ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цветков Г.А. [1], *Балуева Н.Ю.* [1], *Костицын В.И.* [2]

[1] Пермский государственный технический университет, Пермь, Российская Федерация
[2] Пермский государственный университет, Пермь, Российская Федерация

Оценена ошибка гироприборов, возникающая при произвольной ориентации гироскопического инклинометра по курсу и обусловленная углом отклонения продольной оси инклинометра от географического меридиана.

Вопросы повышения экономической эффективности строительства новых скважин и бурения боковых отводов из скважин старого фонда тесно связаны с точностью метрологического обеспечения инклинометрических измерений. В связи с изменением технологии бурения, увеличением стоимости буровых работ, правовыми проблемами, связанными с использованием отведенных участков земли, и т.д. постоянно ужесточаются требования к точности приборов, предназначенных для измерения траектории скважин.

Инструментальные погрешности скважинной инклинометрической аппаратуры в значительной степени определяются качеством метрологического обеспечения на установках пространственной ориентации [1, 2].

Основная часть

Рассмотрим влияние ориентации измерительных осей прибора на его погрешность на примере трехстепенной корректируемой гировертикали, содержащей ротор с кинетическим моментом $\overline{H}$, установленный во внутренней рамке карданового подвеса, внутреннюю рамку, установленную внутри наружной рамки, ориентированной так, что ось наружной рамки повернута относительно направления земного меридиана на угол X_0.

На рисунке 1 система координат *OXYZ* связана с земной поверхностью, оси ее ориентированы следующим образом: ось *OZ* расположена в плоскости горизонта и направлена вдоль географического меридиана на север, ось *OX* расположена в плоскости горизонта и перпендикулярна оси *OZ*, ось *OY* направлена по вертикали места, система координат $OX_1Y_1Z_1$ определяет начальную ориентацию гировертикали; ось OZ_1 совпадает с направлением оси наружной рамки, ось OX_1 направлена вдоль оси внутренней рамки, ось OY_1 – направлена вдоль вектора кинетического момента гироскопа в начальный момент времени, оси $O\xi\eta\varsigma$ жестко связаны с гироскопом. Углы отклонения гироскопа: вокруг оси наружной рамки – α, вокруг оси внутренней рамки – β, скорости прецессии ротора гироскопа: $\dot{\alpha}$ – угловая скорость прецессии вокруг оси наружной рамки, $\dot{\beta}$ – угловая скорость прецессии вокруг оси внутренней рамки. Проекции скорости вращения Земли на оси гировертикали:

$$\begin{aligned} \Omega_{3Y} &= \Omega_3 \sin \phi, \\ \Omega_{3Z} &= \Omega_3 \cos \phi, \end{aligned} \qquad (1)$$

где Ω_{3Y} – проекция угловой скорости вращения Земли на ось OY, Ω_{3Z} – проекция угловой скорости вращения Земли на ось OZ, φ – географическая широта места.

Проекции угловой скорости вращения Земли на оси системы координат $OX_1Y_1Z_1$ запишутся с учетом (1) в виде:

$$\Omega_{3X_1} = -\Omega_3 \cos \phi \sin X_0, \qquad (1)$$

$$\Omega_{3Y_1} = \Omega_3 \sin \phi, \qquad (2)$$

$$\Omega_{3Z_1} = -\Omega_3 \cos \phi \cos X_0, \qquad (3)$$

где Ω_{3X_1} – проекция Ω_3 на ось OX_1, Ω_{3Y_1} – проекция Ω_3 на ось OY_1; Ω_{3Z_1} – проекция Ω_3 на ось OZ_1.

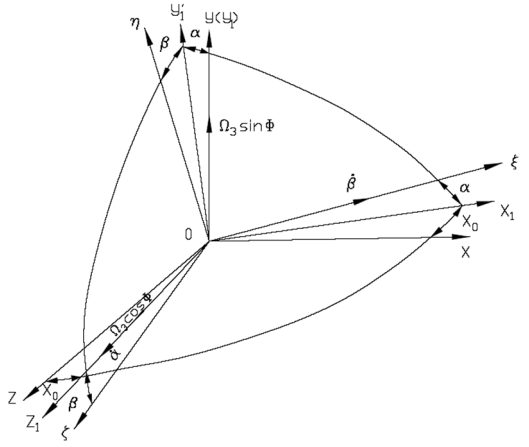

Рисунок 1 – Ориентация связанной и измерительных систем координат

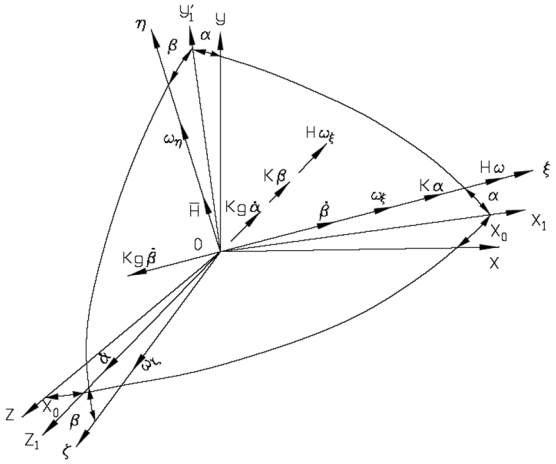

Рисунок 2 – Система координат, связанная с векторами моментов сил и кинетического момента гироскопа

Направляющие косинусы системы координат $O\xi\eta\varsigma$ в системе координат $OX_1Y_1Z_1$ представлены ниже (таблица 1).

С помощью рисунка 1 и таблицы направляющих косинусов определим проекции угловой скорости вращения гироскопа на связанные оси $O\xi\eta\varsigma$:

$$\omega_\xi = \dot\beta - \Omega_3 \sin\phi\cos X_0 \cos\alpha + \Omega_3 \sin\phi\sin\alpha, \quad (5)$$

$$\omega_\eta = \Omega_3 \sin\phi\sin X_0 \sin\alpha\sin\beta + \\ + \Omega_3 \sin\phi\cos\alpha\cos\beta + (\Omega_3\cos\phi\cos X_0 + \dot\alpha)\sin\beta, \quad (6)$$

$$\omega_\zeta = -\Omega_3 \sin\phi\sin X_0 \sin\alpha\sin\beta - \\ + \Omega_3 \sin\phi\cos\alpha\sin\beta + \Omega_3\cos\phi\cos X_0 + \dot\alpha\cos\beta. \quad (7)$$

Учитывая то, что α и β – малые, в выражениях (5), (6), (7) будем считать, что $\sin\alpha = \alpha$, $\cos\alpha = 1$, $\cos\beta = 1$, а членами порядка $\alpha\cdot\beta$, $\Omega_3\cdot\alpha$, $\Omega_3\cdot\beta$, $\alpha\cdot\beta$ можно пренебречь. Тогда выражения (5), (6), (7) примут вид:

$$\omega_\xi \approx \dot\beta - \Omega_3 \sin\phi\cos X_0, \quad (8)$$

$$\omega_\eta \approx \Omega_3 \sin\phi\beta,$$

$$\omega_\zeta = \dot\alpha + \Omega_3\cos\phi\cos X_0. \quad (9)$$

На рисунке 2 изображены системы координат $OXYZ$ и $O\xi\eta\varsigma$, а также проекции векторов моментов сил на связанные оси $\xi\eta\varsigma$, где $\bar H$ – кинетический момент гироскопа, $\dot\alpha$ и $\dot\beta$ – скорости прецессии относительно осей OZ_1 и $O\xi$; ω_ξ, ω_η, ω_ς – проекции абсолютной угловой скорости на связанные оси; $K\alpha$, $K\beta$ – моменты сил радиальной коррекции; K – коэффициент передачи системы радиальной коррекции; $Kg\dot\alpha$ и $Kg\dot\beta$ – моменты сил вязкостного трения. $H\omega\varsigma$ и $H\omega\xi$ – гироскопические моменты. Согласно [3, 4], опираясь на прецессионную теорию гироскопа, получим уравнения движения:

$$H\omega\varsigma + K\alpha - Kg\dot\beta = 0, \quad (10)$$

$$H\omega\xi + K\beta - Kg\dot\alpha = 0.$$

Таблица 1

Таблица направляющих косинусов

Ось координат	OX_1	OY_1	OZ_1
$O\xi_1$	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$	0
$O\eta_1$	$-\sin\alpha\cos\beta$	$\cos\alpha\cos\beta$	$\sin\alpha$
$O\varsigma_1$	$\sin\alpha\sin\beta$	$-\cos\alpha\sin\beta$	$\cos\beta$

С учетом (8), (9) система (10) запишется в виде:

$$\begin{aligned} H\dot{\alpha} + K\alpha - Kg\dot{\beta} &= -H\Omega_3 c\cos\phi\cos X_0, \\ H\dot{\beta} + K\beta - Kg\dot{\alpha} &= H\Omega_3 s\sin\phi\cos X_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Запишем систему (11) в операторном виде:

$$\begin{aligned} HP\alpha + K\alpha - KgP\beta &= -H\Omega_3 c\cos\phi\cos X_0, \\ Kg\alpha + (HP + K)\beta - &= -H\Omega_3 s\sin\phi\cos X_0. \end{aligned} \quad (12)$$

где P – оператор дифференцирования.

Решая систему (12) относительно α и β, получим:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{-H^2 P\Omega_3 c\cos\phi\cos X_0 - HK\Omega_3 c\cos\phi\cos X_0}{(H^2 Kg^2)P^2 + 2HPK + K^2} + \\ &+ \frac{KgPH\Omega_3 s\sin\phi\cos X_0}{(H^2 Kg^2)P^2 + 2HPK + K^2}, \\ \beta &= \frac{-H^2 P\Omega_3 s\sin\phi\cos X_0 + HK\Omega_3 \sin\phi\cos X_0}{(H^2 Kg^2)P^2 + 2HPK + K^2} + \\ &+ \frac{KgPH\Omega_3 \cos\phi\cos X_0}{(H^2 Kg^2)P^2 + 2HPK + K^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку $\Omega_3 \cos\phi\cos X_0$ и $\Omega_3 \sin\phi\cos X_0$ – постоянные, дифференциальные уравнения для определения α и β можно записать в виде:

$$\begin{aligned} &(H^2 + Kg^2)\ddot{\alpha} + 2HK\dot{\alpha} + K^2\alpha = \\ &= -HK\Omega_3 c\cos\phi\cos X_0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &(H^2 + Kg^2)\ddot{\beta} + 2HK\dot{\beta} + K^2\beta = \\ &= -HK\Omega_3 s\sin\phi\cos X_0. \end{aligned} \quad (15)$$

Общие решения уравнения (14) и (15) имеют вид:

$$\alpha = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} - \frac{H\Omega_3 c\cos\phi\cos X_0}{K}, \quad (16)$$

$$\beta = C_3 e^{r_1 t} + C_4 e^{r_2 t} - \frac{H\Omega_3 s\sin\phi\cos X_0}{K}, \quad (17)$$

где

$$r_{1,2} = -\frac{HK}{H^2 + Kg^2} \pm \sqrt{\frac{H^2K^2}{(H^2 + Kg^2)^2} - \frac{K^2}{(H^2 + Kg^2)^2}}. \quad (18)$$

В установившемся режиме:

$$\alpha_{уст} = -\frac{H\Omega_3 c\cos\phi\cos X_0}{K}, \quad (19)$$

$$\beta_{уст} = \frac{H\Omega_3 s\sin\phi\cos X_0}{K}. \quad (20)$$

Из выражений (19), (20) следует, что уход гироскопа от вращения Земли при постоянных H, Ω_3, ϕ и K определяется углом ориентации оси наружной рамки гироскопа относительно географического меридиана X_0, который не определен в случае произвольной ориентации оси наружной рамки. Следовательно, гироскопический инклинометр при испытаниях нужно ориентировать так, чтобы угол $X_0 = 0$.

Поэтому гироскопический инклинометр при проведении калибровочных испытаниях необходимо ориентировать по магнитному компасу с учетом магнитного склонения $\Delta\mu$ [5]. Тогда истинный курс продольной оси гироскопического инклинометра $\psi_{\text{èñò}}$ определится выражением:

$$\psi_{ист} = \psi_{маг} + \Delta\mu, \quad (21)$$

где $\psi_{\text{ì àã}}$ – магнитный курс, $\Delta\mu$ – магнитное склонение.

Если продольная ось инклинометра выставлена по магнитному меридиану, то выражение (21) будет иметь вид:

$$\psi_{ист} = \Delta\mu, \quad (22)$$

а выражения (19), (20) примут вид:

$$\alpha_{уст} = -\frac{H\Omega_3 c\cos\phi\cos\Delta\mu}{K}, \quad (23)$$

$$\beta_{уст} = \frac{H\Omega_3 s\sin\phi\cos\Delta\mu}{K}. \quad (24)$$

В этом случае $\alpha_{óñò}$ и $\beta_{óñò}$ – постоянные величины, которые могут быть скомпенсированы в программе калибровочных проверок.

Выводы

При произвольной ориентации гироинклинометра по курсу возникает ошибка гироприборов, обусловленная произвольным углом отклонения продольной оси гироинклинометра от географического меридиана. Система стабилизации гироинклинометра по курсу, включающая гирокомпас и привод, позволяет автоматически стабилизировать гироинклино-метр в направлении магнитного меридиана, а с учетом магнитного склонения осуществить стабилизацию в направлении географического меридиана.

Применение изложенной методики позволит минимизировать ошибку гироприборов, обусловленную произвольным углом отклонения продольной оси инклинометра от географического меридиана.

Список цитируемых источников

1. *Енин, В. Н.* Гиролазерный инклинометр для управления наклонногоризонтальным бурением нефтяных скважин / В. Н. Енин // МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИИ РЛ и НИИИСУ МГТУ, ФГУП НИИ «НОЛЮС». – 2005.
2. *Малюга, А. Г.* Инклинометры для исследования глубоких и сверхглубоких скважин. / А. Г. Малюга. – Тверь : НТП «Фактор», 2002. – 520 с.
3. *Ишлинский, А. Ю.* Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. / А. Ю. Ишлинский – М. : Наука, 1976.
4. *Меркин Д. Р.* Гироскопические системы. / Д. Р. Меркин – М.: Наука, 1974.
5. Пат. на изобретение № 3349689, РФ, МПК E21B47/02, G01C9/00. Автоматизированная установка для калибровки инклинометров / З. Г. Гарейшин, В. М. Лобанков, О. К. Полев, Н. А. Пономарев, А. Ф. Морозов, О. Л Рыжиков.

Tsvetkov G. A., Balueva N. J. , Kostitsyn V. I.

Precision improvement of measurement assurance for directional survey measuring

The possibility of the improvement of the gathering the reliable information about the directional survey measurements is considered.

The gyros errors due to the free orientation of the gyro inclinometer and the axis angular difference with geographic meridian are estimated.

Поступила в редакцию 19.11.2010.