

Г.Н.Козлов, Г.В.Миловазоров, Р.А.Султанаев, А.В.Рапин

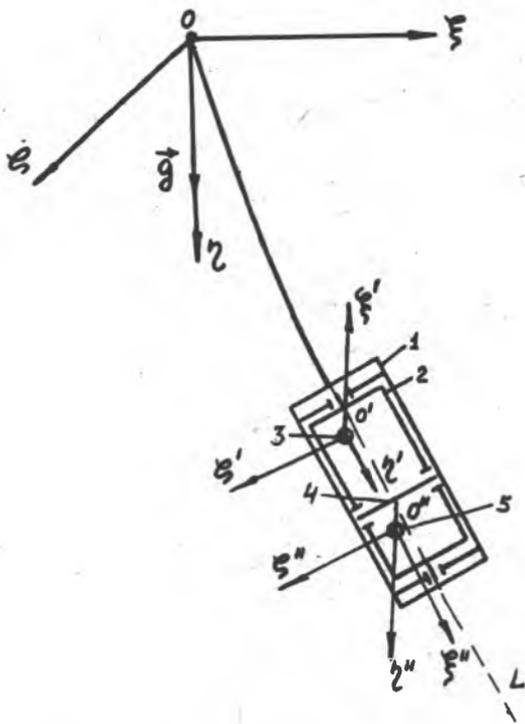
### ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЗЕНИТНЫХ И ВИЗИРНЫХ УГЛОВ В ИНКЛИНОМЕТРАХ

Преобразователи зенитных и визирных углов ПЗВУ в инклинометрах, предназначенных для контроля пространственного положения траектории окважины и ориентации бурового инструмента, выполняются по широко распространенной кинематической схеме двух карданных рамок с эксцентричными грузами [1]. Ось вращения внешней рамки (рис. 1) совпадает с продольной осью корпуса ПЗВУ, а ось вращения внутренней рамки, установленной во внешней, ортогональна продольной оси корпуса ПЗВУ. В этой кинематической схеме сигналы с датчиков угла поворота, установленных на осях вращения рамок, являются пропорциональными искомым параметрам - зенитному  $\Theta$  и визирному  $\varphi$  углам.

При создании таких ПЗВУ важным является вопрос априорного диагностирования точностных характеристик, в частности - теоретический анализ влияния на точность измерения параметров и инструментальных погрешностей, обусловленных: неортогональной установкой рамок по отношению друг к другу и корпусу ПЗВУ, недоворотом рамок вследствие трения в опорах подвесов, неточным выставлением датчиков угла поворота в нулевое положение при начальных условиях  $\Theta = 0^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$ , а также распределением погрешностей по диапазону зенитного угла.

Решение данного вопроса позволит регламентировать на стадии эскизного проекта разработки ПЗВУ максимально допустимые углы перекоса установки рамок, точность выставления датчиков угла поворота в нулевое положение для обеспечения заданной точности измерений и сформулировать практические рекомендации при конструировании ПЗВУ и выполнении регулировочных и балансировочных операций процесса сборки инклинометра в целом с акцентированием внимания на доминирующих факторах инструментальных погрешностей.

Целью данной статьи является получение аналитических выражений погрешностей, обусловленных влиянием каждого из перечисленных выше факторов, их качественная оценка и выявление источников инструментальных погрешностей, оказывающих наибольшее воздействие на точностные характеристики ПЗВУ.



Р и с. 1. Базисы рамок:  $OL$  - траектория скважины; 1 - корпус ПЗВУ; 2 - внешняя рамка; 3, 5 - эксцентричные грузы; 4 - внутренняя рамка

При математическом описании ПЗВУ и исследовании погрешностей наиболее выгоден векторно-матричный аппарат [2], в соответствии с которым проекции вектора ускорения свободного падения в основном базисе  $0, \zeta, \xi, \eta$  связаны с его проекциями в базисах рамок  $0', \zeta', \xi', \eta'$  и  $0'', \zeta'', \xi'', \eta''$  следующим основным уравнением

$$\begin{pmatrix} g_{\zeta i} \\ g_{\xi i} \\ g_{\eta i} \end{pmatrix} = \left[ \prod_{j=1}^n A \delta_j^{-1}(k) \right] A_{\psi}(\eta) A_{\theta}(\varphi) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ G \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $g_{\tau i}, g_{\xi i}, g_{\eta i}$  - проекции вектора  $\vec{g}$  в базисах рамок;  
 $A^{-1}_{\delta_j(\kappa)}$  - матрицы направляющих косинусов вращений базиса, связанного с корпусом ПЗВУ, на углы поворота рамок и на дополнительные углы перекосов;  
 $A_{\psi(\tau)}, A_{\theta(\xi)}$  - матрицы, соответствующие вращениям основного базиса на углы  $\psi$  и  $\theta$  вокруг осей  $O\tau$  и  $O\xi$ ,  $G$  - величина вектора  $\vec{g}$ ,  
 $\Pi$  - символ произведения матриц.

Обозначим угловые параметры  $\delta_j$ :  $-\Delta\beta_i$  и  $\Delta\beta_{i0}$  - углы недоворота рамок и неустановки датчиков в нулевое положение;  $\sigma$  и  $\rho$  - углы неортогональной установки внутренней рамки по отношению к базису внешней рамки соответственно в апсидальной плоскости (плоскости, перпендикулярной продольной оси корпуса ПЗВУ) и в плоскости  $O'\xi'\xi'$ ;  $\epsilon$  и  $\lambda$  - углы перекоса оси вращения внешней рамки по отношению к продольной оси корпуса ПЗВУ соответственно в плоскостях  $O'\xi'\eta'$  и  $O'\xi'\zeta'$ .

Поскольку перечисленные угловые параметры являются величинами малыми, как правило не превышающими  $1-2^\circ$ , то матрицы  $A^{-1}_{\delta_j(\kappa)}$  в уравнении (I) можно представить как суммы единичных матриц  $E$  и матриц бесконечно малых вращений  $\epsilon^{-1}_{\delta_j(\kappa)}$  [3].

С учетом этого и после выполнения умножений в правой части уравнение (I) принимает вид

$$\begin{vmatrix} g_{\tau i} \\ g_{\xi i} \\ g_{\eta i} \end{vmatrix} = \left[ \prod_{i=1}^n (E + \epsilon^{-1}_{\delta_j(\kappa)}) \right] G \begin{vmatrix} -\cos\beta_2 \sin\theta \cos(\psi - \beta_1) + \sin\beta_2 \cos\theta \\ -\sin(\psi - \beta_1) \sin\theta \\ \sin\beta_2 \sin\theta \cos(\psi - \beta_1) + \cos\beta_2 \cos\theta \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  - углы поворота рамок вокруг собственных осей.

При детальном рассмотрении базисов рамок можно сделать вывод о том, что оси  $O'\xi'$  и  $O''\zeta''$  при любом положении корпуса ПЗВУ всегда сохраняют горизонтальное положение. Поэтому для данной кинематической схемы ПЗВУ проекции  $g'_{\xi}$  и  $g''_{\zeta}$  равны нулю при любой пространственной ориентации корпуса. Приравнявая к нулю соответствующие проекции  $g'_{\xi}$  и  $g''_{\zeta}$  в уравнении (2) с последующим преобразованием, получим алгоритмы определения параметров  $\theta$  и  $\psi$  по сигналам с датчиков угла поворота

$$\begin{cases} \varphi = \text{Arctg} (\text{tg} \beta_1) \\ \Theta = \text{Arctg} (\text{tg} \beta_2) . \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим влияние каждого из угловых параметров  $\delta_j$  на точность измерений углов  $\Theta$  и  $\varphi$ .

I. Погрешности от недоворота рамок и от неустановки датчиков в нулевое положение.

Векторные уравнения для базисов рамок имеют вид:

$$\begin{cases} \vec{g}' = A^{-1}[\Delta\tilde{\beta}_1(\tau)] A^{-1}_{\beta_1}(\tau) A_{\varphi}(\tau) A_{\Theta}(\varphi) \vec{g} = A[\varphi - \beta_1 - \Delta\tilde{\beta}_1](\tau) A_{\Theta}(\varphi) \vec{g} ; \\ \vec{g}'' = A^{-1}[\beta_2 + \Delta\tilde{\beta}_2](\varphi) A[\varphi - \beta_1 - \Delta\tilde{\beta}_1](\tau) A_{\Theta}(\varphi) \vec{g} . \end{cases} \quad (4)$$

После выполнения умножений в правых частях уравнений (4) по аналогии получения уравнения (2) запишем следующие равенства:

$$\begin{cases} -\text{Sin}(\varphi - \beta_1 - \Delta\tilde{\beta}_1) \text{Sin} \Theta = 0 ; \\ -\text{Cos}(\beta_2 + \Delta\tilde{\beta}_2) \text{Sin} \Theta \text{Cos}(\varphi - \beta_1 - \Delta\tilde{\beta}_1) + \text{Sin}(\beta_2 + \Delta\tilde{\beta}_2) \text{Cos} \Theta = 0 , \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Delta\tilde{\beta}_i = \Delta\beta_i + \Delta\beta_{i0}$ .

После преобразований из (5) следуют аналитические зависимости погрешностей:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\tilde{\beta}_1 , \\ \Delta\Theta &= \text{Arctg} \left[ \frac{\text{tg} \Theta \text{Cos} \Delta\tilde{\beta}_1 - \text{tg} \Delta\tilde{\beta}_2}{1 + \text{tg} \Theta \text{tg} \Delta\tilde{\beta}_2 \text{Cos} \Delta\tilde{\beta}_1} \right] - \Theta . \end{aligned}$$

Анализ погрешности  $\Delta\Theta$  показывает, что параметр  $\Delta\tilde{\beta}_2$  оказывает преобладающее воздействие на точность измерения кривизны скважины по сравнению с параметром  $\Delta\tilde{\beta}_1$ , и при  $\Delta\tilde{\beta}_1 = 0$ ,  $\Delta\Theta = \Delta\tilde{\beta}_2$ .

2. Погрешности от неортогональной установки внутренней рамки.

С учетом параметров  $\sigma$  и  $\rho$  векторное уравнение (2) принимает вид

$$\vec{g}'' = [E + E^{-1}_{\rho}(\tau)] [E + E^{-1}_{\sigma}(\tau)] A^{-1}_{\beta_2}(\varphi) A[\varphi - \beta_1](\tau) A_{\Theta}(\varphi) \vec{g} . \quad (6)$$

После преобразований (6), приравняв проекцию  $\vec{g}''$  к нулю, получим следующее уравнение

$$\text{Cos} \beta_2 \text{Sin} \Theta \text{Cos}(\varphi - \beta_1) - \text{Sin} \beta_2 \text{Cos} \Theta = \rho \text{Sin}(\varphi - \beta_1) \text{Sin} \Theta . \quad (7)$$

При полном довороте внешней рамки (при  $\varphi - \beta_1 = 0$ ) из (7) следует, что  $\text{tg}\Theta = \text{tg}\beta_2$ , т.е. угловые параметры  $\epsilon$  и  $\rho$  не оказывают влияния на точность определения зенитного угла.

3. Погрешности, обусловленные углами  $\epsilon$  и  $\lambda$ .

Для данных параметров векторное уравнение (2) имеет вид

$$\vec{g}'' = [E + \epsilon^{-1} E] [E + \lambda^{-1} \lambda] A_{\beta_2}^{-1}(\epsilon) A_{[\varphi - \beta_1]}(\rho) A_{\Theta}(\epsilon) \vec{g}.$$

Решая данное уравнение и приравнявая проекции  $g'_\epsilon$  и  $g''_\epsilon$  нулю, получим

$$-\sin(\varphi - \beta_1) \sin \Theta + \lambda \cos \Theta = 0;$$

$$\cos \beta_2 \sin \Theta - \sin \beta_2 \cos \Theta = \epsilon (\sin \beta_2 \sin \Theta + \cos \beta_2 \cos \Theta),$$

из которых следуют выражения погрешностей  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\Theta$

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{\text{tg}\Theta}; \quad \Delta\Theta = \epsilon.$$

Анализ полученных погрешностей показывает, что погрешность измерения визирного угла определяется параметром  $\lambda$  и при  $\Theta \rightarrow 0$  стремится к максимуму, а при  $\Theta \rightarrow 90^\circ$  — стремится к нулю.

Таким образом, в результате анализа полученных аналитических выражений инструментальных погрешностей ПЗВУ по кинематической схеме двух карданных рамок можно сформулировать следующие выводы и практические рекомендации при конструировании и сборке.

1. Погрешности измерений зенитного и визирного углов, обусловленные недоворотом рамок и неточной установкой датчиков угла поворота в нулевое положение, равны соответствующим угловым параметрам  $\Delta\beta_1$  и  $\Delta\beta_2$ . Поэтому при регулировке и балансировке ПЗВУ необходимо уделять особое внимание выставлению в нулевое положение датчиков угла поворота и добиваться минимального трения в опорах подвеса рамок.

2. Неортогональная установка внутренней рамки по отношению внешней при малых углах перекосов  $\epsilon$  и  $\rho$  не оказывает влияния на точность измерений.

3. Неточная установка внешней рамки по отношению к продольной оси корпуса ПЗВУ в плоскости наклона приводит к погрешности определения зенитного угла  $\Delta\Theta$ , равной углу перекоса  $\epsilon$ . Это накладывает требования к тщательному центрированию корпуса ПЗВУ по отношению к корпусу инклинометра и к оси скважины.

4. Погрешность определения визирного угла максимальна при  $\Theta = 0^\circ$  и уменьшается до нуля с увеличением зенитного угла

90<sup>0</sup>, поэтому ПЗВУ по данной кинематической схеме целесообразно использовать для инклинометрирования скважин с большим искривлением по зенитному углу.

### Литература

1. Миловзоров Г.В. Электромеханические преобразователи наклона в системах управления подвижными объектами. - В сб.: Электромеханические и электромагнитные элементы систем управления. - Уфа, Уфимский авиационный институт, вып. I, 1983, с. 43-47.

2: Ковшов Г.Н., Миловзоров Г.В., Султанаев Р.А. О применении теории кватернионов и теории матриц в теоретических исследованиях инструментальных погрешностей инклинометрических преобразователей. - В кн.: Проблемы метрологического обеспечения научных исследований и учебного процесса в вузах. - Тезисы доклада Всесоюзной науч. техн. конф. - Ленинград, 1984, с. II5-II6.

3. Гольдштейн Г. Классическая механика. - М.: Наука, 1975, - 415 с.

УДК 681.325.3

В.М.Гречишников, Г.И.Леоневич, Ю.Т.Котов,  
А.С.Капустин, А.В.Данилов

### ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ЦИФРОВОЙ КОД С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В настоящее время разработано большое количество схемных и конструктивных модификаций оптоэлектронных преобразователей перемещения в цифровой код (ОППК). Независимо от способа построения отсчетной части оптомеханического блока (ОМБ) преобразователей общим недостатком всех ОППК является наличие инструментальных погрешностей (ИП), обусловленных несовершенством производственного, сборочного и наладочного оборудования, погрешностями элементов конструкции и их зависимостью от внешних эксплуатационных факторов (ВЭФ) [1]. Применение прецизионных деталей, высокоточная встировка не всегда достаточно эффективны и требуют существенных материальных и временных затрат. Поэтому вопрос коррекции инструментальных погрешностей, наиболее существенно влия-