DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.12

УДК 621.3.049:550.832.73

Г.А. Цветков

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ УГЛОВЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ УСТАНОВОЧНЫХ ПЛОЩАДОК ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ПРИБОРОВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Разработана микропроцессорная система управления объектами измерительно-вычислительного комплекса с использованием приборов и средств инерциальной навигации, позволяющая повысить точность измерения пространственного положения установочных площадок под приборы научной аппаратуры летательных аппаратов и при проведении геофизических исследований скважин. Описана методика проведения измерений и определения углов пространственной ориентации, представлены результаты экспериментов.

На основании проведенных исследований, анализа контроля параметров гидроразрыва пласта решается проблема создания автоматизированной измерительной системы с использованием приборов и средств инерциальной навигации, позволяющей повысить точность измерения углового рассогласования установочных площадок под приборы научной аппаратуры с учетом динамической погрешности измерения. Расширение функциональных возможностей измерительной системы достигается за счет дополнительного измерения пространственных угловых отклонений, угла азимутального рассогласования установочных площадок. В работе проведена оценка точностных характеристик пространственных угловых отклонений установочных площадок под приборы ГИС от ошибок калибровки, неточности установки, углов наклона, неверной начальной ориентации приборов.

Ключевые слова: измерительные навигационные головки, датчик момента, угловой датчик, блок обработки информации, блок управления, моделирование, акселерометр, программный комплекс, угловые отклонения от горизонта и по азимуту.

G.A. Tsvetkov

Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MICROPROCESSOR SYSTEM TO CONTROL ANGULAR POSITION OF MOUNTING PADS FOR GEOPHYSICAL AND SPACECRAFT-CONTROL EQUIPMENT

It was developed microprocessor control objects measuring-computer complex using devices and inertial navigation, which allows to increase the accuracy of measurement of the spatial position of the mounting plates under the instruments scientific equipment during the GIS. A method for measuring and determining the angles of spatial orientation is described; the results of experiments are presented.

The problem of creating an automated measurement system using instruments and inertial navigation means, allowing to increase the accuracy of measurement of the angular mismatch of mounting pads for scientific equipment, taking into account the dynamic measurement error, is considered based on the executed research and hydrofracturing parameters control analysis. Enhancing the functionality of the measuring system is achieved by an additional measurement of spatial angular deviations and the angle of azimuthal mismatch of mounting pads. It was carried out estimation of the accuracy characteristics of spatial angular deviations of mounting pads for equipment from calibration errors, installation inaccuracy, tilt angles, incorrect initial orientation of devices.

Keywords: measuring navigation head, torque sensor, angular sensor, information processing unit, control unit, modeling, accelerometer, software package, angular deviation from horizontal and azimuth tiltmeter.

Введение

В процессе проведения геофизических исследований, связанных с измерением искривления ствола скважин; мониторинга управления развитием трещин при гидроразрыве пласта (ГРП); геонавигации бурового инструмента в скважине, коллекторах со сложной структурой порового пространства и определения свойств геологической формации, окружающей бурильную колонну, возникает проблема повышения точности измерения пространственных угловых отклонений и расширения функциональных возможностей ГИС, ГРП дополнительным измерением углов азимутального рассогласования установочных площадок для ориентации и выставки измерительных приборов (тилтметров или наклономеров, сейсмоприемников, приемопередающих антенн каротажных приборов и другой аппаратуры) и их юстировки и калибровки. В работах [1, 2] на основании проведенных теоретических исследований [3, 4] показан разработанный измерительно-вычислительный комплекс с автоматической системой управления для определения углов пространственного положения установочных площадок под приборы научной аппаратуры, применение которых в нефтегазовом комплексе позволит повысить точность измерения пространственных угловых отклонений и расширить функциональные возможности при геофизических исследованиях скважин и гидроразрыве пласта.

Анализ проблемы и технологического состояния измерительных комплексов

При проведении ГИС, связанных с измерением искривления ствола скважин, используются различные устройства и технологии измерений. Так, забой бурящейся скважины можно определить с помощью направлений прихода сигналов в нескольких разнесенных точках пространства с известными координатами, устройство содержит четыре блока модулей сейсмоприемников, установленных попарно и наклонно в диаметрально противоположных направлениях в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на установочных площадках силуминовой плиты в три-четыре ряда с сохранением взаимного сдвига на один градус. Недостаток данного подхода заключается в том, что при больших углах азимутального рассогласования между базовыми осями координат установочных площадок под сейсмоприемники и при колебаниях основания плиты возникает динамическая погрешность измерения, снижающая точность определения координат забоя с учетом привязки точек установки модулей к координатам устья скважины [5, 6].

При проведении мониторинга гидроразрыва пласта [7] контроль производится измерением микросейсмов и углов деформации окружающей среды и является единственным способом непосредственной оценки в области распространения трещин, их размеров и ориентации. Измерение углов деформации осуществляется специальным прибором-наклономером (тилтметром), имеющим два сенсора, измеряющих угол наклона в двух взаимно перпендикулярных направлениях (X и Y). Чувствительность таких сенсоров исключительно высока и составляет единицы нанорадиана ($5,7 \cdot 10^{-8}$ град). Данный способ имеет определенные ограничения и требует совершенствования, так как не учитывает углы азимутального рассогласования в ориентации и установке тилтметров и динамическую составляющую погрешности измерения, снижающие точность мониторинга при ГРП [8–10].

При наклонном и горизонтальном бурении для получения наиболее высокой продуктивности пласта в геонавигации применяются каротажные приборы [11–13], в которых одна или две приемопередающие антенны развернуты относительно оси бурильной колонны на некоторый угол α , благодаря этому система уравнений позволяет определить вертикальную и горизонтальную электрическую проводимость формации горных пород и относительный угол наклона. Недостаток заключается в том, что методика определения углов разворота приемопередающих антенн

передающих антенн каротажного прибора не учитывает погрешности углового рассогласования площадок, которая вносится в определение относительного угла наклона.

При измерении углов взаимной пространственной ориентации основную трудность представляет контроль угла азимутального рассогласования. В современных условиях он определяется оптическими методами, точность определения этого угла при использовании теодолитной сети составляет 1,5–2', тогда как требуемая по конструкторской документации точность определения углов рассогласования составляет 30''.

Разработка новых технологий и оборудования

Целью данной работы является исследование и модернизация измерительной системы [1, 2], предназначенной для контроля пространственных угловых отклонений и угла азимутального рассогласования установочных площадок под приборы управления и антенно-фидерные устройства. Предлагается измерительная система с использованием двух измерительных навигационных головок, устанавливаемых на контролируемые установочные площадки, при этом измеряются углы отклонения площадок от горизонта для отnivelированного и для отклоненного от горизонта на небольшой угол объекта. Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) представляет собой набор реальных объектов управления (рис. 1), состоящий из двух измерительных головок (ИГ) 3, включающих датчики момента (ДМ) 2, датчики углов (ДУ) 14, измерители наклона (акселерометры) 1, размещенные в поворотных рамках 8, блоков управления для обработки информации с измерителя наклона 15, блоков управления датчиками момента 17 и обработки информации датчиков угла 16. $X_1OY_1Z_1$ – система координат, связанная с первой из контролируемых площадок; $X_2OY_2Z_2$ – система координат, связанная со второй из контролируемых площадок.

В работе проведена модернизация системы контроля пространственных угловых отклонений, а именно вычислительного блока и блока управления. Необходимость модернизации связана с техническим устареванием элементной базы, используемой в данных измерительных головках. Исследуемая система представляет собой две измерительные головки, которые измеряют наклоны относительно горизонта, а также угол азимутального рассогласования между измерительными головками. Микропроцессорная система для измерения угловых пространственных отклонений состоит из персонального компьютера, двух микроконтроллеров, измерительных головок ИГ-1, ИГ-2. На рис. 2 приведена структурная схема микропроцессорной измерительной системы.

Микроконтроллер производит операцию по контролю и изменению положения рамки с акселерометром. Изменение положения рамки производится датчиком момента. Контроль угла разворота рамки осуществляется датчиком угла. Данные по измерению отклонения углов от горизонта снимаются с акселерометра. Информация с ДУ и акселерометра поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллером производится обработка информации, полученной с акселерометра.

Итоговые данные отправляются на персональный компьютер для принятия решений. Принципиальная электрическая схема системы управления объектами измерений представлена на рис. 3 и работает следующим образом. Сигнал с ДУ и акселерометра подается на АЦП через буфер, позволяющий согласовывать выход датчика с входом АЦП по величине сопротивления. По АЦП сигнал, преобразованный в двоичный вид, передается на микроконтроллер, где информация сохраняется, и происходят вычисления по алгоритму, представленному на рис. 4. Микроконтроллер соединен с датчиком момента через полевой транзистор, который при активации пропускает через себя пусковой ток датчика момента. Микроконтроллер отправляет обработанную информацию на персональный компьютер через порт RS232, где MAX3232CD является преобразователем уровня для RS232.

Рис. 1. Измерительно-вычислительный комплекс: 1 – измеритель наклона; 2 – опоры измерительного блока; 3 – измерительные головки; 4 – установочные (контролируемые) площадки; 5 – контроллер; 6 – корпус ИГ; 7 – рамка поворотная; 8 – измерительный блок; 9 – вертикальная ось ИГ; 10 – ось чувствительности измерителя наклона; 11 – датчик момента; 12 – крышка блока; 13 – муфта соединительная; 14 – датчик угла; 15 – блок обработки информации измерителя наклона; 16 – блок обработки информации датчика угла; 17 – блок управления датчиком момента; 18, 20 – шины передачи информации; 19 – компьютер

Рис. 2. Структурная схема измерительной системы ИВК

Рис. 3. Принципиальная электрическая схема системы управления

Программное обеспечение измерительной системы

Программное обеспечение к измерительному комплексу выполнено на языке программирования си шарп, получившем широкое применение при создании системного и программного обеспечения. В нашем случае код программы выполняет автоматическое измерение углов пространственных отклонений: контроль вращения рамки с акселерометром, снятие показаний с акселерометра, обработку полученной информации. В связи с этим одной из задач при составлении программы являлось перераспределение вычислительной нагрузки с персонального компьютера на микроконтроллер, в результате этого оставшуюся полезную мощность ПК можно использовать для представления полученной информации в любом необходимом пользователю виде. Программа является 32-битным приложением для Windows, задачей которого является инициализация измерений, т.е. запуск кода программы, написанного для контроллера на языке си, а также визуальное представление результатов измерений. Программа измеряет угловые пространственные отклонения от горизонта и определяет углы азимутального рассогласования установочных площадок под приборы согласно алгоритму, приведенному на рис. 4.

Алгоритм управления и измерения

Объект с установочными площадками отnivelирован, измерительная головка 1 установлена на первой из контролируемых площадок, а измерительная головка 2 установлена на второй площадке. Базовые оси головок совмещены с базовыми осями площадок (см. рис. 1). С персонального компьютера задается для первой измерительной головки угол поворота платформы $A_1 = A^*$, где A^* – угол азимутального рассогласования.

Угол поворота фиксируется датчиком угла. Когда углы поворота рамок становятся равными заданным, разворот прекращается. С контроллера одновременно подается команда на измерение углов отклонения осей чувствительности акселерометров, установленных в рамках измерительных головок φ_1^0 и φ_2^0 . Значения φ_1^0 и φ_2^0 записывается в память контроллера. Далее подается команда с контроллера и рамки с акселерометрами обеих измерительных головок разворачиваются на углы $\Delta A_1 = 90^\circ$ и $\Delta A_2 = 90^\circ$, которые контролируются датчиками угла. Затем производится одновременное измерение углов ϑ_1^0 и ϑ_2^0 , как и при определении углов φ_1^0 и φ_2^0 . Значения ϑ_1^0 и ϑ_2^0 вносятся в память контроллера. Система с установочными площадками отклоняется от горизонта на угол φ_3 . Подается команда на одновременное измерение углов φ_{1k} и φ_{2k} , ϑ_{1k} и ϑ_{2k} , измерения аналогичны измерению углов φ_1^0 и ϑ_1^0 . Значения ϑ_{1k} и ϑ_{2k} записываются в память контроллера. Рамки с акселерометрами измерительных головок разворачиваются на углы $\Delta A_1 = \Delta A_2 = -90^\circ$, затем измеряются углы φ_{1k} и φ_{2k} , значения которых записываются в память контроллера. Далее определяются углы рассогласования по следующей схеме: из памяти контроллера автоматически извлекаются значения углов φ_1^0 , φ_2^0 , ϑ_1^0 и ϑ_2^0 , затем определяются $\Delta\varphi = \varphi_2^0 - \varphi_1^0$, $\Delta\vartheta = \vartheta_2^0 - \vartheta_1^0$, эти значения выводятся на ПК, далее из памяти контроллера извлекаются ϑ_{1k} и ϑ_{2k} , φ_{1k} и φ_{2k} . Затем определяются следующие параметры:

$$\delta A = \arctg \frac{\sin \frac{\varphi_{2k} - \varphi_2^0}{2}}{\sin \frac{\vartheta_{2k} - \vartheta_2^0}{2}} - \arctg \frac{\sin \frac{\varphi_{1k} - \varphi_1^0}{2}}{\sin \frac{\vartheta_{1k} - \vartheta_1^0}{2}},$$

$$[A] = A^* + \delta A,$$

Рис. 4. Блок-схема алгоритма ИБК

где φ_1^0 – угол между осью OZ_1 и плоскостью горизонта при горизонтальном расположении осей OX_r и OZ_r ; φ_2^0 – угол между осью OZ_2 и плоскостью горизонта при горизонтальном расположении осей OX_r и OZ_r ; ϑ_1^0 – угол между осью OX_1 и плоскостью горизонта при горизонтальном расположении осей OX_r и OZ_r ; ϑ_2^0 – угол между осью OX_2 и плоскостью горизонта при горизонтальном расположении осей OX_r и OZ_r ; φ_3 – угол поворота системы координат $X_rOY_rZ_r$ вокруг оси OZ_r ; φ_{1k} – угол между осью OZ_1 и плоскостью горизонта при развернутой системе координат $X_rOY_rZ_r$ на угол φ_3 ; φ_{2k} – угол между осью OZ_2 и плоскостью горизонта при развернутой системе координат $X_rOY_rZ_r$ на угол φ_3 ; ϑ_{1k} – угол между осью OX_1 и плоскостью горизонта при развернутой системе координат $X_rOY_rZ_r$ на угол φ_3 ; ϑ_{2k} – угол между осью OX_2 и плоскостью горизонта при развернутой системе координат $X_rOY_rZ_r$ на угол φ_3 .

На основании изложенного алгоритма разработаны программы для контроллера на языке си и для ПК на языке си шарп. Программа составлена модульно, что позволяет вносить в нее дополнительные модули, связанные с выполнением калибровки и других настроек. На рис. 5 представлен интерфейс программы.

Рис. 5. Интерфейс программы

После введения угла азимутального рассогласования и нажатия кнопки «Старт» происходит запуск кода на микроконтроллере, который выполняет операцию по определению углов пространственной ориентации установочных площадок (угловых отклонений). Полученная информация выдается в поле «Результат».

Заключение

Разработан измерительно-вычислительный комплекс с микропроцессорной автоматической системой управления для определения углов пространственного положения установочных площадок под приборы научной аппаратуры, применение которых позволит повысить точность измерения пространственных угловых отклонений и расширения функциональных возможностей геофизических исследований скважин, гидроразрыва пласта дополнительным измерением углов азимутального рассогласования установочных площадок для ориентации и выставки измерительных приборов (тилтметров, сейсмоприемников, приемно-передающих антенн каротажных приборов) и получения более высокой продуктивности нефтяных и газовых месторождений.

Библиографический список

1. Цветков Г.А. Автоматизированная измерительная система контроля пространственных угловых отклонений // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 2(5). – С. 57–62.
2. Устройство для измерения пространственных угловых отклонений: пат. Рос. Федерация / Г.А. Цветков, Е.А. Федорова, Г.Ф. Утробин. – № 2495374; заявл. 30.03.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 13 с.
3. Цветков Г.А., Егоров М.А. Оценка точностных характеристик автоматизированной измерительной системы контроля пространственных угловых отклонений // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1(6). – С. 60–63.
4. Цветков Г.А., Шумилов А.В., Черных И.А. Оценка точностных характеристик параметров контроля угловых отклонений установочных площадок начальной ориентации тилтметров при проведении гидроразрыва пласта // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 13. – С. 26–37.
5. Система для измерения наклона: пат. США: МКИ 01 В 5/28. – № 4378693; заявл. 11.02.1981; опубл. 05.04.1983.
6. Онегова Е.В. Влияние смещения электромагнитного зонда относительно оси скважины на измеряемый сигнал // Геонавигация и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 4. – С. 423–427.
7. Аксельрод С.М. Геофизический контроль гидроразрыва пласта в реальном времени: возможности, реализация и ограничения (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. – 2014. – Вып. 4(238). – С. 84–116.
8. Лысков И.А., Мусихин В.В., Кашников Ю.А. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методами радарной интерферометрии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2010. – № 1. – С. 11–16.
9. Губайдуллин М.Г., Костин Н.Г., Глушков Д.В. Моделирование гидравлического разрыва пласта с применением симулятора GONFER // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 2. – С. 55–60.
10. Васильев В.А., Верисокин А.Е. Гидроразрыв пласта в горизонтальных скважинах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 6. – С. 101–110.
11. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for determining properties of earth formations: пат. США 7948238 В2. – 2009.
12. Цветков Г.А., Ширяев П.Р., Егоров М.А. Разработка технологии, основанной на применении волоконно-оптических датчиков, для повышения качества бурения скважин // Каротажник. – 2014. – № 244. – С. 94–100.
13. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for geosteering within a desired pay-zone: пат. США 8085049 В2. – 2011.

References

1. Tsvetkov G.A. Avtomatizirovannaya izmeritelnaya sistema kontrolya prostranstvennykh uglovykh otkloneniy [Automatic measurement system for control of angular deviations]. *Pribory i metody izmereniy*, 2012, no. 2 (5), pp. 57-62.
2. Tsvetkov G.A., Fedorova E.A., Utrobin G.F. Ustroystvo dlya izmereniya prostranstvennykh uglovykh otkloneniy [The device for measurement of angular deviations]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2495374 (2013).
3. Tsvetkov G.A., Egorov M.A. Otsenka tochnostnykh kharakteristik avtomatizirovannoy izmeritelnoy sistemy kontrolya prostranstvennykh uglovykh otkloneniy [Evaluation of accuracy of automatic measurement system parameters for control of angular deviations]. *Pribory i metody izmereniy*, 2013, no. 1 (6), pp. 60-63.
4. Tsvetkov G.A., Shumilov A.V., Chernykh I.A. Otsenka tochnostnykh kharakteristik parametrov kontrolya uglovykh otkloneniy ustanovochnykh ploshchadok nachalnoy orientatsii tiltmetrov pri provedenii gidro-razryva plasta [Evaluation of accuracy of control parameters of angular deviations of installed platforms for initial orientation of tiltmeters during hydraulic fracturing]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2014, no. 13, pp. 26-37.
5. Sistema dlya izmereniya naklona [System for tilt measurement]. Patent U.S. 4378693 (1983).

6. Onegova E.V. Vliyanie smeshcheniya elektromagnitno zonda otnositelno osi skvazhiny na izmeryaemyy signal [Influence of electromagnetic tool displacement on measured signal]. *Geonavigatsiya i geofizika*, 2010, vol. 51, no. 4, pp. 423-427.
7. Akselrod S.M. Geofizicheskiy kontrol gidrorazryva plasta v realnom vremeni: vozmozhnosti, realizatsiya i ogranicheniya (po materialam zarubezhnoy pechati) [Geophysical control of hydraulic fracturing in real time: possibilities, implementation and restrictions]. *Karotazhnik*, 2014, iss. 4 (238), pp. 84-116.
8. Lyskov I.A., Musikhin V.V., Kashnikov Yu.A. Monitoring deformatsionnykh protsessov zemnoy poverkhnosti metodami radarnoy interferometrii [Monitoring of surface deformation processes by radar interferometry]. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2010, no. 1, pp. 11-16.
9. Gubaydullin M.G., Kostin N.G., Glushkov D.V. Modelirovanie gidravlicheskogo razryva plasta s primeneniem simulyatora GOHFER [GOHFER replicator application for modelling of formation hydraulic fracture]. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2012, no. 2, pp. 55-60.
10. Vasilev V.A., Verisokin A.E. Gidrorazryv plasta v gorizontalnykh skvazhinakh [Hydraulic fracturing in horizontal wells]. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2013, no. 6, pp. 101-110.
11. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for determining properties of earth formations. Patent U.S. 7948238 B2 (2009).
12. Tsvetkov G.A., Shiryaev P.R., Egorov M.A. Razrabotka tekhnologii, osnovannoy na primeneniі volokonno-opticheskikh datchikov, dlya povysheniya kachestva bureniya skvazhin [Development of the technology based on fiber-optics sensors to increase well drilling quality]. *Karotazhnik*, 2014, no. 244, pp. 94-100.
13. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for geosteering within a desired payzone. Patent U.S. 8085049 B2 (2011).

Об авторе

Цветков Геннадий Александрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Геофизика» ФГБОУ ВО ПГНИУ; кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: zvetkov71043@mail.ru).

About the author

Gennadiy A. Tsvetkov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Geophysics, Perm State National Research University; Department of Life Safety, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: zvetkov71043@mail.ru).

Получено 10.02.2017