

- 2012] / A.V. Bondarenko, A.I. Brunetkin, A. Valter // V vseukr. nauch.-prakt. konf. [Vth All-Ukrainian Scientific and Practical Conf.], Odessa; 10-11 okt. 2012g. — Odessa, 2012. — S. 21 — 22.
2. GOST R 8.585-2001. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Termopary. Nominalnyye staticheskiye kharakteristiki preobrazovaniya. [State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Thermocouples. Nominal Static Characteristics of the Transformation] — M.: Izd-vo standartov, 2002. — 78 s.
3. Ashmarin I.P. Bystryye metody obrabotki i planirovaniya eksperimentov [Fast Methods of Processing and Planning Experiments] / I.P. Ashmarin, N.N. Vasilyev, V.A. Ambrosov. — L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1974. — 76 s.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 10 октября 2012 г.

УДК 681.5.08

Г.Н. Ковшов, д-р техн. наук, проф.,
Л.И. Живцова, специалист,
ГВУЗ “Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитекту-
ры”, г. Днепропетровск

ДАТЧИК НАКЛОНА ИНКЛИНОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЖИДКОСТНОГО УРОВНЯ

Г.М. Ковшов, Л.И. Живцова. Датчик нахилу інклінометра на основі рідинного рівня. Запропоновано конструкцію датчика нахилу інклінометра на основі рідинного рівня, кільцеподібної форми. Складено статичну математичну модель з використанням матричних методів і динамічну математичну модель на основі рівняння Лагранжа II роду.

Ключові слова: датчик нахилу, математична модель, поріг чутливості, зенітний кут, візирний кут.

Г.Н. Ковшов, Л.И. Живцова. Датчик наклона инклинометра на основе жидкостного уровня. Предложена кольцеобразная конструкция датчика наклона инклинометра на основе жидкостного уровня. Составлена статическая математическая модель с использованием матричных методов и динамическая математическая модель на основе уравнения Лагранжа II рода.

Ключевые слова: датчик наклона, математическая модель, порог чувствительности, зенитный угол, визирный угол.

G.N. Kovchov, L.I. Zhivtsova. Inclinometer tilt sensor based on liquid level tube. The annular design of a tilt sensor inclinometer based on liquid level tube is proposed. Astatic mathematical model is compiled using matrix methods, as well as the dynamic mathematical model based on the Lagrange equation of type II.

Keywords: tilt sensor, mathematical model, sensitivity threshold; zenith angle, sighting angle.

Создание современных информационно-измерительных систем контроля пространственного положения наклонно-направленных скважин требует усовершенствования инклинометрических преобразователей, предназначенных для измерения в процессе бурения азимута, зенитного угла наклона скважины, угла установки отклонителя. Как правило, в основу инклинометрических преобразователей наклона положены чувствительные элементы на основе маятника [1] или инерционной массы [2]. Большинство таких преобразователей обладают невысокой

вибро- и ударопрочностью.

Одним из решений данного вопроса является использование инклинометрических преобразователей наклона, сконструированных с использованием жидкостного уровня. Такой преобразователь может состоять также из двух ортогональных друг другу или трех, повернутых относительно друг друга на 120° замкнутых полых трубочек, образующих уровень прямоугольной или кольцевой формы. Трубочка заполнена двумя несмешивающимися с различным удельным весом жидкостями. Жидкости могут обладать магнитными свойствами. По закону сообщающихся сосудов граница раздела жидкостей определяет линию горизонта. Съем информации может осуществляться посредством, например, индуктивного, потенциометрического, фотоэлектрического, индукционного, трансформаторного или емкостного первичного преобразователя.

Преимущество преобразователей наклона на основе жидкости — слабое воздействие ускорений, направленных по перекрестной оси, и малое трение, обеспечивающее низкий порог чувствительности $10^{-4} \dots 10^{-5} g$ [6].

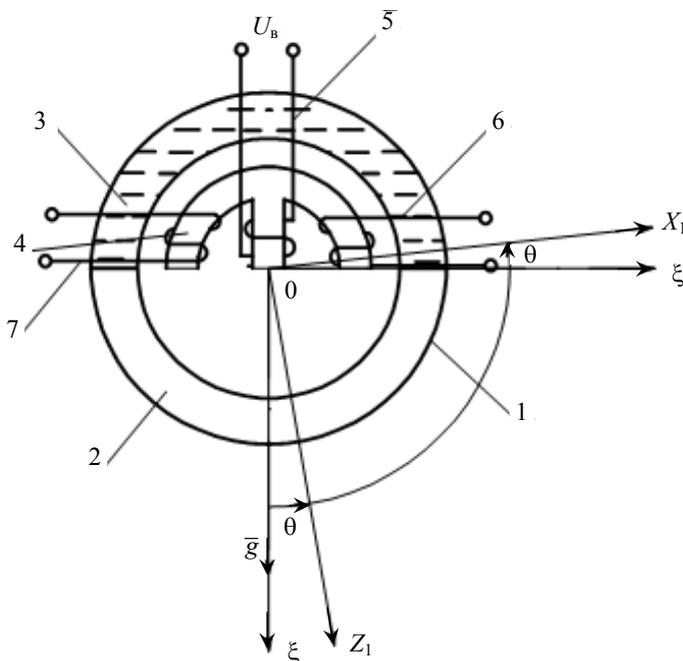
Предлагаются конструкции первичных преобразователей датчиков угла наклона, разработка математических моделей, положенных в основу инклинометрических преобразователей наклона для контроля пространственного положения скважины.

Пусть первичный датчик угла наклона выполнен в виде кольцевого уровня 1, заполненного двумя несмешивающимися жидкостями 2, 3, причем жидкость 2 с большим удельным весом является магнитной (см. рисунок). Перемещение границы раздела двух жидкостей измеряется с помощью дифференциально-трансформаторного измерительного преобразователя, состоящего из магнитопровода 4 с обмоткой возбуждения 5, на которую подается переменное напряжение U_B повышенной частоты f и двумя сигнальными обмотками 6 и 7, включенными последовательно — встречно.

При наклоне датчика относительно плоскости горизонта на угол θ граница раздела двух жидкостей 2, 3 смещается внутри кольцевого уровня 1 относительно начального положения на некоторый угол β . При этом с электрического преобразователя снимается сигнал, пропорциональный углу наклона датчика.

Составим статическую математическую модель такого датчика наклона, считая, что движение жидкости происходит в одной плоскости и одномерно вдоль трубочки.

Введем неподвижную, связанную с Землей, правую систему координат $R_0(O\xi\zeta)$, направив ось $O\xi$ по вертикали места установки и вниз к центру Земли, ось $O\zeta$ расположим в плоскости горизонта. Проекция вектора ускорений силы тяжести \bar{g} в системе координат R_0 $\bar{g}_{R_0}(0, g)$.



Кинематическая схема первичного датчика наклона

С корпусом кольцевого уровня свяжем систему координат $R(OXZ)$, она повернута относительно исходной на зенитный угол θ и связана с матрицей поворота

$$\mathbf{A}_\theta = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}.$$

С жидкостью, заполняющей кольцевой уровень, свяжем систему координат $R_1(OX_1Z_1)$, направив ось OX_1 по границе раздела жидкостей уровня.

Система координат R_1 получена из R поворотом на угол β_1 с транспонированной матрицей

$$\mathbf{A}_{\beta_1}^T = \begin{vmatrix} \cos \beta_1 & \sin \beta_1 \\ -\sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{vmatrix}.$$

Тогда проекции вектора ускорения силы тяжести в репере R_0 , спроектированного на оси репера R_1 , найдутся из уравнения

$$\bar{g}_{R_1} = \mathbf{A}_{\beta_1}^T \cdot \mathbf{A}_\theta \cdot \bar{g}_{R_0} \quad \text{или} \quad \begin{cases} g_{x_1} = g \cdot (-\cos \beta_1 \cdot \sin \theta + \sin \beta_1 \cdot \cos \theta) \\ g_{z_1} = g \cdot (\cos \beta_1 \cdot \cos \theta + \sin \beta_1 \cdot \sin \theta) \end{cases}.$$

Если система координат $R_1(OX_1Z_1)$ в идеальном случае совпадет с $R_0(O\xi\zeta)$, т.е. проекции ускорения силы тяжести $\bar{g}_{R_0} = \bar{g}_{R_1}$, то произведение матриц $\mathbf{A}_{\beta_1}^T \cdot \mathbf{A}_\theta$ — единичная матрица

$$\begin{vmatrix} \cos(\beta_1 - \theta) & \sin(\beta_1 - \theta) \\ \sin(\beta_1 - \theta) & \cos(\beta_1 - \theta) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Откуда, приравнявая одинаковые элементы левой и правой матрицы, следует: $\cos(\beta_1 - \theta) = 1$, $\sin(\beta_1 - \theta) = 0$.

Таким образом, если граница раздела жидкостей совпадет с горизонтальной плоскостью, то угол поворота β_1 равен зенитному углу θ наклона корпуса уровня относительно плоскости горизонта, т.е. $\beta_1 = \theta$.

Пусть выходной сигнал датчика наклона электрического преобразователя

$$U_1 = U_{01} + k\beta_1, \quad (1)$$

где U_{01} — нулевой сигнал с датчика наклона;

k — крутизна передаточной характеристики.

Из (1) следует $\beta_1 = \frac{U_1 - U_{01}}{k}$.

Обозначим $\frac{U_1 - U_{01}}{k} = b_1$, где b_1 — выходной сигнал датчика, приведенный к безразмерному виду. Тогда $b_1 = \beta_1$.

Составим динамическую математическую модель такого датчика наклона на неподвижном основании. Расположим полюс O в его геометрическом центре (см. рисунок). Жидкость в трубке рассмотрим как абсолютно гибкую нить.

Пусть $l_1 = l_2 = l = 2 \cdot \pi \cdot R$ — длина жидкости в трубке, где l_1 — длина жидкости 2, l_2 — длина жидкости 3, ρ_1, m_1 — плотность и масса жидкости 2, ρ_2, m_2 — плотность и масса жидкости 3, причем $\rho_1 \gg \rho_2$, а $m = m_1 + m_2$ — масса всей жидкости кольцевого уровня.

Воспользуемся уравнением Лагранжа II рода [7]

$$\delta A = \sum Q \cdot \delta \beta_1, \quad (2)$$

где δA — элементарная работа;

Q — обобщенные силы, которые зависят от координат β_1 , скоростей $\dot{\beta}_1 = \frac{d\beta_1}{dt}$ и времени.

$$Q = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta_1} + \frac{\partial \Pi}{\partial \beta_1} + \frac{\partial R}{\partial \beta_1},$$

где T — кинетическая энергия жидкости;
 Π — потенциальная энергия жидкости;
 R — функция Рауса.

Кинетическая энергия жидкости, движущейся в трубочке со скоростью $\dot{\beta}_1$,

$$T = \pi \cdot R \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \sigma \cdot \dot{\beta}_1^2.$$

Потенциальная энергия жидкости в поле силы тяжести

$$\Pi = (\rho_1 - \rho_2) \cdot \sigma \cdot g \cdot \beta_1^2.$$

Функция Рауса [8]

$$R = \frac{1}{2} \cdot K_d \cdot \dot{\beta}_1^2.$$

При малых углах наклона жидкостного уровня жидкость прилипает к поверхности трубочки [9]. Запишем выражение обобщенных сил от силы прилипания как коэффициент в элементарной работе [1]

$$\delta A = \sum K_{\beta_1} \operatorname{sgn}(\dot{\beta}_1) \quad \text{или} \quad \delta A = F_{\text{пр.}},$$

где $\operatorname{sgn}(\dot{\beta}_1) = \frac{\dot{\beta}_1}{|\dot{\beta}_1|}$ [10];

K_{β_1} — коэффициент силы прилипания;

$F_{\text{пр.}}$ — сила прилипания.

Дифференцируя выражения кинетической, потенциальной энергии, функции Рауса и обобщенных сил, подставляем их в уравнение Лагранжа II рода (2), получим динамическую математическую модель датчика наклона:

$$2 \cdot \pi \cdot R \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \sigma \cdot \ddot{\beta}_1 + K_d \cdot \dot{\beta}_1 + 2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \sigma \cdot \beta_1 = F_{\text{пр.}}, \quad (3)$$

где σ — площадь поперечного сечения трубочки;

$(\rho_1 - \rho_2) \cdot \sigma \cdot g \cdot \beta_1$ — вес жидкости;

K_d — коэффициент демпфирования,

$$K_d = \frac{F_d}{\dot{\beta}_1},$$

где F_d — демпфирующая сила, $F_d = \Delta p \cdot \sigma$;

Δp — перепад давления при движении вязкой жидкости по цилиндрической трубочке [9],

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \dot{\beta}_1^2}{2 \cdot r},$$

где r — радиус цилиндрической трубочки;

λ — коэффициент сопротивления трубочки, для круглого сечения

$$\lambda = \frac{32 \cdot \mu}{r \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \dot{\beta}_1}.$$

Откуда после некоторых преобразований

$$F_d = \frac{16 \cdot \pi \cdot R \cdot \mu \cdot \sigma}{r^2} \cdot \dot{\beta}_1.$$

Из уравнения (3) получим выражение для силы прилипания жидкости к поверхности трубочки, положив $\ddot{\beta}_1 = \dot{\beta}_1 = 0$,

$$2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \sigma \cdot \beta_1 = F_{np}. \quad (4)$$

Ошибка в измерении от силы прилипания жидкости к поверхности трубочки определится из выражения (4)

$$\beta_1^* = \frac{F_{np.}}{2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \sigma},$$

т.е. погрешность установки датчика в плоскость наклона определяется наличием силы прилипания жидкости к поверхности трубочки. Поскольку $\Delta\theta = \beta_1^* - \theta$,

$$\Delta\theta = \frac{F_{np.}}{2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \sigma}. \quad (5)$$

Как видно из формулы (5), чем больше разница по удельному весу двух жидкостей, тем ниже порог чувствительности датчика.

Из выражения (5) следует

$$\rho_1 - \rho_2 = \frac{F_{np.}}{2 \cdot g \cdot \sigma \cdot \Delta\theta}.$$

Перепишем выражение (3) в виде :

$$2 \cdot \pi \cdot R \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \sigma \cdot \ddot{\beta}_1 + K_d \cdot \dot{\beta}_1 + 2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \sigma \cdot \beta_1 = 0. \quad (6)$$

Разделим уравнение (6) на $2 \cdot \pi \cdot R \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \sigma$, и приведем его к стандартному виду

$$\ddot{\beta}_1 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_0 \cdot \dot{\beta}_1 + \omega_0^2 \cdot \beta_1 = 0, \quad (7)$$

где ω_0 — частота собственных незатухающих колебаний границы раздела жидкостей,

$$\omega_0^2 = \frac{g}{\pi \cdot R} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{(\rho_1 + \rho_2)}, \quad (8)$$

ζ — степень демпфирования жидкости в трубочке,

$$\zeta = \frac{K_d}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \sigma}.$$

Уравнение (7) является динамической математической моделью датчика наклона, приведенной к стандартному виду.

Частота собственных незатухающих колебаний границы раздела жидкостей с разной плотностью следует из (8) при $\rho_1 \gg \rho_2$

$$\omega_0^2 = \frac{g}{\pi \cdot R},$$

при $\rho_1 \cong \rho_2$ $\omega_0^2 = \frac{g}{\pi \cdot R} \cdot \frac{\Delta\rho_1}{2\rho_1}$.

Таким образом, чем больше разница удельных весов двух несмешивающихся жидкостей, тем ниже частота собственных колебаний.

Для определения визирного угла ϕ (угла установки отклонителя) необходим второй датчик наклона, повернутый относительно исходного на 90° .

Составим статическую математическую модель такого датчика наклона. Для этого в системе координат (см. рисунок) добавим ось $O\eta$ перпендикулярно плоскости $\xi O\zeta$.

Проекції вектора прискорень сили тяжесті \bar{g}_{R_0} в системі координат R_0 — $\bar{g}_{R_0}(0, 0, g)$. С корпусом датчика зв'яжемо систему координат $R(OXYZ)$, отриману з початкової R_0 послідовним обертанням на зенітний кут θ і візирний кут ϕ з матрицями повороту $\mathbf{A}_\theta, \mathbf{A}_\phi$ [11]

$$\mathbf{A}_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_\phi = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Відповідно до межі розділу рідин першого і другого кільцевого рівня зв'яжемо систему координат $R_1(OX_1Y_1Z_1)$ і $R_2(OX_2Y_2Z_2)$ з матрицями повороту

$$\mathbf{A}_{\beta_1}^T = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 & 0 & \sin \beta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_1 & 0 & \cos \beta_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\beta_2}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_2 & -\sin \beta_2 \\ 0 & \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{pmatrix}.$$

Проекції вектора прискорень сили тяжесті \bar{g} на осі трикутника R_1 і R_2 мають вигляд

$$\begin{cases} \bar{g}_{R_1} = \mathbf{A}_{\beta_1}^T \cdot \mathbf{A}_\phi \cdot \mathbf{A}_\theta \cdot \bar{g}_{R_0} \\ \bar{g}_{R_2} = \mathbf{A}_{\beta_2}^T \cdot \mathbf{A}_\phi \cdot \mathbf{A}_\theta \cdot \bar{g}_{R_0} \end{cases}.$$

Оскільки межа рідин встановлюється в площині горизонту, математична модель датчика нахилу на основі двох рідинних рівень

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{\beta_1}^T \cdot \mathbf{A}_\phi \cdot \mathbf{A}_\theta = \mathbf{E} \\ \mathbf{A}_{\beta_2}^T \cdot \mathbf{A}_\phi \cdot \mathbf{A}_\theta = \mathbf{E} \end{cases}.$$

Відома ліва частина матричних рівнянь відповідно на \mathbf{A}_{β_1} і \mathbf{A}_{β_2} , враховуючи що $\mathbf{A}_{\beta_1} \cdot \mathbf{A}_{\beta_1}^T = \mathbf{E}$, $\mathbf{A}_{\beta_2} \cdot \mathbf{A}_{\beta_2}^T = \mathbf{E}$, отримаємо

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{\beta_1} = \mathbf{A}_\phi \cdot \mathbf{A}_\theta \\ \mathbf{A}_{\beta_2} = \mathbf{A}_\phi \cdot \mathbf{A}_\theta \end{cases},$$

звідки після деяких перетворень випливає зв'язок кута нахилу першого і другого датчиків нахилу на кутами ϕ і θ

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \cos \phi \cdot \operatorname{tg} \theta;$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \sin \phi \cdot \operatorname{tg} \theta.$$

Шукані кути ϕ і θ слід визначати з виражень

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg} \beta_1},$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta_1 + \operatorname{tg}^2 \beta_2}.$$

Нехай три датчики нахилу повернуті між собою на 120° . Для отримання статичної моделі такого датчика нахилу необхідно виявити рівняння зв'язку проекції вектора \bar{g} на осі репера відповідних рідинних рівень з шуканими кутами.

Відповідно до межі розділу рідин першого, другого і третього кільцевого рівня зв'яжемо систему координат $R_1(OX_1Y_1Z_1)$, $R_2(OX_2Y_2Z_2)$ і $R_3(OX_3Y_3Z_3)$ з матрицями повороту

$$\mathbf{A}_{\beta_1}^T = \begin{pmatrix} \cos\beta_1 & 0 & \sin\beta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_1 & 0 & \cos\beta_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\beta_2}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_2 & -\sin\beta_2 \\ 0 & \sin\beta_2 & \cos\beta_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\beta_3}^T = \begin{pmatrix} \cos\beta_3 & \sin\beta_3 & 0 \\ -\sin\beta_3 & \cos\beta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Проекції вектора прискорення сили тяжесті \bar{g} на осі тригранника R_1 , R_2 і R_3 мають вигляд

$$\begin{cases} \bar{g}_{R_1} = \mathbf{A}_{\beta_1}^T \cdot \mathbf{A}_\phi \cdot \mathbf{A}_\theta \cdot \bar{g}_{R_0}; \\ \bar{g}_{R_2} = \mathbf{A}_{\beta_2}^T \cdot \mathbf{A}_{\phi+120^\circ} \cdot \mathbf{A}_\theta \cdot \bar{g}_{R_0}; \\ \bar{g}_{R_3} = \mathbf{A}_{\beta_3}^T \cdot \mathbf{A}_{\phi-120^\circ} \cdot \mathbf{A}_\theta \cdot \bar{g}_{R_0}; \end{cases}$$

откуда после преобразований следует связь угла наклона первого, второго и третьего датчиков наклона повернутых под углом 120° , с углами ϕ и θ ,

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \sin\phi \cdot \operatorname{tg}\theta;$$

$$\operatorname{tg}\beta_2 = \sin(\phi + 120^\circ) \cdot \operatorname{tg}\theta;$$

$$\operatorname{tg}\beta_3 = \sin(\phi - 120^\circ) \cdot \operatorname{tg}\theta.$$

Таким образом, углы ϕ и θ следует определять из выражений

$$\begin{aligned} \phi &= \operatorname{arctg}\left(-\sqrt{3} \cdot \frac{\operatorname{tg}\beta_1}{\operatorname{tg}\beta_3 - \operatorname{tg}\beta_2}\right); \\ \theta &= \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta_1 + \operatorname{tg}\beta_2 + \operatorname{tg}\beta_3). \end{aligned}$$

Выводы

Предложена кольцеобразная конструкция датчика наклона инклинометра на основе жидкостного уровня кольцеобразной формы, заполненной двумя несмешивающимися жидкостями с разной плотностью, одна из которых может быть магнитной. Она включает дифференциально-трансформаторный измерительный преобразователь угла наклона магнитной жидкости, установленный внутри кольцевого уровня.

Составлена статическая и динамическая математические модели датчика наклона инклинометра на основе жидкостного уровня. Статическая математическая модель составлена с использованием матричных методов. Динамическая математическая модель составлена на основе уравнения Лагранжа II рода, в которой учтены силы демпфирования и силы прилипания жидкости к поверхности трубочки.

Установлено, что погрешность датчика наклона на основе жидкостного уровня определяется силой прилипания жидкости к поверхности трубочки.

Датчик наклона на основе двух несмешивающихся с разными по удельному весу жидкостями $\rho_1 \gg \rho_2$ обладает более низким порогом чувствительности. При этом чем больше разница удельных весов двух несмешивающихся жидкостей, тем ниже частота собственных колебаний.

С использованием матричных методов составлены статические математические модели преобразователей зенитного и визирного углов на основе двух жидкостных уровней, повернутых между собой на 90° , и трех уровней, повернутых на 120° .

Получены математические зависимости между проекциями силы тяжести \bar{g} на осей чувствительности датчика и искомыми углами наклона, выраженные через углы Эйлера. Искомые зенитный и визирные углы определяются по сигналам с датчика наклона.

Литература

1. Ковшов, Г.Н. Инклинометры (Основы теории и проектирования) / Г.Н. Ковшов, Р.И. Алимбеков, А.В. Жибер. — Уфа: Гилем, 1998. — 380 с.

2. Волович, А. Интегральные акселерометры / А. Волович, Г. Волович // Компоненты и технологии. — 2002. — №1. — С. 67—72.
3. А.С. 1819993 СССР, МКИ Е 21 В 47/02. Датчик зенитного угла буровой скважины. / И.Г. Сквородников, В.Н. Калашников, О.И. Сквородников. — № 4796565/03; заявл. 28.02.90; опубл. 07.06.93, Бюл. № 21.
4. А.С. 459583 СССР, МКИ Е 21 В 47/02, G 01 С 9/20. Датчик зенитного угла. / В.О. Галета, Ю.М. Месонжник, И.М. Штаргот. — № 1866158/22-3; заявл. 04.01.73; опубл. 05.02.75, Бюл. №5.
5. А.С. 628296 СССР, МКИ Е 21 В 47/02. Датчик зенитного угла. / М.Г. Гуфранов, Л.Н. Тюменев. — 2497928/22-03; заявл. 14.06.77; опубл. 15.10.78, Бюл. №38.
6. Савант, С.Дж. Принципы инерционной навигации / С.Дж. Савант, мл. Р. Ховард, С. Соллоуай, С.А. Савант. — М.: Мир, 1965. — 355 с.
7. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман — М.: Высш. школа, 1980. — 408 с.
8. Маркеев, А.П. Теоретическая механика / А.П. Маркеев — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. — 416 с. — ISBN 5-02-014016-3.
9. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. — 904 с.
10. Тонг Кин, Н. Теория механических колебаний / Кин Н. Тонг — М.: Гос. научно-техн. изд-во Машиностроит. лит., 1963. — 352 с.
11. Ковшов, Г.Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г.Н. Ковшов, Г.Ю. Коловертнов — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. — 228 с.

References

1. Kovshov, G.N. Inclinometry (Osnovy teorii i proektirovaniya) [Inclinometers (Basics of theory and design)] / G.N. Kovshov, R.I. Alimbekov, A.V. Zhiber. — Ufa, 1998. — 380 pp. — ISBN 5-201-13838-1
2. Volovich, A. Integral'nye akselerometry [Integrated accelerometers] [Electronic resource] / A. Volovich, G. Volovich // Komponenty i tekhnologii [Components and technologies]. — 2002. — # 1. — pp. 67—72 — Available at: http://www.compitech.ru/html/cgi/arhiv/02_01/stat_66.htm.
3. A.S. 1819993, SSSR, МКИ Е 21 В 47/02. Datchik zenitnogo ugla byrovoy skvazhiny. [Zenith angle sensor of a borehole] / I.G. Skovorodnikov, V.N. Kalachikov, O.I. Skovorodnikov. — # 4796565/03; zayavl. 28.02.90; opubl. 07.06.93., Bull. #21.
4. A.S. 459583, SSSR, МКИ Е 21 В 47/02, G 01 С 9/20. Datchik zenitnogo ugla. [Zenith angle sensor] / V.O. Galeta, Yu.M. Mesonzhnik, I.M. Shtargot. — # 1866158/22-3; zayavl. 04.01.73; Opubl. 05.02.75., Bull. #5.
5. A.S. 628296, SSSR, МКИ Е 21 В 47/02. Datchik zenitnogo ugla. [Zenith angle sensor] / M.G. Gufranov, L.N. Tyumenev. — # 2497928/22-03; zayavl. 14.06.77; opubl. 15.10.78, Bull. #38.
6. Savant, S.Dzh. Printsipy integral'noy navigatsii [Principles of inertial navigation] / C.Dzh. Savant, ml. R. Khovard, S. Sollouay, S.A. Savant — Moscow, 1965. — 355 pp.
7. Biderman, V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy [The theory of mechanical vibrations] / V.L. Biderman — Moscow, 1980. — 408 pp.
8. Markeev, A.P. Teoreticheskaya mekhanika [Theoretical Mechanics] / A.P. Markeev — Moscow, 1990. — 416 pp. — ISBN 5-02-014016-3.
9. Loytsyanskiy, L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid Mechanics] / L.G. Loytsyanskiy — Moscow, 1970. — 904 pp.
10. Tong Kin, N. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy [Theory of mechanical vibration] / Kin. N. Tong — Moscow, 1963. — 352 pp.
11. Kovshov, G.N. Pribory kontrolya prostranstvennoy orientatsii skvazhin pri burenii [Control devices for the spatial orientation of wells in drilling] / G.N. Kovshov, G.U. Kolovertnov — Ufa, 2001. — 228 pp.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Сытник В.С.

Поступила в редакцию 6 ноября 2012 г.