максимуму:

$$|\Delta \chi| \leq |\Delta \beta|(1+b) + |\Delta \delta|b + |\rho|(1+b) + |\lambda|. \quad (16)$$

На основе приведенных расчетов можно сделать **вывод**, что суммарная погрешность в азимуте не превышает  $\pm 2^\circ$ , если инструментальные погрешности не выйдут за пределы:  $\Delta \beta = \rho = 0,12^\circ, \Delta \delta = 0,17^\circ, \lambda = 0,5^\circ$ . Кроме того, оценка по максимуму показывает, что на точность измерения азимута существенное влияние оказывает магнитное наклонение, величина которого значительна.

Преобразователь зенитного угла инклинометрического преобразователя строится по схеме инклинометра с двумя карданными рамками, устанавливаемыми в плоскости наклона и горизонта грузами (рис. 1). Чувствительным элементом является синусно-косинусный вращающийся трансформатор. Положение репера  $R_5$ , соответствующего системе координат, связанной с внутренней карданной рамкой, определяется матрицей:

$$N^T = A_{\delta(2)}^T A_{\beta(3)}^T \quad (17)$$

Рассмотрим вектор  $\vec{P}$ , коллинеарный вектору силы тяжести  $\vec{g}$  и определяемый в виде матрицы столбца  $\vec{P}_R = \|0, 0, 1\|$  в репере  $R$ . Координаты вектора  $\vec{P}$  в репере  $R_3$  определяются из векторного уравнения:

$$\vec{P}_{R3} = L \vec{P}_R \quad (18)$$

Свяжем с ротором синусно-косинусного вращающегося трансформатора, жестко закрепленным на внутренней карданной рамке, подвижный репер  $R_5$ , в котором координаты вектора  $\vec{P}$  вычисляются из следующего выражения:

$$\vec{P}_{R5} = N \vec{P}_{R3} \quad (19)$$

Из(18) и (19) следует:

$$N^T = L \quad (20)$$

Произведение матриц (17) равно:

$$N^T = A_{\delta(2)}^T A_{\beta(3)}^T = \begin{vmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \delta \cos \beta & \sin \beta & -\sin \delta \cos \beta \\ -\cos \delta \sin \beta & \cos \beta & \sin \delta \sin \beta \\ \sin \delta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix} \quad (21)$$

Сравнивая элементы матриц (1) и (2.1) с учетом (20), получим:

$$\cos \delta = \cos \theta \quad (22)$$

Таким образом, из выражения (22) следует, что  $\delta = \theta$ , т.е. электрический преобразователь угла, установленный на внутренней карданной рамке, выдает сигнал, пропорциональный зенитному углу.

### Результаты

Установлено, что погрешность измерения азимута при использовании инклинометрического преобразователя на основе карданных подвесов не превышает  $\pm 2^\circ$ , если инструментальные погрешности не выходят за пределы:  $\Delta \beta = \rho = 0,12^\circ, \Delta \delta = 0,17^\circ, \lambda = 0,5^\circ$ .

Доказано, что на точность измерения азимута существенное влияние оказывает магнитное наклонение.

### Научная новизна и практическая значимость

Получил развитие метод определения углов ориентации бурового инструмента, в котором использованы новые формулы расчета погрешности от неидентичности технических характеристик первичных преобразователей, что позволило повысить точность измерений за счет ее предварительного определения и компенсации.

Проведенные теоретические исследования позволяют разработать методику определения погрешностей первичных преобразователей, которая приводит к улучшению метрологических характеристик инклинометрических приборов и повышению точности измерений углов пространственной ориентации.

### Выводы

1. Разработана математическая модель инклинометрического преобразователя с карданными рамками, как компонента системы ориентации, в

которой использованы новые формулы для нахождения функциональных зависимостей между углами наклона относительно вертикали и поворота относительно магнитного меридиана в диапазоне изменения углов ориентации  $0 \leq \theta < \pi$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ,  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ .

2. Учет в данной модели погрешностей от неидентичности технических характеристик первичных преобразователей позволяет повысить эффективность определения углов ориентации в 3 раза.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аксельрод С. М. Современные проблемы определения положения скважин (по материалам американских публикаций) / С. М. Аксельрод // Каротажник. – 2007. – №1 (154). – С.104 – 137.
2. Забойные инклинометрические системы и их сравнительные характеристики. Режим доступа: <http://www.Petrogloss.narod.ru>.
3. Ковшов Г. Н. Инклинометры. (Основы теории и проектирования) / Ковшов Г.Н. Алимбеков Р.И., Жибер А.В. – Уфа: Гилем, 1998. – 380 с
4. Ковшов Г. Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г.Н. Ковшов, Г.Ю. Коловертнов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 228с.
5. ООО НПП «ИНГЕО». Техническое состояние скважин: [каталог]. Цифровой инклинометрический прибор ЦИП-42Н. – 2005. – 220 с.
6. Пономарева Е. А. Математическая модель инклинометра с карданными рамками на основе магниточувствительных преобразователей / Е.А. Пономарева, И.В. Рыжков // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – №10. – С. 6 – 11.
7. Пономарева Е. А. Методы повышения термостойкости инклинометрических преобразователей / Е.А. Пономарева, И.В. Рыжков // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – №10. – С. 4 – 9.
8. Телесистемы и каротажи MWD, LWD, PDD. Компания «Геолінк» (SONDEX), (г. Абердинб Шотландия). Режим доступа: <http://www.geolink.nm.ru>. Загл. с экрана. – Перевірено:23.09.2017
9. GIS MARKET SUPPORT ASSOCIATION. Каталог продукции Швейцарской фирмы Leica Geosystems. Режим доступа: <http://www.gisa.ru/484663.html>. Загл. с экрана. – Перевірено:23.09.2017

### REFERENCES

1. Akselrod S.M. *Sovremennyye problemy opredeleniya polozheniya skvazhin* (po materialam amerikanskikh publikatsiy) [Modern problems of position-finding of mining holes (on materials of the American publications)]. *Karotazhnik* [Logger]. 2007, Vol. 1, no 154, pp. 104 – 147. (in Russian).
2. *Zaboynyye inklinometricheskiye sistemy i ikh sravnitelnyye kharakteristiki* [Downhole inclinometric systems and their comparative characteristics]. Available at: <http://www.petrogloss.narod.ru>. (in Russian).
3. Kovshov G.N., Alimbekov R.I. end Zhiber A.V. *Inklinometry (Osnovy teorii i proektirovaniya)* [Inclinometers. (Bases of theory and planning)]. Ufa: Gilem Publ., 1998, 380 p.(in Russian).
4. Kovshov G.N. end Kolovertnov G.Yu. *Pribory kontrolya prostranstvennoy orientatsii skvazhin pri bureni* [Devices of control of spatial orientation of mining holes at the boring drilling].Ufa: UGNTU Publ., 2001, 228 p. (in Russian).
5. *ООО НПП ИНГЕО. Tekhnicheskoye sostoyaniye skvazhin (katalog). Tsifrovoy inklinometricheskiy pribor TSIP-42N* [LLC SPE SNGEO. Technical condition of wells: [catalog]. Digital inclinometric device TSIP-42N], 2005, 220 p. (in Russian).
6. Ponomareva E.A. and Ryzhkov I.V. *Matematicheskaya model inklinometra s kardannymi ramkami na osnove magnitochuvstvitelnykh preobrazovateley* [Mathematical model of the inclinometer with cardan frames based on magnetosensitive sensors ].*Visnyk Prydniprovskoi dergavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk: PDABA, 2010, no. 10, pp. 6 – 11. (in Ukrainian).
7. Ponomareva E.A. and Ryzhkov I.V. *Metody povysheniya termostoykosti inklinometricheskikh preobrazovateley* [Methods of increasing the thermal stability of inclinometric sensors]. *Visnyk Prydniprovskoi dergavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk: PDABA, 2009, no. 10, pp. 4 – 9. (in Ukrainian).
8. *Telesistemy i karotazhi MWD, LWD, PDD* [Telesystems and logging MWD, LWD, PDD]. *Kompaniya Geolink* [Company Geolink]. Available at: <http://www.geolink.nm.ru>. (in Russian).
9. GIS MARKET SUPPORT ASSOCIATION. *Katalog produktii Shveytsarskoy firmy Leica Geosystems* [Product catalog of the Swiss company Leica Geosystems]. Available at: <http://www.gisa.ru/484663.html>.