

УДК 622.267

Г.М. Ковшов, д-р техн. наук, проф.,
І.В. Рижков, канд. техн. наук, доц.,
А.В. Ужеловський

Державний вищий навчальний заклад, “Придніпровська державна академія будівництва і архітектури”, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: uadron@mail.ru

ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ БУРОВОГО СНАРЯДА ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

G.M. Kovshov, Dr. Sci. (Tech.),
I.V. Ryzhkov, Cand. Sci. (Tech.),
A.V. Uzhelovskiy

State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Building and Architecture”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: uadron@mail.ru

ON THE ISSUE OF THE INCREASE OF THE DRILL STRING POSITION DETERMINATION ACCURACY DURING THE STUDY OF TEMPERATURE INFLUENCE ON PRIMARY TRANSDUCER PERFORMANCE

Мета. Теоретичні та експериментальні дослідження з обґрунтування алгоритмічного методу компенсації температурних дрейфів первинних перетворювачів.

Методика. Методика роботи включає математичний опис залежності вихідних значень первинних перетворювачів функції від температури. Була використана універсальна поворотна установка, що дала можливість визначити температурну похибку інклінометричного пристрою при зміні положення бурового снаряда. За допомогою математичних виразів оброблено отримані результати та набуто дійсні значення датчиків.

Результати. Для досягнення поставленої мети було виміряно значення азимутного, зенітного й візирного кутів за допомогою інклінометричного пристрою та системи передачі інформації на поверхню в центр управління, де інформація обробляється. У процесі обробки було використано відомий алгоритмічний спосіб зниження температурних похибок, що заснований на випробуваннях, у ході яких відшукується й запам'ятовується закон зміни температурного дрейфу ферозондів та акселерометрів. При цьому було обчислено зенітний азимут і візирний кут з урахуванням величини дрейфу кожного датчика від температури у свердловині, вимір якої здійснюється додатковим датчиком температури. Також було складено математичні моделі первинних перетворювачів, що складають інклінометр, які враховують їх температурний дрейф.

Наукова новизна. Ефективність функціонування автоматизованих систем управління орієнтацією об'єктів багато в чому залежить від технічних характеристик датчиків, що входять до їх складу. Уперше встановлено, що вихідні величини з первинних перетворювачів істотно залежать від температури, що суперечить їх паспортним даним. З'явилася можливість компенсувати температурний дрейф датчиків, використовуючи відомі алгоритмічні методи та метод зворотного зв'язку.

Практична значимість. Полягає в підвищенні точності вихідних значень інклінометричного пристрою в декілька разів, що істотно впливає на визначення положення бурового інструменту при виконанні геологорозвідувальних робіт.

Ключові слова: *первинні перетворювачі, температурний дрейф, датчик температури, алгоритмічний метод, буровий снаряд, експериментальна установка, магнітне поле, нагрівальний елемент*

Постановка проблеми. Ефективність функціонування автоматизованих систем управління орієнтацією об'єктів багато в чому залежить від технічних характеристик датчиків, що входять до їх складу. Особливі вимоги до точності датчиків орієнтації пред'являють при будівництві вертикальних, похило-направлених, горизонтальних свердловин. Використання кушового методу буріння при видобуванні нафти в болотистій місцевості та зонах морських шельфів у декілька разів підвищує ефективність проведення робіт. Збільшення точності вимірювання азимута в 2 рази дозволяє збільшити число свердловин одного „куща“ в 3 рази й підвищити нафтовід-

дачу в 1,2...1,5 рази. При цьому неможливе використання оптичних, механічних, п'єзоелектричних і деяких інших видів датчиків унаслідок складних експлуатаційних умов: запиленість, задимленість, висока температура експлуатації, що може досягати +120°C, необхідність безперервного контролю.

Питання визначення положення бурового снаряду є актуальним, оскільки постає проблема підвищення точності визначення азимутного та зенітного кутів інклінометричного пристрою. Для контролю орієнтації буріння свердловин необхідно враховувати азимутальне, зенітне та візирне відхилення. В якості первинних перетворювачів застосовують інклінометри, акселерометри, магніточутливі перетворювачі. На сьогоднішній день похибка інклінометричних датчиків при

вимірюваннях у свердловинах за азимутальним і візирним кутом не повинна перевищувати 0,5%, а за зенітним кутом не повинна перевищувати 0,1%. Крім того, необхідно звернути увагу на те, що вказана похибка не повинна збільшуватися при зростанні температури до 120°C. А як відомо, на території України зі зростанням глибини свердловини температура збільшується, у середньому, на 60°C при заглибленні на кожні 1000 метрів. [3]

Мета. Отже, температурні випробування інклінометрів показують появу значних похибок температури, що досягають десятків градусів. Тому постає **задача** визначити та відкоригувати температурну похибку інклінометру.

Виклад основного матеріалу. Для розв'язання поставленої задачі, тобто уникнення температурних дрейфів датчиків, рекомендовано використовувати алгоритмічні методи компенсації температурних похибок.

Застосовуючи алгоритмічний метод компенсації температурних похибок інклінометрів, можна відзначити, що, якщо у свердловинній частині інклінометричної телесистеми розташувати додатково датчик температури, а температурний дрейф первинних датчиків заздалегідь виміряти, то облік величини дрейфу показників датчиків при відомій температурі дозволяє обчислити температурну похибку та відкоригувати показання інклінометра. [3]

Було запропоновано випробувати первинні перетворювачі та вплив температур на них, використовуючи універсальний поворотний стенд, що дасть можливість визначити температурну похибку при зміні положення бурового снаряда. [6]

У даній роботі було проведено дослідження поведінки датчиків при зміні температури та їх положення. Експериментальна установка складалася з труби діаметром 40 мм, довжиною 800 мм, нагрівального елемента з вентилятором, які закріплені на універсальний стенд, що дає можливість провести випробування, змінюючи кут нахилу всієї установки. Оскільки за допомогою нагрівального елемента можна плавно міняти температуру у трубі, то тим самим ми досягаємо можливості імітувати середовище, в якому знаходиться буровий снаряд при бурінні свердловини. У середині первинних перетворювачів знаходяться вбудовані датчики температури, але у трубу штучно вводиться додатковий датчик температури, що даватиме інформацію про середовище всередині труби.

Дані дослідження проводилися в лабораторних умовах з використанням двовісних акселерометрів, цифрового датчика температури, що був встановлений у корпус інклінометричного пристрою при температурі $T = +21 \dots 100$ °C з використанням раніше згаданої установки. Датчик був виставлений у горизонтальній площині, тобто зенітний кут дорівнював 0. Крок зміни зенітного кута складав 20 кутових градусів, у свою чергу змінювали штучно температуру всередині труби, в яку був поміщений сам інклінометр. Кожне випробування виконувалося 20 разів для визначення середнього арифметичного. При цьому, якщо відхилення будь-якого з 20-ти вимірювань значно

відрізнялося від середнього значення, то вимір вважався недійсним і виключався з результатів, а вимірювання у цій точці повторювалося.

Пропонується алгоритмічний спосіб і спосіб зворотного зв'язку, що дають можливість обліку похибки при вимірюванні азимутального, зенітного та візирного кутів інклінометра від впливу температури [2].

При складанні математичної моделі інклінометру прийнято, що змінюються лише вихідні електричні параметри датчиків, а просторові кутові переміщення датчиків щодо корпусу приладу при зміні температури не змінюються. Параметри датчиків U_{0i}, U_{mi} є функціями температури T

$$U_i^a(T) = U_{0i}^a(T) + U_{mi}^a(T)b_i;$$

$$U_i^\Phi(T) = U_{0i}^\Phi(T) + U_{mi}^\Phi(T)a_i,$$

де $U_i^a(T)$ і $U_i^\Phi(T)$ – вихідна напруга з акселерометрів та ферозондів; $U_{0i}^a(T)$, $U_{mi}^a(T)$, $U_{0i}^\Phi(T)$, $U_{mi}^\Phi(T)$ – нульові та максимальні значення вихідних сигналів акселерометрів, ферозондів, гіроскопів; b_i , a_i – направляючі косинуси між векторами прискорення сили тяжіння \vec{g} , магнітного поля Землі \vec{g} та осями чутливості відповідних датчиків; T – температура навколишнього середовища.

Запишемо вирази (1,2) в безрозмірному вигляді

$$b_i = \frac{U_i^a(T) - U_{0i}^a(T)}{U_{mi}^a(T)}; \quad (1)$$

$$a_i = \frac{U_i^\Phi(T) - U_{0i}^\Phi(T)}{U_{mi}^\Phi(T)}; \quad i=1,2,3, \quad (2)$$

тоді азимут α , зенітний θ і візирний кут ϕ обчислюються за формулами

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_3 b b_3}; \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}{b_3}; \\ \operatorname{tg} \phi &= -\frac{b_2}{b_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Дослідження показують, що величини U_{0i} , U_{mi} істотно залежать від температури T . Звідки вихідні сигнали датчиків у загальному випадку є функціями азимута, зенітного та візирного кутів і температури.

$$U_i = U_i(\alpha, \theta, \phi, T);$$

$$U_{0i} = U_{0i}(T);$$

$$U_{mi} = U_{mi}(T); \quad i=1,2,3.$$

Розглянуте завдання встановлення залежності від температури вихідних сигналів датчиків на основі наступних даних

$$U_{ijk} = U_{ijk}(\alpha_j, \phi_j, \theta_j, T_k);$$

$$i=1,2,3; \quad j=1,2,\dots,m; \quad k=1,2,\dots,n.$$

У кожному рівнянні містяться дві невідомі функції $U_{0i}(T)$, $U_{mi}(T)$, тому для їх визначення необхідно проводити температурні випробування хоча би для двох різних кутових положень інклінометра

$$U_{i1} = U_{0i}(T) + U_{mi}(T)b_{i1};$$

$$U_{i2} = U_{0i}(T) + U_{mi}(T)b_{i2}; \quad i=1,2,3.$$

Рішення цієї системи рівнянь таке

$$U_{0i}(T) = U_{i1} - \frac{b_{i1}}{b_{i2} - b_{i1}}(U_{i1} - U_{i2});$$

$$U_{mi}(T) = \frac{1}{b_{i2} - b_{i1}}(U_{i1} - U_{i2}); \quad i=1,2,3.$$

Задаючи різні положення інклінометра b_{i1}, b_{i2} і змінюючи температуру T , отримаємо U_{i1}, U_{i2} , на підставі яких можна обчислити функції $U_{0i}(T)$, $U_{mi}(T)$ і, підставивши ці значення у вирази

$$b_i = \frac{U_i^a(T) - U_{0i}^a(T)}{U_{mi}^a(T)};$$

$$a_i = \frac{U_i^\Phi(T) - U_{0i}^\Phi(T)}{U_{mi}^\Phi(T)};$$

дістаємо можливість обчислити відкориговані величини просторової орієнтації свердловинного снаряда – його азимутальний, зенітний і візирний кути за формулами

$$tg\alpha = \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_3 b b_3};$$

$$tg\theta = \frac{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}}{b_3}.$$

Температурний дрейф датчиків пропорційний температурі

$$U_i(T) = U_{0i} - \Delta_{0i}T + (U_{mi} + \Delta_{mi}T)b_i; \quad i=1,2,3.$$

Задаючи різні положення інклінометра b_{i1}, b_{i2} і змінюючи температуру T , отримаємо U_{i1}, U_{i2} , на підставі вище наведених формул обчислимо $U_{0i}(T)$, $U_{mi}(T)$. Значення цих функцій будуть підставлені у вирази (1) і (2). Вони дозволяють обчислити відкориговані величини просторової орієнтації свердловинного снаряда – його зенітний і візирний кути за початковими формулами (3). Доцільно запам'ятувати не числові значення функцій, а апроксимувати їх статичними поліномами, коефіцієнтами яких можна обчислити та запам'ятати для кожного датчика, що становить інклінометр. Вони називаються температурними коефіцієнтами дрейфу первинних перетворювачів. Для кожного датчика вони є постійними, а тому можуть бути використані для обчислення заданої температури значень, що коригують.

Висновки. Алгоритмічний спосіб зниження температурних похибок первинних датчиків у складі інклінометрів дає можливість набути точніших вихідних значень датчиків. Цей спосіб дає можливість урахувати похибки при зміні азимутального, зенітного й візирного кутів інклінометра з ферозондами та акселерометрами від впливу температури навколишнього середовища. Спосіб ґрунтується на попередніх температурних випробуваннях, у ході яких відшукується й фіксується закон зміни температурного дрейфу кожного первинного датчика (ферозонду, акселерометра), а потім у ході роботи у свердловині обчислюються азимутальний, зенітний і візирний кути з урахуванням величини дрейфу кожного датчика від температури в свердловині, вимірювання якої здійснюється додатковим датчиком температури.

Розроблені математичні моделі первинних перетворювачів, складових інклінометра, що враховують їх температурний дрейф, апроксимовані нелінійними функціями відносно температури.

Запропоновані методики визначення коефіцієнтів статичних поліномів, що описують закони температурного дрейфу датчиків на основі використання методу найменших квадратів, забезпечують найменшу середньоквадратичну похибку.

Для температурного дрейфу, що описується нелінійною залежністю, знайдені коефіцієнти температурного дрейфу датчиків. Облік їх у початкових формулах обчислення кутів просторової орієнтації дозволяє в 5...10 разів знизити похибку вимірювання при зростанні температури + 120 °С.

Встановлено, що знаки коефіцієнтів температурного дрейфу первинних перетворювачів можуть бути як позитивними, так і негативними.

Список літератури / References

1. Подлесный Н.И. Элементы систем автоматического управления и контроля / Подлесный Н.И., Рубанов В.Г. – К.: Вища школа, 1991. – 464 с.
- Podlesnyy, N.I. and. Rubanov, V.G. (1991), *Elementy system avtomaticheskogo upravleniya i kontrol'ya* [Elements of the automatic control systems], Vyshcha shkola, Kiev, Ukraine.

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

Kovshov, G.N., Alimbekov, R.I. and Zhiber, A.V. (1998), *Inklinometry (Osnovy teorii i proektirovaniya)* [Inclinometers (Introduction in Theory and Design, Gilem, Ufa, Russia).

3. Ковшов Г.Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Ковшов Г.Н., Коловенртнов Г.Ю – УФА, 2001 – 228 с.

Kovshov, G.N., Kolovenrtnov G.Yu. (2001), *Pribory kontrolya prostranstvennoy orientatsyi skvazhyn pri burenii* [Devices for Control of Spatial Orientation of Borehole during Drilling], Ufa, Russia.

4. Вильям Столлингс Операционные системы / Вильям Столлингс – М.: Вильямс, 2004. – 848 с.

William Stollings (2004), *Operatsyonnye sistemy* [Operating Systems], Williams, Moscow, Russia.

5. Бохан Н.И. Средства автоматики и телемеханики / Бохан Н.И. Бородин И.Ф – М.: Агропромиздат, 1992. – 415 с.

Bokhan, N.I. and Borodin, I.F (1992), *Sredstva avtomatiki i telemekhaniki* [Facilities of Automatics and Telemechanics], Agropromizdat, Moscow, Russia.

6. Зеленухин А.И. Средства автоматики и телемеханики / Зеленухин А.И. – М.: Агропромиздат, 1992. – 351 с.

Zelenukhin, A.I. (1992), *Sredstva avtomatiki i telemekhaniki* [Facilities of Automatics and Telemechanics], Agropromizdat, Moscow, Russia.

7. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики – М.: Высш. школа, 1991. – 304 с.

Kelim, Yu.M. (1991), *Elektromekhanicheskiye i magnitnye elementy system avtomatiki* [Electromechanical and Magnetic Elements of Automation Systems] Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

Цель. Теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию алгоритмического метода компенсации температурных дрейфов первичных преобразователей.

Методика. Методика работы включает в себя математическое описание зависимости выходных значений первичных преобразователей функции от температуры. Была использована универсальная поворотная установка, которая дала возможность определить температурную погрешность инклинометрического устройства при изменении положения бурового снаряда. С помощью математических выражений обработаны полученные результаты и получены истинные значения датчиков.

Результаты. Для достижения поставленной цели были измерены значения азимутального, зенитного и визирного углов при помощи инклинометрического устройства и системы передачи информации на поверхность в центр управления, где информация обрабатывается. В процессе обработки был использован известный алгоритмический способ снижения температурных погрешностей, основанный на испытаниях,

в ходе которых отыскивается и запоминается закон изменения температурного дрейфа феррозондов и акселерометров. При этом был вычислен зенитный азимут и визирный угол с учетом величины дрейфа каждого датчика от температуры в скважине, измерение которой осуществляется дополнительным датчиком температуры. Также были составлены математические модели первичных преобразователей, составляющих инклинометр, которые учитывают их температурный дрейф.

Научная новизна. Эффективность функционирования автоматизированных систем управления ориентацией объектов во многом зависит от технических характеристик датчиков, входящих в их состав. Впервые установлено, что выходные величины с первичных преобразователей существенно зависят от температуры, что противоречит их паспортным данным. Появилась возможность компенсировать температурный дрейф датчиков, используя известные алгоритмические методы и метод обратной связи.

Практическая значимость. Заключается в повышении точности выходных значений инклинометрического устройства в несколько раз, что существенно влияет на определение положения бурового инструмента при выполнении геологоразведочных работ.

Ключевые слова: *первичные преобразователи, температурный дрейф, датчик температуры, алгоритмический метод, буровой снаряд, экспериментальная установка, магнитное поле, нагревательный элемент*

Purpose. To carry out the theoretical and experimental research for substantiation of algorithmic method of indemnification of temperature drift in primary transducers.

Methodology. The methodology implies the mathematical description of dependence of function primary transducers output values on temperature. We have used the universal swiveling mount allowing us to define the temperature error of bore-hole surveying instrument caused by the change of position of drill string. The received results were subjected to mathematical processing and the true values of sensors have been obtained.

Findings. The values of azimuthal, zenithal and sight angle have been measured by means of inclinometer and the data have been transmitted to the surface control centre to be processed. During data processing we have applied the known algorithmic method of temperature error reduction based on testing and determination of the law of temperature drift change in flux-gate meters and accelerometers. The zenithal azimuth and sight angle has been determined taking into account the drift of every sensor caused by temperature in the well measured by the additional sensor of temperature. The mathematical models of inclinometer primary sensors taking into account their temperature drift have been designed.

Originality. The efficiency of orientation automated control system in a great deal depends on technical parameters of sensors. We have determined that the output values of primary transducers substantially depend on temperature that is in conflict with their passport in-

formation. We have got the possibility to compensate the temperature drift of sensors by means of the known algorithmic methods and method of feed-back.

Practical value. The essential improvement of inclinometer output values accuracy substantially influences the determination of boring instrument position during geological exploration.

УДК: 621.01, 621.09

П.Я. Пукач канд. фіз.-мат. наук, доц.,
І.В. Кузьо, д-р техн. наук, проф.

Keywords: *primary transducer, temperature drift, sensor of temperature, algorithmic method, drill string, experimental plant, magnetic field, heating set*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
В.Г.Заренбіним. Дата надходження рукопису
05.11.12.*

Національний університет „Львівська політехніка“, м. Львів,
Україна, e-mail: ppukach@i.ua

НЕЛІНІЙНІ ПОПЕРЕЧНІ КОЛИВАННЯ НАПІВНЕОБМЕЖЕНОГО КАНАТА З УРАХУВАННЯМ ОПОРУ

Р.Ya. Pukach, Cand. Sci. (Phys.-Math.),
Associate Professor,
I.V. Kuzio, Dr. Sci. (Tech.), Professor

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
e-mail: ppukach@i.ua

NONLINEAR TRANSVERSE VIBRATIONS OF SEMIINFINITE CABLE WITH CONSIDERATION PAID TO RESISTANCE

Мета. Метою роботи є дослідження розв'язку задачі про нелінійні поперечні коливання пружного довгомірного тіла під дією сил опору в необмеженій області. Такі задачі мають прикладне застосування в різних технічних системах – коливаннях трубопроводів, залізничних колій, довгих мостів, електричних ліній, оптичних волокон. Необмеженість області створює додаткові принципові проблеми при дослідженні задачі. Для розглянутих у цій статті моделей нелінійних коливань не існує загальних аналітичних методик визначення динамічних характеристик коливального процесу.

Методика якісного вивчення коливань напівнеобмеженого каната під дією сил опору базується на загальних принципах теорії нелінійних крайових задач – методі монотонності та методі Гальоркіна.

Результати. Пропонується за допомогою якісних методів теорії нелінійних крайових задач отримати умови коректності розв'язку задачі (існування та єдиність розв'язку). У роботі для вказаних нелінійних коливальних систем отримано умови коректності розв'язку математичної моделі – достатні умови існування та єдиності у класі локально інтегрованих функцій.

Наукова новизна. Полягає в узагальненні методики вивчення нелінійних задач на новий клас коливальних систем у необмеженій області, обґрунтуванні коректності розв'язку вказаної математичної моделі, що має практичне застосування в реальних технічних коливальних системах.

Практична значимість. Запропонована методика дозволяє не лише обґрунтувати коректність розв'язку моделі, але дає також можливість при її дослідженні застосовувати різноманітні наближені методи.

Ключові слова: *математична модель, нелінійні коливання, нелінійна крайова задача, метод Гальоркіна, метод монотонності, необмежена область*

Актуальність проблеми. Дослідження нелінійних коливальних і хвильових явищ у пружних стрижневих конструкціях при дії різного роду збурень (силових, інерційних, кінематичних) складає одну із класичних проблем теоретичної та технічної механіки. Активізація теоретичних досліджень у цьому напрямі зумовлена логікою розвитку основ динаміки деформованих систем, інтересами найрізноманітніших практичних застосувань у будівництві та промисловості, зокрема, у машинобудуванні.

Проблеми вивчення впливу параметрів системи на коливання в достатній мірі досліджені у випадку лінійних коливальних систем. Такі ситуації моделюються лінійними диференціальними рівняннями з частинними похідними [1]. Асимптотичні методи нелінійної механі-

ки дозволили дослідити також широкий клас механічних коливальних систем для випадку квазілінійної залежності амплітуди коливань від пружних сил та сил опору [2, 3]. У випадку нелінійного закону пружності матеріалу, суттєво нелінійної залежності амплітуди коливань від пружних сил та сил опору задача пов'язана з принциповими математичними труднощами, оскільки відсутні загальні аналітичні методи розв'язування такого класу задач. Тому не існує загальних методик визначення амплітудно-частотних характеристик коливального процесу. З іншого боку, якісні методи загальної теорії нелінійних крайових задач дають змогу для широкого класу згаданих вище коливальних систем отримати результати коректності розв'язку задачі (мова йде про існування, єдиність та неперервну залежність від початкових даних). Вказана методика дозволяє обґрунтувати коректність розв'язку моделі та дає змогу в по-