4. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация / В. И. Костюк, А. П. Гавриш, Л. С. Ямпольский, А. Г. Карлов. – К.: Высш шк. Главное издательство, 1985. – 359 с.

5. Робототехника / Под ред. Е. П. Попова, Е. И. Юревича. – М.: Машиностроение, 1984 – 288 с.

6. Френкель Г. Ю. Роботизация процессов в строительстве. – М.: Строиздат, 1987. – 173 с.

7. Дослідження технології монтажу бордюр них каменів за допомогою маніпуляторного обладнання/ Хмара. Л.А., І.А. Кулік, Ю.С. Пікуш, О.М. Боднар // Сб. науч. Тр.: Строительство. Материаловедение. Серия : Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. Вып. 57 – Дн-ск: ПГАСА, 2010. – С.90-94.

8. Хмара Л.А., Кулик И.А. Оптимизация выбора гидроцилиндров и расчета параметров рычажного гидромеханизма// "Строительные и дорожные машины", 1991, №6, С.19-21.

9. Хмара Л.А. Строительные манипуляторы и роботы. – Методические указания. – Днепропетровск: ДИСИ, 1993. – 385с.

УДК 622.23.24

И. В. РЫЖКОВ, канд. техн. наук, А. В. САДОВНИКОВА, канд. техн. наук,
А. А. ЛУКАШУК, аспирант.

Государственное высшее учебное заведение
«Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНКЛИНОМЕТРА

Актуальность проблемы. На современном этапе развития нефтедобывающей отрасли Украины, в связи со сложными экономическими условиями, оптимизация процесса бурения является актуальным вопросом. Для нашего региона характерны месторождения с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов, которые находятся на больших глубинах и в условиях магнитных аномалий. При строительстве наклонно-направленных и горизонтальных скважин необходимо создание оптимальной системы прокладки и повышения производительности. Таким образом, повышаются требования к точности контроля пространственного положения ствола наклонно-направленных и горизонтальных скважин с минимальными затратами временных и финансовых ресурсов.

В процессе бурения при прокладке скважины главной задачей является контроль за положением в пространстве оси ствола наклонно-направленной или горизонтальной скважины траектории скважины, с высокой точностью по заданным параметрам. Контроль, измерение и определение пространственных координат ствола скважины осуществляется с помощью специального устройства – инклинометра, состоящего из датчиков угла наклона – акселерометров и магниточувствительных датчиков - феррозондов.

В процессе измерений возникают погрешности инклинометра, которые зависят от температуры, давления, напряжения питания и магнитных аномалий.

Анализ публикаций. Анализ современных инклинометрических преобразователей показывает, что в основном в показаниях этих приборов учитываются погрешности вызванные температурой и давлением, напряжением питания, а погрешности вызванные магнитными аномалиями не достаточно изучены [1, 2, 3]. Компенсация таких ошибок устраняются конструктивными методами, что в свою очередь ведет к сложным и дорогостоящим конструкциям [4, 5].

Формирование цели и задачи. С целью повышения точности при определении параметров ствола скважины и сокращения стоимости системы поставлена задача разработки алгоритмического метода компенсации погрешностей инклинометра вызванных магнитными аномалиями.

Основная часть. В процессе бурения возникают погрешности инклинометрического устройства вызванные металлическими предметами, которые входят в состав буровой колонны и самого инклинометра, а также дополнительными магнитными полями. Магниточувствительные датчики инклинометра измеряют проекции магнитного поля Земли на их оси чувствительности, но также и искаженные дополнительные магнитные поля. Вследствие этого магнитный азимут, вычисленный по показаниям феррозондов, отличается от азимута, отсчитанного от магнитного меридиана Земли.

Предлагается дополнительные магнитные поля устранять посредством алгоритмической методики, позволяющей вычислить погрешность инклинометра в заданной точке бурения и устранить ее посредством учета в показаниях инклинометра.

Погрешность инклинометра вызванная дополнительными магнитными полями находим по формуле [6]:

$$\delta = \alpha - \alpha' . \qquad (1)$$

Предлагается представить погрешность инклинометра тригонометрическим полином третьего порядка [6]:

$$\delta(\alpha') = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\alpha' + b_1 \sin\alpha' + a_2 \cos 2\alpha' + b_2 \sin 2\alpha' + a_3 \cos 3\alpha' + b_3 \sin 3\alpha' . \qquad (2)$$

Для определения коэффициентов $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ уравнения (2) воспользуемся методом наименьших квадратов. Для этого составим функцию

$$\Phi(a_0,a_1,a_2,a_3,b_1,b_2,b_3)=$$

$$=\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]^2. \quad (3)$$

Тогда неизвестные параметры согласно методу наименьших квадратов [7] определяются из следующей системы уравнений,

$$\frac{\partial\Phi}{\partial a_0}=0;\ \ \frac{\partial\Phi}{\partial a_1}=0;\ \ \frac{\partial\Phi}{\partial b_1}=0;\ \ \frac{\partial\Phi}{\partial a_2}=0;\ \ \frac{\partial\Phi}{\partial b_2}=0;\ \frac{\partial\Phi}{\partial a_3}=0;\ \ \frac{\partial\Phi}{\partial b_3}=0, \quad (4)$$

где частные производные функции $\Phi(a_0,a_1,a_2,a_3,b_1,b_2,b_3)$ по неизвестным параметрам приравниваем к нулю.

В развернутой форме уравнения (4) запишутся так:

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]=0,\\
&\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]\cos\alpha_i'=0,\\
&\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]\sin\alpha_i'=0,\\
&\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]\cos2\alpha_i'=0,\\
&\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]\sin2\alpha_i'=0\\
&\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]\cos3\alpha_i'=0,\\
&\sum_{i=0}^{N}\left[\frac{a_0}{2}+a_1\cos\alpha_i'+b_1\sin\alpha_i'+a_2\cos2\alpha_i'+b_2\sin2\alpha_i'+a_3\cos3\alpha_i'+b_3\sin3\alpha_i'-\delta_i\right]\sin3\alpha_i'=0
\end{aligned}\right\}. \quad (5)$$

Для решения системы (5) введем следующие обозначения:

$$A_1=\sum_{i=0}^{N}\cos\alpha_i';\ A_2=\sum_{i=0}^{N}\sin\alpha_i';\ A_3=\sum_{i=0}^{N}\cos2\alpha_i';\ A_4=\sum_{i=0}^{N}\sin2\alpha_i';\ A_5=\sum_{i=0}^{N}\cos3\alpha_i';$$

$$A_6=\sum_{i=0}^{N}\sin3\alpha_i';\ A_7=\sum_{i=0}^{N}\cos^2\alpha_i';\ A_8=\sum_{i-0}^{N}\sin\alpha_i'\cos\alpha_i';\ A_9=\sum_{i=0}^{N}\cos2\alpha_i'\cos\alpha_i';$$

$$A_{10}=\sum_{i-0}^{N}\sin2\alpha_i'\cos\alpha_i';\ A_{11}=\sum_{i=0}^{N}\cos3\alpha_i'\cos\alpha_i';\ A_{12}=\sum_{i-0}^{N}\sin3\alpha_i'\cos\alpha_i';\ A_{13}=\sum_{i=0}^{N}\sin^2\alpha_i';$$

$$A_{14}=\sum_{i=0}^{N}\cos 2\alpha_i^{'}\sin\alpha_i^{'}\,;\; A_{15}\sum_{i=0}^{N}\sin 2\alpha_i^{'}\sin\alpha_i^{'}\,;\; A_{16}=\sum_{i=0}^{N}\cos 3\alpha_i^{'}\sin\alpha_i^{'}\,; \tag{6}$$

$$A_{17}\sum_{i=0}^{N}\sin 3\alpha_i^{'}\sin\alpha_i^{'}\,;\; A_{18}=\sum_{i=0}^{N}\cos^2 2\alpha_i^{'}\,;\; A_{19}=\sum_{i-0}^{N}\sin 2\alpha_i^{'}\cos 2\alpha_i^{'}\,;\; A_{20}=\sum_{i=0}^{N}\cos 3\alpha_i^{'}\cos 2\alpha_i^{'}\,;$$

$$A_{21}=\sum_{i-0}^{N}\sin 3\alpha_i^{'}\cos 2\alpha_i^{'};\; A_{22}=\sum_{i=0}^{N}\sin^2 2\alpha_i^{'};\;\; A_{23}=\sum_{i=0}^{N}\cos 3\alpha_i^{'}\sin 2\alpha_i^{'};$$

$$A_{24}\sum_{i=0}^{N}\sin 3\alpha_i^{'}\sin 2\alpha_i^{'}\,;\; A_{25}=\sum_{i=0}^{N}\cos^2 3\alpha_i^{'}\,;\; A_{26}=\sum_{i-0}^{N}\sin 3\alpha_i^{'}\cos 3\alpha_i^{'}\,;\; A_{27}=\sum_{i=0}^{N}\sin^2 3\alpha_i^{'}\,;$$

$$B_1=\sum_{i=0}^{N}\delta_i\,;\; B_2=\sum_{i=0}^{N}\delta_i\cos\alpha_i^{'}\,;\; B_3=\sum_{i=0}^{N}\delta_i\sin\alpha_i^{'}\,;\; B_4=\sum_{i=0}^{N}\delta_i\cos 2\alpha_i^{'}\,;\; B_5=\sum_{i=0}^{N}\delta_i\sin 2\alpha_i^{'}\,;$$

$$B_6=\sum_{i=0}^{N}\delta_i\cos 3\alpha_i^{'}\,;\; B_7=\sum_{i=0}^{N}\delta_i\sin 3\alpha_i^{'}\,.$$

Теперь с использованием обозначений (6) уравнения (5) примут форму:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{(N+1)}{2}a_0+A_1a_1+A_2b_1+A_3a_2+A_4b_2+A_5a_3+A_6b_3=B_1\\
&\frac{A_1}{2}a_0+A_7a_1+A_8b_1+A_9a_2+A_{10}b_2+A_{11}a_3+A_{12}b_3=B_2\\
&\frac{A_2}{2}a_0+A_8a_1+A_{13}b_1+A_{14}a_2+A_{15}b_2+A_{16}a_3+A_{17}b_3=B_3\\
&\frac{A_3}{2}a_0+A_9a_1+A_{14}b_1+A_{18}a_2+A_{19}b_2+A_{20}a_3+A_{21}b_3=B_4\\
&\frac{A_4}{2}a_0+A_{10}a_1+A_{15}b_1+A_{19}a_2+A_{22}b_2+A_{23}a_3+A_{24}b_3=B_5\\
&\frac{A_5}{2}a_0+A_{11}a_1+A_{16}b_1+A_{20}a_2+A_{23}b_2+A_{25}a_3+A_{26}b_3=B_6\\
&\frac{A_6}{2}a_0+A_{12}a_1+A_{17}b_1+A_{21}a_2+A_{24}b_2+A_{26}a_3+A_{27}b_3=B_7
\end{aligned}\right\}, \tag{7}$$

которая в матричном виде принимает форму

$$\mathrm{AX}=\mathrm{V}\,, \tag{8}$$

где
$$A=\begin{Vmatrix}
\frac{(N+1)}{2} & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6\\
\frac{A_1}{2} & A_7 & A_8 & A_9 & A_{10} & A_{11} & A_{12}\\
\frac{A_2}{2} & A_8 & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} & A_{17}\\
\frac{A_3}{2} & A_9 & A_{14} & A_{18} & A_{19} & A_{20} & A_{21}\\
\frac{A_4}{2} & A_{10} & A_{15} & A_{19} & A_{22} & A_{23} & A_{24}\\
\frac{A_5}{2} & A_{11} & A_{16} & A_{20} & A_{23} & A_{25} & A_{26}\\
\frac{A_6}{2} & A_{12} & A_{17} & A_{21} & A_{24} & A_{26} & A_{27}
\end{Vmatrix};\qquad
X=\begin{Vmatrix} a_0\\ a_1\\ b_1\\ a_2\\ b_2\\ a_3\\ b_3\end{Vmatrix};\qquad
V=\begin{Vmatrix} B_1\\ B_2\\ B_3\\ B_4\\ B_5\\ B_6\\ B_7\end{Vmatrix}. \tag{9}$$

Из матричного уравнения (8) следует, что матрица X искомых коэффициентов погрешности (2) находим из уравнения:

$$X = A^{-1}V, \qquad (10)$$

где A^{-1} есть матрица, обратная матрице А. Искомое уравнение погрешности представленной тригонометрическим полином третьего порядка (2) таково:

$$\delta(\alpha') = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\alpha' + b_1 \sin\alpha' + a_2 \cos 2\alpha' + b_2 \sin 2\alpha'. \qquad (11)$$

Угол с учетом компенсации погрешности находим по формуле:

$$\alpha'' = \alpha' + (-\delta(\alpha')). \qquad (12)$$

После компенсации погрешность вызванная магнитной аномалией находим по формуле:

$$\delta' = \alpha' - \alpha''. \qquad (13)$$

На основе данного метода были произведены лабораторные исследования.

При проведении эксперимента использовались три одноосных феррозонда и три одноосные акселерометра, в исходном положении оси акселерометров и феррозондов направлены параллельно осям:

OX - на магнитный Север;

OY – на Восток;

OZ выставлен по вертикали места и вниз к центру Земли.

Инклинометр устанавливали и закрепляли на поворотном столе относительно угла азимута на 30º и зенитного угла на 90º. Затем датчик поворачивали вокруг собственной оси в диапазоне от 0º до 360º с шагом 30º. Показания с феррозондов и акселерометров снимали без воздействия магнитной помехи и при внесении дополнительного магнитного поля. Результаты измерений сведены в таблицах.

В таблице 1 приведены показания трех акселерометров (G_X, G_Y, G_Z) и трех феррозондов (H_X, H_Y, H_Z), заданный (α) и вычисленный (α') угол азимута [1], для первого и второго эксперимента.

В таблице 2 приведены показания углов азимута заданного (α) и вычисленного (α'), погрешность инклинометра (δ и $\delta(\alpha')$)по формулам 1 и 2 , угол азимута с коррекцией (α'')и погрешность после компенсации (δ'), для первого и второго эксперимента.

В таблице 3 приведены коэффициенты погрешности инклинометра определенные методом наименьших квадратов, для первого и второго эксперимента.

Таблица 1.

Показания акселерометров и феррозондов, угла азимута заданного и вычисленного для первого эксперимента и второго эксперимента

Лимб	Первый эксперимент								Второй эксперимент							
	G_X	G_Y	G_Z	H_X	H_Y	H_Z	α	α'	G_X	G_Y	G_Z	H_X	H_Y	H_Z	α	α'
0º	-805	-18	0	-349	-72	109	30	30,5	-805	-3	-2	-320	-22	124	30	7,5
30º	-690	407	-1	-334	120	112	30	31	-689	411	-3	-306	166	126	30	5
60º	-395	698	-1	-230	269	114	30	30	-395	699	-3	-203	316	128	30	8
90º	20	804	0	-56	349	114	30	29,5	13	805	-2	-33	397	128	30	16,5
120º	417	693	0	124	331	113	30	29,5	426	685	0	155	379	129	30	28,5
150º	704	395	1	273	224	111	30	29,5	708	386	1	304	272	126	30	37
180º	806	-9	1	350	58	107	30	30	805	-16	2	381	107	124	30	42,5
210º	694	-408	2	332	-124	105	30	31,5	691	-412	3	363	-73	120	30	45,5
240º	409	-694	3	233	-270	103	30	32	395	-703	4	259	-225	119	30	43,5
270º	-6	-806	2	60	-352	103	30	32	-11	-807	2	92	-305	118	30	38
300º	-412	-696	2	-123	-334	104	30	31,5	-414	-695	1	-91	-290	119	30	28,5
330º	-702	-398	1	-274	-228	107	30	31	-701	-403	0	-242	-189	121	30	18

Таблица 2.

Показания угла азимута заданного, вычисленного и после коррекции, погрешностей вычисленных и после коррекции для первого эксперимента и второго эксперимента

Лимб	Первый эксперимент						Второй эксперимент					
	α	α'	δ	$\delta(\alpha')$	α''	δ'	α	α'	δ	$\delta(\alpha')$	α''	δ'
0º	30	30,5	-0,5	-0,8365	29,6635	0,3365	30	7,5	22,5	21,4895	28,9895	1,0105
30º	30	31	-1	-0,68393	30,31607	-0,31607	30	5	25	25,24272	30,24272	-0,24272
60º	30	30	0	-0,17655	29,82345	0,176552	30	8	22	21,80727	29,80727	0,192728
90º	30	29,5	0,5	0,3845	29,8845	0,1155	30	16,5	13,5	12,6915	29,1915	0,8085
120º	30	29,5	0,5	0,635404	30,1354	-0,1354	30	28,5	1,5	1,761996	30,262	-0,262
150º	30	29,5	0,5	0,460926	29,96093	0,039074	30	37	-7	-7,35872	29,64128	0,358718
180º	30	30	0	-0,2145	29,7855	0,2145	30	42,5	-12,5	-13,1045	29,3955	0,6045
210º	30	31,5	-1,5	-1,28403	30,21597	-0,21597	30	45,5	-15,5	-15,3584	30,14156	-0,14156
240º	30	32	-2	-2,1254	29,8746	0,125404	30	43,5	-13,5	-13,923	29,577	0,422996
270º	30	32	-2	-2,1035	29,8965	0,1035	30	38	-8	-8,3065	29,6935	0,3065
300º	30	31,5	-1,5	-1,43745	30,06255	-0,06255	30	28,5	1,5	1,123728	29,62373	0,376272
330º	30	31	-1	-0,92897	30,07103	-0,07103	30	18	12	12,24444	30,24444	-0,24444

Таблица 3.

Коэффициенты тригонометрического полинома третьего порядка, для метода наименьших квадратов

	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3
1 эксперимент	-1,385	-0,228	1,161	0,167	-0,433	-0,083	-0,083
2 эксперимент	6,385	17,38	10,499	1,2	1,443	-0,083	-0,083

Вывод. В процессе бурения возникает погрешность инклинометра, вызванная дополнительными магнитными аномалиями. Это приводит к существенным ошибкам в процессе бурения по заданной траектории. Компенсация таких ошибок конструкторскими методами достаточно сложная и удорожает инклинометрическое устройство. Таким образом предлагается погрешность компенсировать алгоритмическим методом. Приведенный метод заключается в том, что погрешность инклинометра выражаем тригонометрическим полином третьего порядка, а коэффициенты находим методом наименьших квадратов. Данный метод позволяет в десятки раз повысить точность измерений в процессе бурения и расширить диапазон применения данных приборов в условиях магнитных аномалий.

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. Ковшов Г.Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г.Н. Ковшов, Г.Ю. Коловертнов – Уфа: Издательство УГНТУ, 2001. – 228 с.
3. Романченко Л.А. Улучшение характеристик датчиков измерения слабых магнитных полей для систем управления: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 05.13.05 / Л.А.Романченко. – Саратов, 2007. – 17 с.
4. Гарейшин, З.Г. Совершенствование метрологического обеспечения инклинометрии нефтегазовых скважин: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 25.00.10 / З.Г. Гарейшин. – Уфа, 2006. – 24 с.
5. Гусев В.Г. Методы построения высокоточных электронных устройств преобразования информации: Учеб. Пособие. – Уфа: Гилем, 1998. – 380 с.
6. Лукашук Г.О. Метод визначення кута установки відхилювача / (тези доповідей X Міжнародної конф. "Контроль і управління в складних системах – 2010") [Електронний ресурс] / Лукашук Г.О., О.В. Садовникова // Перспективні методи і технічні засоби систем контролю і управління. – Вінниця, 2010. – С.74. – Режим доступу: http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/materials/subsection_2.1.pdf.
7. Бермант А. Ф. Краткий курс математического анализа: учебник для вузов / А. Ф. Бермант, И. Г. Араманович. – 12-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2005. – 736 с.