

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА

И.В. Рыжков, Е.А. Пономарев

ДВНЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

Важнейшим компонентом системы контроля пространственной ориентации объектов в независимости от области использования является инклинометрический преобразователь (ИП), воспринимающий изменение измеряемого параметра.

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

Для определения географического азимута в обсаженных скважинах могут быть применены твердотельные волновые гироскопы (ТВГ) [1, 2]. Являясь монолитными вибрационными гироскопами, они обладают высокой вибропрочностью из-за отсутствия подшипников и карданных рамок, необходимых в классическом гироскопе. Принцип действия инклинометра с использованием трех одноосных ТВГ, предложенный Ковшовым Г.Н. [2, 3], основан на измерении проекций угловой скорости вращения Земли. В основу разрабатываемого авторами ТВГ, выбрана двухдетальная конструкция, рис. 1.

В ней резонатор крепится за ножку. Расположенная внутри резонатора плата используется для возбуждения и управления процессом колебания, а также для регистрации выходных сигналов ТВГ.

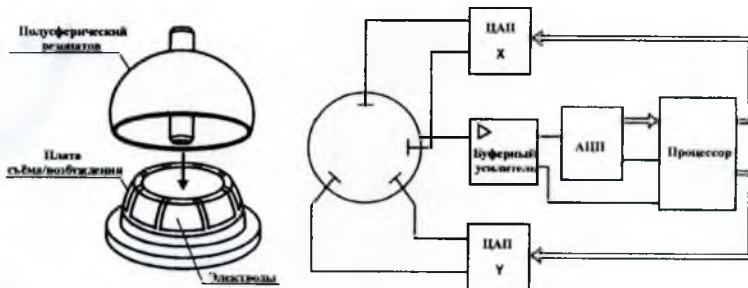


Рис. 1. Принцип построения двухдетального ТВГ и электронной системы управления

Кварцевая плата соединяется с резонатором через внутреннюю опору и имеет на полусферической поверхности восемь электродов, которые образуют систему емкостных датчиков перемещений и силовых электродов одновре-

менно. Величина зазора между платой и резонатором специально выбиралась с расчетом на низкое напряжение электропитания, а также с учетом возможностей геометрического контроля при сборке.

В цилиндрическом монолитном корпусе модуля, рис. 2, предусмотрены посадочные места для установки каждого одноосного ТВГ. Все внутренние объемы модуля соединены каналами и образуют единый вакуумный объем.

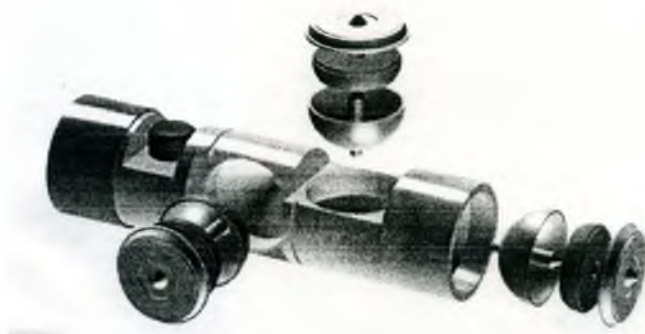


Рис. 2. Общий вид и основные составляющие элементы трехосного гироскопического модуля инклинометра

Для возбуждений колебаний резонатора используются электростатические силы, возникающие при подаче на электроды корпуса напряжения, изменяющегося по гармоническому закону. Под действием переменного напряжения торец резонатора изменяет свой диаметр, в результате чего на поверхности резонатора появляется стоячая волна с четырьмя пучностями. При одновременном вращении резонатора с измеряемой угловой скоростью появляются кориолисовы силы, вызывающие крутильные колебания поверхностной волны резонатора. Амплитуда этих колебаний пропорциональна измеряемой угловой скорости, а фаза зависит от направления вращения.

Выходное напряжение с одноосного ТВГ, как и для феррозонда, может быть записано в виде:

$$U_r = U_0^r + U_m^r \cos(\vec{\Omega}, \vec{i}), \text{ где } \cos(\vec{\Omega}, \vec{i}) - \text{косинус угла между вектором } \vec{\Omega}$$

угловой скорости вращения Земли и осью чувствительности \vec{i} ТВГ, совпадающей с осью симметрии ножки резонатора.

Составим математическую модель инклинометрического преобразователя на основе ТВГ. Для этого введем системы координат $0\xi\eta\zeta$ (репер R_0) и $0\xi^*\eta^*\zeta^*$ (репер R^*), рис. 3, в которых определим положение вектора $\vec{\Omega}(\Omega_\varphi, 0, \Omega_\theta)$ – угловой скорости вращения Земли, где $\Omega_\varphi, \Omega_\theta$ – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора угловой скорости вращения Земли, g – ускорение свободного падения, $tg\varphi = \frac{Z}{H} = b$, $tg\varphi_r = -\frac{\Omega_\varphi}{\Omega_\theta} = b^*$, ν – угол маг-

нитного наклона, φ_z – географическая широта места наблюдения. $0\xi\eta\zeta$ (репер R0) будет правый.

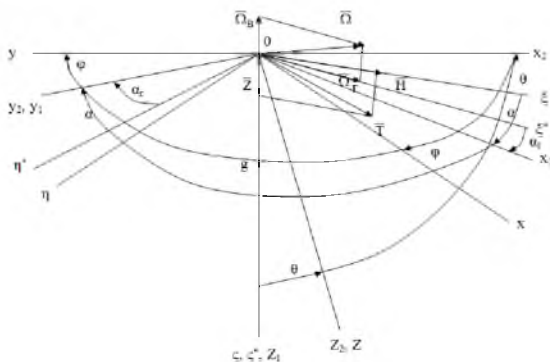


Рис. 3. Система координат

Переход от одной системы координат к последующей осуществляется умножением исходного вектора на матрицы соответствующих направляющих косинусов [4]:

$$\Omega_R = A_{\varphi(3)} A_{\theta(2)} A_{\alpha(3)} \Omega_{R_0}^* \quad (1)$$

Перепишем матричное уравнение (1) в скалярном виде:

$$\left. \begin{aligned} \Omega_x &= \Omega_r \cos \varphi \cos \theta \cos \alpha_r - \Omega_r \sin \varphi \sin \alpha_r + \Omega_b \cos \varphi \sin \theta, \\ \Omega_y &= -\Omega_r \sin \varphi \cos \theta \cos \alpha_r - \Omega_r \cos \varphi \sin \alpha_r - \Omega_b \sin \varphi \sin \theta, \\ \Omega_z &= \Omega_r \cos \alpha_r \sin \theta - \Omega_b \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Решим систему уравнений (2) относительно функций $\sin \alpha$, $\cos \alpha$:

$$\begin{aligned} \Omega_z \cos \alpha &= \Omega_x \cos \varphi \cos \theta - \Omega_y \sin \varphi \cos \theta + \Omega_z \sin \theta, \\ \Omega_z \sin \alpha &= \Omega_x \sin \varphi + \Omega_y \cos \varphi, \\ \Omega_\theta &= -\Omega_x \cos \varphi \sin \theta + \Omega_y \sin \varphi \sin \theta + \Omega_z \cos \theta, \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда при известных Ω_x , Ω_y , Ω_z , измеренных посредством первичных преобразователей на основе ТВГ, могут быть вычислены азимут в интервале $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ и зенитный угол $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ наклонной скважины при известном визирном угле φ , полученном с помощью дополнительного преобразователя визирного угла:

$$\operatorname{tg} \alpha_z = -\frac{\Omega_x \sin \varphi + \Omega_y \cos \varphi}{\Omega_x \cos \varphi \cos \theta - \Omega_y \sin \varphi \cos \theta + \Omega_z \sin \theta}, \quad 0 \leq \alpha_z \leq 2\pi, \quad (4)$$

$$\theta = \arcsin \frac{-\Omega_z}{\sqrt{\Omega_x^2 + (-\Omega_x \cos \varphi + \Omega_y \sin \varphi)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{\Omega_z}{-\Omega_x \cos \varphi + \Omega_y \sin \varphi}, \quad (5)$$

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

При бурении наклонно-направленных скважин необходимо выдерживать направление отклонителя относительно географического меридиана для забурирования наклонного участка после прохождения вертикальной части скважины.

С помощью гироскопического трехосного блока ТВГ может контролироваться выставка отклонителя в обсаженной скважине по заданному направлению. Положение отклонителя по вертикали (при $\theta=0$) измеренное в горизонтальной плоскости ψ^* относительно географического меридиана определить из матричного уравнения:

$$\Omega_R = A_{\psi^*(3)} \Omega_{R^*}, \quad (6)$$

или

$$\begin{pmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi^* & \sin \psi^* & 0 \\ \sin \psi^* & \cos \psi^* & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Omega_z \\ 0 \\ \Omega_B \end{pmatrix}, \text{ откуда следует}$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \psi^* &= \frac{\Omega_x}{\Omega_z} = B, \\ \sin \psi^* &= \frac{\Omega_y}{\Omega_z} = A, \\ \Omega_z &= -\Omega_B \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

и искомый угол ψ^* при $\Omega_z \neq 0$ определится из выражения:

$$\psi^* = \operatorname{arctg} \left(\frac{-\Omega_y}{\Omega_x} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{A}{B} \right) \quad (8)$$

При малых зенитных углах $\theta \leq 10^\circ$ положение отклонителя вычисляется согласно выражения:

$$\psi^* = \operatorname{arctg} \left(\frac{-\Omega_y}{\Omega_x + \theta \cdot \Omega_z} \right), \quad (9)$$

где значение угла θ может быть вычислено по сигналам с акселерометров.

Постоянная составляющая дрейфа разработанного ТВГ не превышает $\omega \leq 1.3 \cdot 10^{-2} |\vec{\Omega}|$. Тогда ошибка в определении положения отклонителя относительно географического меридиана определится из выражения $|\vec{\Omega}| \sin \Delta\psi^* = \omega$, или $\Delta\psi^* \approx \frac{\omega}{|\vec{\Omega}|} = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ рад} (0.74^\circ)$. Такой точности вполне достаточно для

установки отклонителя по заданному направлению в обсаженной скважине.

Из проведенных исследований следует, что с помощью инклинометра, включающего три акселерометра и три ТВГ однозначно определяются зенитный угол в интервале $0 \leq \theta \leq \pi$, географический азимут, угол установки отклонителя в диапазоне $0 \leq \alpha, \alpha_z, \varphi \leq 2$. Кроме того, посредством такого инклинометра вычисляются модули и его проекции векторов ускорения свободного падения, угловой скорости вращения Земли, угол географической широты места измерения.

В то же время комбинация магниточувствительных и гироскопических датчиков позволяет контролировать выставку отклонителя по заданному направлению в обсаженной скважине и в непосредственной близости от нее; контролировать критическое приближение к другой обсаженной скважине или наводить буровой снаряд на ствол аварийной скважины для ее ликвидации по изменению модуля вектора напряженности МПЗ или угла магнитного наклона; контролировать замки буровых труб, а также целостность обсадных труб при возрождении старых месторождений.

Выводы. Разработана с использованием матричных методов математическая модель инклинометрического преобразователя на основе ТВГ. Данная модель позволяет в точке бурения вычислять географическую широту, модуль вектора угловой скорости вращения Земли, его горизонтальную и вертикальную проекции. Получены математические выражения для бескарданных подвесов инклинометров, позволяющие вычислять положение отклонителя на вертикальном участке скважины относительно географического меридиана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковшов Г.Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г.Н. Ковшов, Г.Ю. Коловертнов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 228 с.
2. Афанасьев Ю.В. Магнитные преобразователи, приборы, установки. – Л.: Энергия, 1973. – 272 с.
3. Ковшов Г.Н. Инклинометры. (Основы теории и проектирования) / Ковшов Г.Н., Алимбеков Р.И., Жибер А.В. – Уфа: Гилем, 1998. – 380 с.
4. Фрезер Р. Теория матриц и ее приложения к дифференциальным уравнениям и динамики / Фрезер Р., Дуккан В., Коллар А. – М.: ИИЛ, 1950. – 445 с.