

Бортнюк М.Ю., магістр спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології
Науковий керівник: Пащенко О.А., к.т.н., доцент кафедри нафтогазової інженерії та буріння

(Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АЗИМУТАЛЬНОГО ГІРОКОМПАСУВАННЯ ДЛЯ ВИБІЙНОГО ПОХИЛОМІРА

Контроль траєкторії свердловини під час буріння похило спрямованих профілів є критичним для забезпечення точності проходження, зниження витрат і підвищення ефективності видобутку вуглеводнів у багатошарових родовищах. Традиційні магнітометричні інклінометри мають суттєві обмеження, пов'язані з неточністю визначення магнітного схилення, необхідністю віддалення приладу від бурового інструменту, що спричиняє затримку даних, і застосуванням дорогих немагнітних труб. Крім того, вібрації, удари та неможливість використання в обсаджених свердловинах зумовлюють потребу в гіроскопічних системах, стійких до механічних навантажень класу МСЗ [1, 2].

Аналіз сучасних гіроскопічних інклінометрів показує, що більшість з них, такі як ІГН 73-100/80, ІГМ-36-80/60, ІГМ-36С та УГД 42.03, не призначені для вибійних умов через великі габарити, низьку стійкість до віброударів і використання аналогових методів обробки сигналів. Зарубіжні аналоги, наприклад SPT 007/42 (Stockholm Precision Tools), Evader (Halliburton) та Power Drive X6 475 (Schlumberger) [3, 4], демонструють високу точність ($\pm 1^\circ$ для азимуту, зенітного кута та кута відхильника) у діапазонах азимуту та кута відхильника $0-360^\circ$ і зенітного кута $0-100^\circ$, але їх віброударні характеристики часто не дозволяють судити про стійкість у реальних вибійних умовах. Ці системи базуються на динамічно налаштовуваних гіроскопах (ДНГ) і акселерометрах, з можливістю роботи в кабельному або автономному режимах [5, 6].

Для подолання цих обмежень запропоновано електрокінематичну схему вибійного гіроскопічного інклінометра на основі аналітичного гірокомпасування. Схема включає три датчики акселерометрів (А-16), жорстко закріплених на корпусі з ортогональними осями чутливості, одна з яких паралельна поздовжній осі приладу, та три датчики абсолютної кутової швидкості (ТВГ-1БА). Два датчики ТВГ розташовані в блоці чутливих елементів, третій – на окремій платформі. Для усунення систематичної похибки та дрейфу нуля від пуску до пуску датчики розміщуються на поворотних платформах з розворотом на 180° , що дозволяє вимірювати компоненти кутової швидкості обертання Землі з позитивним і негативним знаками. Платформи обертаються кроковим двигуном з механічними упорами на корпусі для точного позиціонування, забезпечуючи плавність ходу через пружний елемент і уникнення ударних навантажень, які можуть вивести гіроскоп з синхронізму.

Принцип дії базується на проєкціях векторів прискорення вільного падіння (g) та кутової швидкості обертання Землі (Ω) на осі пов'язаної системи координат (СК) приладу [7, 8]. Використовуючи кути Ейлера (азимут α , зенітний кут β , кут відхильника γ), проєкції для акселерометрів описуються рівняннями:

$$\begin{aligned} a_x &= g (\cos \beta \cos \gamma), \\ a_y &= g (\cos \beta \sin \gamma), \\ a_z &= g \sin \beta. \end{aligned}$$

Для гіродатчиків:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega_\xi (\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) + \Omega_\zeta \sin \beta \cos \gamma, \\ \omega_y &= \Omega_\xi (\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma) + \Omega_\zeta \sin \beta \sin \gamma, \\ \omega_z &= \Omega_\xi \cos \alpha \sin \beta + \Omega_\zeta \cos \beta, \end{aligned}$$

де Ω_{ξ} та Ω_{ζ} – проекції швидкості обертання Землі на осі географічної СК.

Алгоритми обробки даних передбачають обчислення кутів через арктангенс для уникнення похибок поблизу екстремумів синуса чи косинуса. Зенітний кут β обчислюється як:

$$\beta = \arctan((a_x^2 + a_y^2)^{1/2} / |a_z|),$$

з визначенням квадранта за знаком a_z (якщо $a_z > 0$, $\delta = 0$; якщо $a_z < 0$, $\delta = 180^\circ$). Кут відхильника γ :

$$\gamma = \arctan(a_y / a_x),$$

з визначенням квадранта за знаками a_x та a_y . Азимут α розраховується аналогічно, з урахуванням квадрантів за знаками $\sin \alpha$ та $\cos \alpha$.

Оцінка похибок проведена методом чисельних експериментів у Microsoft Excel для 2304 комбінацій кутів (α : 0–330° з кроком 30°; β : 0.5–100°; γ : 0–330° з кроком 30°). При максимальній похибці ТВГ-1БА (0.1 град/год) та А-16 (4×10^{-4} м/с²) похибка азимуту не перевищує 2°, зенітного кута – 1°, кута відхильника – 1.5°, що задовольняє вимогам для горизонтальних і похило спрямованих свердловин. Симуляція для конкретного положення ($\alpha=120^\circ$, $\beta=50^\circ$, $\gamma=60^\circ$) з урахуванням широти 56° пн.ш. і $\Omega=15.04$ град/год підтвердила стійкість алгоритмів.

Електронний блок приладу включає генератор напруги з турбіною, акумуляторну батарею, фільтри низьких частот, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), комутатори та пристрій бездротової передачі даних електромагнітним каналом. Система працює в багатоточковому режимі з швидкодією до 4 хв, забезпечуючи дані в реальному часі без використання магнітного поля Землі.

Розроблена конструкція секції чутливих елементів дозволяє інтеграцію в бурові колони з мінімальним діаметром 139.7 мм, підвищуючи точність буріння в суворих умовах і сприяючи серійному виробництву приладу для нафтогазової галузі.

Список використаних джерел:

1. Войтенко, В.С., Вітрик, В.Г., Яремійчук, Р.С. & Яремійчук, Я.С. (2012). *Технологія і техніка буріння. Узагальнююча довідкова книга*. Львів: Центр Європи. 708 с.
2. Бойко, В.С., Кондрат, Р.М. & Яремійчук, Р.С. (ред.). (1996). *Довідник з нафтогазової справи*. Київ; Львів. 620 с.
3. Потетенко, О.В., Шевченко, Н.Г., Миронов, К.А. & ін. (2013). *Нафтогазова механіка: підручник*. Харків: НТУ «ХПІ». 160 с.
4. Коровяка, Є.А., Расцветаєв, В.О., Пащенко, О.А. & Яворська, В.В. (2023). *Комп'ютерне моделювання та проектування технології видобування вуглеводнів: лабораторний практикум*. Дніпро.
5. Мислюк, М.А., Рибчич, І.Й. & Яремійчук, Р.С. (2002–2004). *Буріння свердловин: у 5 т.* Київ: Інтерпрес ЛТД.
6. Войтенко, В.С. & Вітрик, В.Г. (2012). *Технологія і техніка буріння*. Київ: Центр Європи. 708 с.
7. Коцкулич, Я.С. & Кочкодан, Я.М. (1999). *Буріння нафтових та газових свердловин*. Коломия: Вік. 504 с.
8. Бойко, В.С. (2004). *Розробка та експлуатація нафтових родовищ*. Київ: Реал-Принт. 695 с.