

Литература

1. Nie A. G. Измерение токов ниже $1 \cdot 10^{-17}$ А при низком уровне шумов с помощью динамического емкостного электрометра // IEEE Intern. Conv. Record. 1967. V. 15. P. 59—65.
2. Илюкович А. М., Носенко В. А., Черняев П. А. К вопросу о мерах для поверки электрометрических измерителей предельной чувствительности // Сб. «Техника средств связи». Сер. «Радиоизмерительная техника». 1979. № 5(13). С. 20—24.
3. Борзов В. М., Илюкович А. М. Аппаратура для поверки электрометрических измерителей токов в диапазоне 10^{-8} — 10^{-17} А. М.: Труды ВНИИФТРИ. 1973. № 10(40). С. 90—103.
4. Илюкович А. М. Техника электрометрии. М.: Энергия, 1976.
5. Черняев П. А., Казакова Е. А. Особенности аппаратуры для измерений сигналов в высокоомных цепях // Метрология и приборостроение. 2011. № 2. С. 35—39.
6. Силл и Ен. Прибор для измерения сопротивлений изоляторов // Приборы для научных исследований. 1968. Т. 41. № 3. С. 116—117.
7. Павлов О. М., Покусаев А. В., Телитченко Г. П. Эталонная база России в области измерений малых постоянных токов в диапазоне 10^{-16} — 10^{-9} А // Измерительная техника. 2007. № 11. С. 40—42; Pavlov O. M., Pokusaev A. V., Telitchenko G. P. The standard base of Russia for measuring small direct-current in the 10^{-16} — 10^{-9} a range // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N. 11. P. 1185—1188.

8. Лобко В. П. и др. Исследование эталонного оборудования воспроизведения малых постоянных токов // Метрология и приборостроение. 2013. № 2. С. 40—42.
9. Hewlett-Packard Company. HP 3458A Multimeter. Operating, Programming and Configuration. Manual, 1994. [Офиц. сайт] <http://www.hp.com/ru> (дата обращения 23.02.2014 г.).
10. Иванов В. И. Курс дозиметрии. М.: Атомиздат, 1970.
11. Носенко В. А., Фролова А. В., Черняев П. А. Флуктуации при измерениях приборами с ионизационными камерами // Медицинская радиология. 1975. № 2. С. 54—61.
12. Советов А. Н. Восстановительные и компенсаторные процессы в центральной нервной системе. М.: Медицина, 1988.
13. Katkov A. S. e. a. Primary Standard of Current Developed of VNIIM. 2nd ISEM, China. 1993. P. 47—48.
14. Пат. № 2478974 РФ. Способ воспроизведения единицы силы постоянного электрического тока и устройство для его осуществления / Александров В. С., Павлов О. М., Телитченко Г. П. / Изобретения. Полезные модели. 2013. № 10.
15. RECOMMENDATION E 1 (2007): Proposed changes to the International System of Units (SI) // CCSEM. 2007-44.

Дата принятия 15.04.2014 г.

531.746

Инклинометрическая система для подземной пространственной ориентации

А. И. ЗАЙКО, Г. А. ИВАНОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия, e-mail: zaiko@ugatu.ac.ru

Рассмотрен алгоритм принятия решения для инклинометрической системы со структурной избыточностью, позволяющий сделать вывод о достоверности измерений на базе показаний магнитометрического или гироскопического модулей. В качестве критериев выбора достоверного измерения предложено использовать информацию о существовании магнитных возмущений, сигналы с первичных датчиков и привязку к широте местности.

Ключевые слова: инклинометрическая система, подземная навигационная система, структурная избыточность.

A decision making algorithm for inclinometric system with structural redundancy allowing to make a conclusion on validity of measurements based on readings of magnetometric or gyroscopic modules has been considered. The information on magnetic disturbances, signals from primary sensors, and location latitude data was suggested as a criterion for adequate measurement selection.

Key words: inclinometer system, underground navigation system, structural redundancy.

Задача пространственной ориентации нефтегазовых скважин при бурении и обслуживании решается с помощью инклинометрического измерительного комплекса. В его состав входит скважинный модуль и наземное устройство, обмен информацией между которыми осуществляется по каналу связи. По типу используемых первичных датчиков инклинометры делятся на магнитометрические и гироскопические [1, 2].

Современные магнитометрические инклинометры получили широкое распространение из-за высокой вибро- и ударостойкости, приемлемой стоимости и возможности работы в широком диапазоне температур, однако точность инклинометрической системы (ИС) на базе феррозондов зависит от существования намагниченных масс. Область применения магнитометрических инклинометров ограничена невозможностью проведения измерений в скважинах, обса-

женных стальными трубами, в условиях магнитных аномалий, высоких широт, где горизонтальная составляющая магнитного поля мала [1—4].

Для определения параметров ориентации скважин, пробуренных в средах с аномальными магнитными свойствами, при исследовании рудных скважин, контроле трубопроводов, проложенных в труднодоступных местах, используют гироскопические инклинометры. К недостаткам большинства таких инклинометров следует отнести: снижение точности измерений из-за дрейфа гироскопических датчиков, большие габаритные размеры и стоимость

скважного модуля по сравнению с магнитометрическими инклинометрами [1, 3, 5].

В настоящей работе предложен вариант совместного использования магнитометрических и гироскопических датчиков для повышения надежности, точности, расширения условий эксплуатации и создания универсальной подземной навигационной системы [3, 6].

Структурная схема такой ИС показана на рис. 1 и представляет интеграцию гироскопических и магнитометрических инклинометров. В качестве первичных датчиков ИС используют по три ортогональных акселерометра, феррозонда и гироскопа. Блок акселерометров измеряет проекции ускорения свободного падения g на оси, связанные с корпусом скважинного модуля, блок феррозондов — проекции напряженности магнитного поля Земли h_i , блок гироскопов — проекции угловой скорости Земли ω_i . В результате измерений образуются три пары векторов, позволяющие вычислить пространственные углы скважины: $(\mathbf{h}, \mathbf{g})$, $(\omega, \mathbf{g})$, $(\omega, \mathbf{h})$. В данной статье рассмотрен способ измерения углов искривления скважины только для пар $(\mathbf{h}, \mathbf{g})$ и $(\omega, \mathbf{g})$ [7, 8].

В процессе измерений сигналы с первичных датчиков поступают на многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Преобразованные сигналы через блок связи попадают в канал связи, передающий информацию в наземное устройство. В свою очередь, блок питания обеспечивает работоспособность измерительных и преобразовательных блоков.

В наземном устройстве осуществляется прием и дешифрация полученной информации. В блок обработки информации заложен алгоритм, с помощью которого вычисляют пространственные углы искривления скважины и преобразовывают их в пространственные координаты. Полученные пространственные углы, координаты и профиль скважины отображаются на экране оператора. Такая ИС осуществляет аппаратное и алгоритмическое резервирование.

Для реализации резервирования на всех этапах измерений необходима информация о неработоспособности одного из измерительных блоков, связанная с поломкой или неприемлемыми условиями эксплуатации. Регистрировать влияние внешних факторов на работоспособность ИС и делать выводы о достоверности тех или иных измерений в первом приближении можно на базе опорных значений углов магнитного наклона и склонения. Значения перечисленных углов известны заранее, их рассчитывают по координатам местности (долготе, широте, высоте над уровнем моря). В

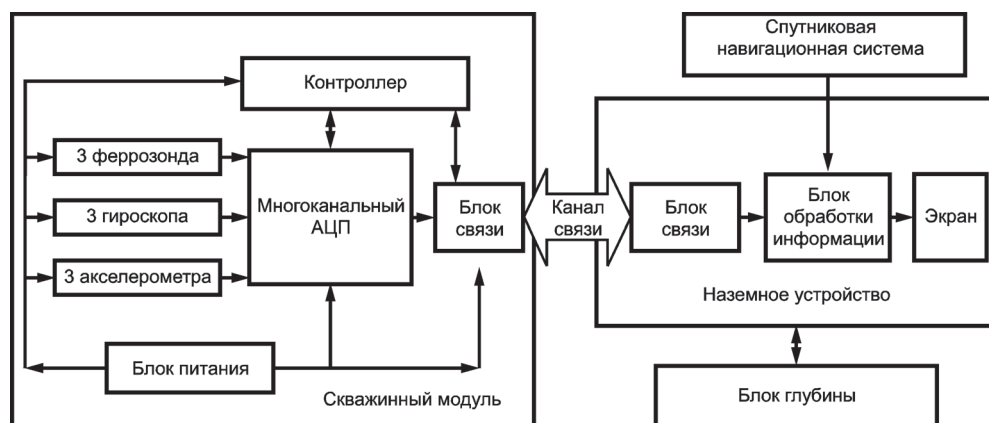


Рис. 1. Структурная схема инклинометрической системы

процессе измерений в скважине углы магнитного наклона и склонения можно найти по показаниям выходных сигналов с соответствующих датчиков. Различные варианты реализации ИС и способы измерения углов искривления скважины описаны в [3, 6—8].

Оценка допустимого диапазона флуктуаций значений углов магнитного наклона и учет магнитных аномалий осуществляется следующим образом. Выходной сигнал феррозонда при условии существования геомагнитных вариаций (ГМВ) принимает вид

$$T'_i = T_i + \Delta T = k_T (h_i + \Delta h) + T_0, \quad (1)$$

где k_T — коэффициент преобразования феррозонда; h_i — проекция напряженности магнитного поля Земли на ось чувствительности i -го феррозонда; Δh — ГМВ, обусловленные геомагнитными аномалиями, присутствием обсадных колонн или магнитонеустойчивыми зонами; T_0 — нулевой сигнал.

Выражение (1) в безразмерном виде примет следующий вид:

$$T'_i / k_T h = (T_i + \Delta T) / k_T h = T_i^n + (\varepsilon_h / 100 \ %);$$

$$T_i^n = (k_T h_i + T_0) / k_T h,$$

где T_i^n — выходной сигнал с феррозонда при условии отсутствия ГМВ в безразмерном (нормированном) виде; ε_h — относительное отклонение магнитного поля Земли от нормы, выраженное в процентах.

Подставив в формулу для расчета азимутального угла значения выходных сигналов феррозондов при условии существования и отсутствия ГМВ, можно рассчитать абсолютную погрешность измерения азимута $\Delta \alpha$.

Формула для расчета азимутального угла имеет вид [3, 9]:

$$\alpha = \arctg \left[\frac{(T_1 A_2 - T_2 A_1) \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{A_3 (T_1 A_1 + T_2 A_2) - T_3 (A_1^2 + A_2^2)} \right],$$

где A_i , T_i , $i = 1, 2, 3$ — выходные сигналы, поступающие с акселерометров и феррозондов.

В соответствии с технической инструкцией по проведению геофизических исследований основная погрешность измерений азимута должна удовлетворять условию $|\Delta \alpha| \leq 2^\circ$ [10]. Таким образом, анализ вычисленных значений $\Delta \alpha$ позволяет получить граничное значение ГМВ, при котором ИС

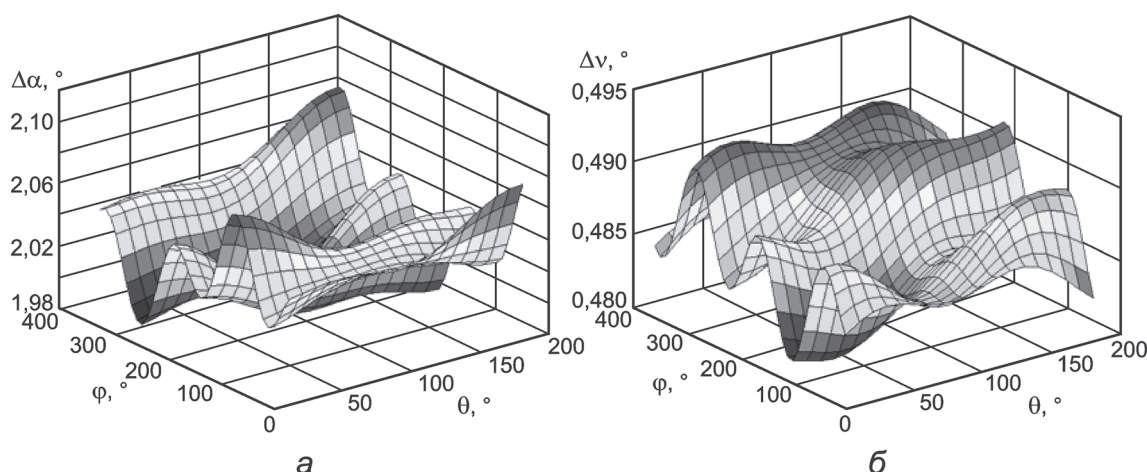


Рис. 2. Характер распределения $\Delta\alpha$ (а), $\Delta\nu$ (б) во всем диапазоне измеряемых визирных φ и зенитных углов θ

удовлетворяют точностным требованиям и соответствующее ему значение абсолютной погрешности угла магнитного наклонения $\Delta\nu$. Например, для месторождений на широте $60,95^\circ$ допустимым, согласно расчетам, является величина ГМВ, равная 0,85%.

Характеры распределения $\Delta\alpha$, $\Delta\nu$ во всем диапазоне измеряемых визирных φ и зенитных углов θ при $\varepsilon_h = 0,85\%$ и широте месторождения $\varphi_{\text{ш}} = 60,95^\circ$ представлены на рис. 2, а, б.

Согласно полученным результатам допустимая флуктуация абсолютной погрешности угла магнитного наклонения должна удовлетворять условию $\Delta\nu \leq 0,493$. Результаты расчетов для других месторождений представлены в таблице.

Рассчитанные значения $\Delta\nu$ позволяют судить о существовании или отсутствии ГМВ и являются критерием принятия решения о достоверности измерений на базе магнитометрического или гироскопического блоков. Значение флуктуации угла магнитного наклонения зависит от географических координат местности, времени года и рассчитывается индивидуально для каждого месторождения.

Допустимые значения ГМВ ε_h и абсолютной погрешности $\Delta\nu$

Параметр	Широта, °					
	56,05	60,95	63,2	65,7	67,45	70
$\varepsilon_h, \%$	1	0,85	0,75	0,65	0,6	0,5
$\Delta\nu, ^\circ$	<0,586	<0,493	<0,424	<0,367	<0,348	<0,289

В качестве дополнительных условий, позволяющих судить о достоверности измерений, реализации информационной избыточности, осуществлении функции резервирования в случае отказа первичных датчиков, предложено использовать следующие величины: отклонения экспериментальных показаний гироскопов ΔD и феррозондов ΔT от опорных значений, абсолютную погрешность широты $\Delta Y_{\text{ш}}$.

Сложение сигналов с гироскопических и магнитометрических датчиков и последующее нормирование приводят к следующему результату:

$$D_n = (D_1^2 + D_2^2 + D_3^2)^{1/2} / k_D \omega = 1;$$

$$T_n = (T_1^2 + T_2^2 + T_3^2)^{1/2} / k_T h = 1, \quad (2)$$

где $D_i, T_i, i = 1, 2, 3$ — выходные сигналы, поступающие с триады гироскопов и феррозондов; k_D, k_T — коэффициенты преобразования соответствующих датчиков.

Выражения (2) верны при отсутствии погрешностей и идентичности первичных датчиков. При проведении измерений в реальных условиях экспериментальные значения отличаются от единицы:

$$D'_n = [(D_1')^2 + (D_2')^2 + (D_3')^2]^{1/2} / k_D \omega \neq 1;$$

$$T'_n = [(T_1')^2 + (T_2')^2 + (T_3')^2]^{1/2} / k_T h \neq 1.$$

Отклонения экспериментальных значений D'_n, T'_n от опорных

D_n, T_n вычисляют по формулам: $\Delta D = D_n - D'_n$; $\Delta T = T_n - T'_n$.

Полученные $\Delta D, \Delta T$ позволяют сделать вывод о достоверности измерений на базе соответствующих датчиков.

В качестве дополнительного условия для реализации операции принятия решения используется $\Delta\varphi_{\text{ш}}$. Широта месторождения нефти $\varphi_{\text{ш}}$ — величина известная, также ее можно найти экспериментально:

$$\varphi'_{\text{ш}} = \arcsin(\mathbf{g}^0 \mathbf{\omega}^0) = \arcsin \left[- \left(A_1 D'_1 + A_2 D'_2 + A_3 D'_3 / (A_1^2 + A_2^2 + A_3^2)^{1/2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (D_1'^2 + D_2'^2 + D_3'^2)^{1/2} \right) \right],$$

где $\mathbf{g}^0, \mathbf{\omega}^0$ — единичные векторы ускорения силы тяжести и угловой скорости вращения Земли; A_i, D'_i — выходные сигналы, поступающие с акселерометров и гироскопов [9, 11].

Тогда абсолютная погрешность широты: $\Delta\varphi_{\text{ш}} = \varphi_{\text{ш}} - \varphi'_{\text{ш}}$.

Для подтверждения адекватности предложенных условий был проведен виртуальный эксперимент. В качестве исходных данных использовали результаты инклинометрии в скважине в районе Тэдинского месторождения нефти.

Попарный анализ $(\Delta D, \Delta T), (\Delta\varphi_{\text{ш}}, \Delta\nu)$ при различных значениях ГМВ ε_h на широте нахождения данного месторождения показал, что при $\varepsilon_h > 1$ большинство значений $\Delta T_i > \Delta D_i, \Delta\nu_i > \Delta\varphi_{\text{ш},i}$, что свидетельствует о достоверности измерений на базе гироскопов.

На рис. 3, а, б, в представлены значения, которые принимают перечисленные величины в различных точках скважины n , а также значения абсолютных погрешностей азимутов, измеренных гироскопическим $\Delta\alpha_{\omega}$ и магнитометрическим $\Delta\alpha_h$ модулями при $\varepsilon_h = 4\%$.

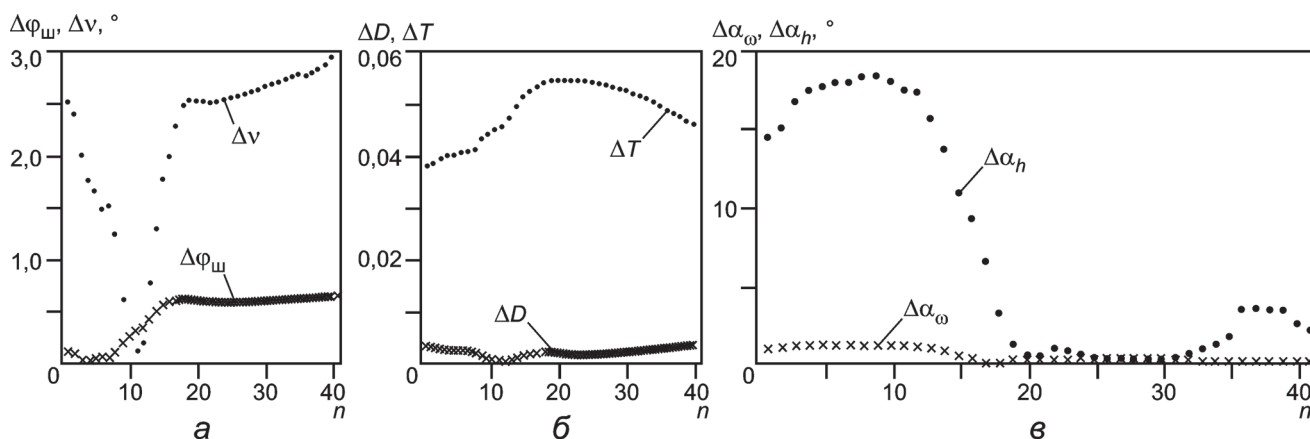


Рис. 3. Зависимости $(\Delta\varphi_{\text{ш}}, \Delta\nu)$, $(\Delta D, \Delta T)$, $(\alpha_{\omega}, \alpha_h)$ от положения n -й точки скважины при $\varepsilon_h = 4\%$ соответственно рис. а, б, в

Аналогичные результаты были получены при проведении виртуального эксперимента для других комбинаций широты и пространственных углов скважины.

В качестве еще одного критерия при условии $|\Delta\alpha| \leq 2$ целесообразно использовать пересечение интервалов:

$$\alpha \in \begin{cases} (\alpha_{\omega} - 2; \alpha_{\omega} + 2), \\ (\alpha_h - 2; \alpha_h + 2). \end{cases}$$

Алгоритм принятия решения реализуется следующим образом. В наземный блок поступают сигналы, измеренные скважинным модулем (D_j, T_j, A_j). Далее происходит расчет пространственных углов $\alpha_{\omega}, \alpha_h, \varphi, \theta$, а также широты месторождения $\varphi'_{\text{ш}}$ и угла магнитного наклона ν' . Затем рассчитывают отклонения $\Delta D, \Delta T$, абсолютные погрешности $\Delta\varphi_{\text{ш}}, \Delta\nu$. Следующий этап — выбор достоверного значения α из полученных $\alpha_{\omega}, \alpha_h$.

Тестирование предложенного алгоритма проводилось во всем диапазоне пространственных углов скважины при различных значениях ГМВ. Во время виртуального эксперимента было принято, что скважина проходит через участок, имеющий протяженность l , где магнитные аномалии создают одинаковое отклонение магнитного поля Земли от нормы на величину ε_h в каждой точке участка.

Анализ обработки результатов серии экспериментов показал, что на средних широтах ($56,05^\circ; 60,95^\circ; 63,2^\circ$) точность восстановления азимута увеличилась в 1—5,19 раза при ГМВ $\varepsilon_h \in [0,7; 3]$, на высоких широтах ($67,45^\circ; 70^\circ$) — в 1,27—7,68 раза в том же диапазоне ГМВ.

Таким образом, структурная избыточность ИС позволяет повысить ее надежность, проводить измерения в обсаженной стальными трубами и открытой скважинах, наряду с традиционной задачей пространственной ориентации нефтегазовых скважин выполнять поиск рудных полезных ископаемых с повышенной магнитной восприимчивостью, использовать ИС при строительстве различных подземных объектов. Применение первичных датчиков, чувствительных к различным физическим величинам, сокращает временные и эксплуатационные издержки при исследовании скважин.

Литература

1. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987.
2. Ковшов Г. Н., Алимбеков Р. И., Жибер А. В. Инклинометры. Основы теории и проектирования. Уфа: Гилем, 1998.
3. Иванова Г. А. Интегрированная измерительная инклинометрическая система // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 1 (54). С. 158—163.
4. А. с. 855200 СССР. Феррозондовый инклинометр / Б. Н. Запасный, Г. Н. Ковшов, А. И. Заико, А. А. Бакиров // Бюл. изобрет. 1981. № 2834976.
5. Биндер Я. И. Малогабаритные гироскопические инклинометры: проблемы, концепция развития, результаты разработок и внедрения // Гироскопия и навигация. 2006. № 3. С. 19—29.
6. Заико А. И., Иванова Г. А. Интегрированная измерительная система для подземной навигации на базе феррозондов, акселерометров и гироскопов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 6. С. 285—292. [Официальный сайт]: http://www.ogbus.ru/authors/ZaikoAI/ZaikoAI_1.pdf (дата обращения 27.03.2014 г.).
7. Пат. 2503810 РФ, МПК E21B 47/022. Способ определения углов искривления скважины / Заико А. И., Иванова Г. А. // Бюл. изобрет. 2014. № 1.
8. Заико А. И., Иванова Г. А. Измерительная инклинометрическая система для подземной навигации // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Труды науч.-практ. конф. Пенза: ПГУ, 2012. С. 195—199.
9. Терешин В. Г., Иванова Г. А. Критерии выбора гироскопических датчиков для инклинометрической системы // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 1. С. 152—158.
10. РД 153-39.0-072-01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах.
11. Алимбеков Р. И., Рогатых Н. П., Терешин В. Г. Построение инклинометрических комплексов с использованием инерциальных технологий // Вестник УГАТУ. 2002. № 2. С. 145—149.

Дата принятия 22.04.2014 г.