

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ОРІЄНТАЦІЇ СВЕРДЛОВИН В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ

Запропоновано математичну модель інклінометра, для системи контролю і орієнтації, яка застосовується в процесі буріння свердловин, на основі тривісного мікромеханічного акселерометра, у скалярному і матричному вигляді.

На сьогодні для визначення просторового положення свердловини найширше застосовуються інклінометричні пристрої з використанням датчиків, що реагують на магнітне і гравітаційне поле Землі. До них висуваються вимоги: високої термостійкості (до +200 °С), вібро- і удароміцності, нормально-го функціонування після дії ударів і вібрацій, ударо- і вібростійкості — функціонування за умов вібрацій і ударів, що супроводжують процес буріння, малих габаритів (для розробки конструкцій інклінометрів по захисному кожусі, у межах 25...40 мм) [5]. Останнє особливо важливо для буріння за допомогою інклінометра бічних стовбурів у старих обсаджених свердловинах, оскільки вони буряться долотом малого діаметра.

Застосування мікромеханічних акселерометрів для інклінометричної системи контролю і орієнтації дозволить різко зменшити габарити інклінометра по діаметру захисного кожуха до 25...27 мм, що дозволить використовувати мікромеханічні акселерометри в свердловинах малого діаметра.

Акселерометри є датчиками лінійного прискорення і у цій якості широко застосовуються для вимірювання кутів нахилу тіл, сил інерції, ударних навантажень і вібрації. Вони застосовуються на транспорті, у медицині, у промислових системах вимірювання і керування, в інерційних системах навігації [3].

У цей час успішно функціонує велика кількість закордонних компаній: Analog Devices, Freescale, Bosch, Silicon Designs, STMicroelectronics і т. ін., які розробляють і виготовляють ряд мікромеханічних акселерометрів: одно-, дво-, тривісні мікромеханічні акселерометри, що мають різні діапазони вимірювання прискорень, масу, габарити, ціни.

Мікромеханічні акселерометри мають поріг чутливості $10^{-4} g$, що відповідає зміні нахилу відносно горизонту $\approx 0,4$ кут. хвилини. Таким чином, від інклінометрів варто було б очікувати такого ж порядку точності вимірювань зенітного і візирного кутів. Однак на практиці цього не досягається.

Технологія виготовлення тривісних мікромеханічних акселерометрів, дозволяє виготовляти чутливі елементи датчика по трьох взаємноортогональних осях. Однак електричні параметри первинних датчиків, що становлять тривісний мікромеханічний акселерометр для інклінометра, відмінні один від одного. Під час встановлення блока тривісного мікромеханічного акселерометра в корпус інклінометра, його можуть повернути на деякі малі кути щодо осей вимірювання інклінометра, що призведе до неточності вимірювання зенітного і візирного кутів.

Мета статті — розробити математичну модель тривісного мікромеханічного акселерометра для інклінометра системи контролю і орієнтації, що застосовуються під час буріння свердловин малого діаметра, з урахуванням неточності встановлення тривісного мікромеханічного акселерометра в корпус інклінометра.

Основний матеріал

Процеси вимірювання орієнтації свердловини за своєю природою відносяться до тих, що відбуваються повільно. Тому використання надмірності часу для вимірювань є ефективною можливістю збільшення точності. До неї віднесемо збільшення кількості вимірювань на окремій ділянці траєкторії з подальшою статистичною обробкою [5].

Основними перешкодами, що впливають на точність перетворення, є: удари, вібрації; варіації на-

пруги живлення, зміна температури, зміна розмірів корпусу інклінометра у разі зміни тиску; змінні магнітні і електричні поля; змінні параметри каротажного кабелю [6].

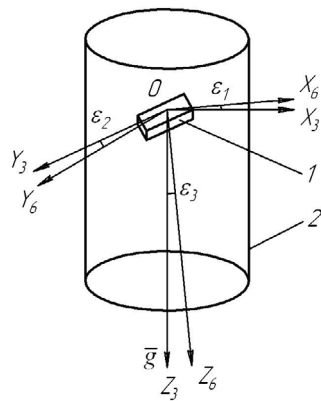


Рис. 1. Кінематична схема інклінометра з похибкою встановлення блоку тривісного мікромеханічного акселерометра відносно корпусу інклінометра:

- 1 — тривісний мікромеханічний акселерометр;
- 2 — корпус інклінометра;
- \bar{g} — прискорення вільного падіння

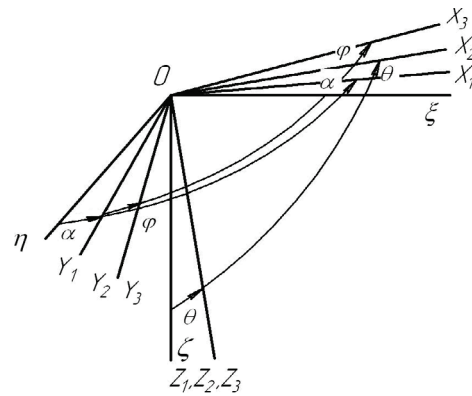


Рис. 2. Система координат, що пов'язує інклінометр із нерухою системою координат

Блок акселерометрів, нерухою закріплений у тілі свердловинного знаряддя (рис. 1), утворює своїми осями чутливості ортогональну систему координат. Осі чутливості тривісного мікромеханічного акселерометра під час збирання в інклінометрі встановлюються з деякою похибкою через неточність встановлення плати з блоком тривісного мікромеханічного акселерометра в корпус інклінометра. Спостерігається невідповідність осей вимірювання інклінометра з осями вимірювання тривісного мікромеханічного акселерометра. Інакше осі чутливості акселерометра повернені щодо репера $R_3(0, x_3, y_3, z_3)$, пов'язаного з корпусом інклінометра, на деякі малі кути.

Задамо похибки повороту осей чутливості блоку акселерометра векторами, відповідно, $\bar{\epsilon}_1 (\epsilon_{11}, \epsilon_{21}, \epsilon_{31})$, $\bar{\epsilon}_2 (\epsilon_{12}, \epsilon_{22}, \epsilon_{32})$, $\bar{\epsilon}_3 (\epsilon_{13}, \epsilon_{23}, \epsilon_{33})$, де ϵ_{1i} , ϵ_{2i} , ϵ_{3i} ($i = 1, 2, 3$) — малі кути повороту осі чутливості блоку акселерометрів навколо першої осі $(0, x_3)$, другої $(0, y_3)$, третьої $(0, z_3)$ осі. Введемо кососиметричні матриці $\tilde{\epsilon}_1$, $\tilde{\epsilon}_2$, $\tilde{\epsilon}_3$, відповідні векторам $\bar{\epsilon}_1$, $\bar{\epsilon}_2$, $\bar{\epsilon}_3$:

$$\tilde{\epsilon}_1 = \begin{vmatrix} 0 & -\epsilon_{31} & \epsilon_{21} \\ \epsilon_{31} & 0 & -\epsilon_{11} \\ -\epsilon_{21} & \epsilon_{11} & 0 \end{vmatrix}; \tilde{\epsilon}_2 = \begin{vmatrix} 0 & -\epsilon_{32} & \epsilon_{22} \\ \epsilon_{32} & 0 & -\epsilon_{12} \\ -\epsilon_{22} & \epsilon_{12} & 0 \end{vmatrix}; \tilde{\epsilon}_3 = \begin{vmatrix} 0 & -\epsilon_{33} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{33} & 0 & -\epsilon_{13} \\ -\epsilon_{23} & \epsilon_{13} & 0 \end{vmatrix}.$$

Спроекуємо вектор прискорення вільного падіння \bar{g}_{R_0} на осі чутливості тривісного блоку акселерометрів, поверненого щодо репера R_3 , пов'язаного з корпусом інклінометра на малі кути ϵ_{11} , ϵ_{21} , ϵ_{31}

$$\bar{g}_{R_6}^* = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_\phi A_\theta A_\alpha \cdot \bar{g}_{R_0}, \tag{1}$$

де \bar{g}_{R_0} — вектор прискорення вільного падіння в проекціях, відповідно, на осі координат, пов'язані з вихідним базисом (вісь $O\xi$ по дотичній до географічного меридіана на Північ, вісь $O\zeta$ — по вертикалі місця і у глиб Землі; $O\eta$ — по дотичній до географічної паралелі й на Схід — репер $R_0(O\xi\eta\zeta)$ (рис. 2); $\bar{g}_{R_6}^*$ — вектор прискорення вільного падіння в проекціях, відповідно, на осі координат, пов'язаних з похибкою встановлення блоку тривісного мікромеханічного акселерометра; A_ϕ , A_θ , A_α — відповідно, матриці направляючих косинусів візирного ϕ , зенітного θ і азимутного α кутів [7]:

$$A_{\phi(3)} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_{\theta(2)} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad A_{\alpha(3)} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

A_1, A_2, A_3 — матриці поворотів [5].

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_{11} & \sin \varepsilon_{11} \\ 0 & -\sin \varepsilon_{11} & \cos \varepsilon_{11} \end{bmatrix} = E + \varepsilon_{11} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} + 0 \cdot (\varepsilon_{11}) = E + \varepsilon_{11} \cdot E_1,$$

тобто $A_1 = E + \varepsilon_{11}E_1; \quad A_2 = E + \varepsilon_{21}E_2; \quad A_3 = E + \varepsilon_{31}E_3. \quad (3)$

Підставивши вирази (2, 3) в (1), отримаємо:

$$\vec{B}^* = (E - \tilde{\varepsilon}_{ij})\vec{B} \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (4)$$

де $\vec{B}^*(b_1^*, b_2^*, b_3^*)$ — показання блока акселерометрів, з урахуванням похибки встановлення, щодо корпусу; $\vec{B}(b_1, b_2, b_3)$ — показання блока акселерометрів за відсутності похибки встановлення, представлені в скалярному вигляді

$$\begin{aligned} b_1^* &= b_1 - b_3\varepsilon_{21} + b_2\varepsilon_{31}; \\ b_2^* &= b_2 - b_1\varepsilon_{32} + b_3\varepsilon_{12}; \\ b_3^* &= b_3 + b_1\varepsilon_{23} - b_2\varepsilon_{13} \end{aligned} \quad (5)$$

або

$$\begin{aligned} b_1^* &= -\cos \phi \sin \theta - \varepsilon_{21} \cos \theta + \varepsilon_{31} \sin \phi \sin \theta; \\ b_2^* &= \sin \phi \sin \theta + \varepsilon_{32} \cos \phi \sin \theta + \varepsilon_{12} \cos \theta; \\ b_3^* &= \cos \theta - \varepsilon_{23} \cos \phi \sin \theta - \varepsilon_{13} \sin \phi \sin \theta. \end{aligned} \quad (6)$$

Системи рівнянь (5, 6) є основними скалярними рівняннями, що зв'язують показання блоку тривісного мікромеханічного акселерометра \vec{b}_i^* з похибкою $\tilde{\varepsilon}_i$ встановлення його в корпусі інклінометра. Якщо експериментально визначені похибки встановлення $\tilde{\varepsilon}_i$, то можна ввести поправку в значення зенітного і візирного кутів. Для цього треба розв'язати матричне рівняння (4) щодо вектора \vec{B} , помноживши його зліва на зворотну матрицю $(E - \tilde{\varepsilon}_{ij})^{-1}$:

$$\begin{aligned} (E - \tilde{\varepsilon}_{ij})^{-1} \vec{B}^* &= (E - \tilde{\varepsilon}_{ij})^{-1} (E - \varepsilon_{ij}) \vec{B}; \\ \vec{B} &= (E + \tilde{\varepsilon}_{ij}) \vec{B}^* \end{aligned} \quad (7)$$

або в скалярному вигляді:

$$\begin{aligned} b_1 &= b_1^* - b_2^*\varepsilon_{31} + b_3^*\varepsilon_{21}; \\ b_2 &= b_2^* + b_1^*\varepsilon_{32} - b_3^*\varepsilon_{12}; \\ b_3 &= b_3^* - b_1^*\varepsilon_{23} + b_2^*\varepsilon_{13}. \end{aligned} \quad (8)$$

Зенітний кут θ і кут встановлення відхиловача ϕ з урахуванням неточності встановлення тривісного блока мікромеханічного акселерометра щодо корпусу такі:

$$\operatorname{tg} \phi = -\frac{b_2^* + b_1^*\varepsilon_{32} - b_3^*\varepsilon_{12}}{b_1^* - b_2^*\varepsilon_{31} + b_3^*\varepsilon_{21}}; \quad (9)$$

$$\theta = \arccos [b_3^* - b_1^*\varepsilon_{23} + b_2^*\varepsilon_{13}]; \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sqrt{(b_1^* - b_2^* \varepsilon_{31} + b_3^* \varepsilon_{21})^2 + (b_2^* + b_1^* \varepsilon_{32} - b_3^* \varepsilon_{12})^2}}{b_3^* - b_1^* \varepsilon_{23} + b_2^* \varepsilon_{13}}. \quad (11)$$

Вихідні сигнали з датчиків представлені у вигляді

$$U_i^a = U_{0i}^a + U_{mi}^a b_i, \quad (12)$$

де U_{0i}^a , — нульовий сигнал акселерометрів, що не залежить від кута повороту; U_{mi}^a — найбільше значення вихідного сигналу акселерометрів.

Математична модель тривісного мікромеханічного акселерометра для інклінометра, що враховує індивідуальні параметри U_{0i}^a та U_{mi}^a , блоку тривісного акселерометра і його кутові перекося щодо корпусу представлена у вигляді :

$$\begin{aligned} U_1^a &= U_{01}^a + U_{m1}^a (-\cos \phi \sin \theta - \varepsilon_{21} \cos \theta + \varepsilon_{31} \sin \phi \sin \theta); \\ U_2^a &= U_{02}^a + U_{m2}^a (\sin \phi \sin \theta + \varepsilon_{32} \cos \phi \sin \theta + \varepsilon_{12} \cos \theta); \\ U_3^a &= U_{03}^a + U_{m3}^a (\cos \theta - \varepsilon_{23} \cos \phi \sin \theta - \varepsilon_{33} \sin \phi \sin \theta). \end{aligned} \quad (13)$$

Висновки

Запропоновано математичну модель інклінометра для системи контролю і орієнтації, що застосовується під час буріння свердловини, на основі тривісного мікромеханічного акселерометра, з урахуванням неточності встановлення блока тривісного акселерометра у корпусі інклінометра. Осі чутливості акселерометра взаємно ортогональні у скалярному і матричному вигляді, У математичній моделі, врахована неідентичність електричних параметрів датчиків, що складають тривісний блок мікромеханічного акселерометра.

Експериментальна перевірка показала, що такі вимірювання дозволять приблизно на порядок підвищити точність просторових параметрів свердловини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аврутов В. В. Випробування та калібрування мікромеханічних акселерометрів / В. В. Аврутов, П. М. Бондар, В. В. Мелешко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. — 2008. — Вип. 36. — С. 12—19.
2. Боженев Ю. А. Микроэлектромеханические устройства в необитаемых подводных аппаратах / Ю. А. Боженев // Зарубежное обозрение. Подводное исследование и робототехника. — 2006. — № 1. — С. 39—44.
3. Волович А. Интегральные акселерометры / А. Волович, Г. Волович // Компоненты и технологии. — 2002. — № 1.
4. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. — М. : Наука ГФМЛ, 1967. — 567 с.
5. Ковшов Г. Н. Инклінометри (Основи теорії і проектування) / Г. Н. Ковшов, Р. И. Алимбеков, А. В. Жибер. — УФА : Гилем, 1998. — 380 с.
6. Ковшов Г. Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г. Н. Ковшов, Г. Ю. Коловентнов. — Уфа : изд-во УГНТУ, 2001. — 228 с.
7. Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. — М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961. — 824 с.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Стаття надійшла до редакції 23.02.11

Рекомендована до друку 21.03.11

Ковшов Геннадій Миколайович — професор кафедри прикладної механіки;

Живцова Людмила Іванівна — аспірантка кафедра автоматики та електротехніки.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпропетровськ