

Высокоточная градуировка феррозондовых магнитометров с использованием инклинометрических столов среднего класса точности

Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А., институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Создание в 70-х годах непрерывных трехкомпонентных скважинных магнитометров значительно расширило задачи, решаемые скважинной магнитометрией. Осуществление непрерывной записи значительно повысило разрешающую способность метода, что позволило применять скважинную магнитометрию и на слабомagnetных объектах. Это, в свою очередь, потребовало создания аппаратуры, обладающей большей чувствительностью и точностью измерений по сравнению с предыдущими разработками. В настоящее время наиболее перспективным является построение магнитометров на основе жестко закрепленных магнитометрических измерительных систем и использования новых систем определения их ориентации, в частности акселерометров. Повышение эффективности и метрологических характеристик такой аппаратуры осуществляется за счет программного обеспечения аппаратуры. Трехкомпонентный скважинный магнитометр-инклинометр МИ-3803, разработанный в лаборатории скважинной геофизики Института геофизики УрО РАН, построен на базе феррозондов и акселерометров АТ-1306, жестко закрепленных в корпусе скважинного снаряда. Применение акселерометров является одним из наиболее точных способов измерения зенитного угла и азимута скважины.

Разработанный прибор позволяет проводить непрерывные измерения магнитного азимута (A), зенитного (φ) и визирного (α) углов скважины, вертикальной (Z) и горизонтальной (H) составляющих вектора геомагнитного поля и величины магнитной восприимчивости (χ) за одну спуско-подъемную операцию.

Измерительные датчики образуют две взаимно ортогональные системы, установленные соосно между собой:

- 1) магнитные датчики (феррозонды) X , Y , Z для измерения составляющих геомагнитного поля;
- 2) гравитационные датчики (акселерометры) U_1 , U_2 , U_3 для определения ориентации феррозондов относительно плоскости наклона скважины.

Измеряемые сигналы с феррозондов и акселерометров функционально связаны с углами пространственной ориентации корпуса скважинного прибора: A , φ и α . Зенитный угол φ определяется как угол отклонения скважины от вертикали:

$$\alpha = \arctg \frac{U_2}{U_3}, \quad (1)$$

а визирный угол α — как угол поворота системы акселерометров относительно плоскости наклона скважины в данной точке:

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2}}{U_1}, \quad (2)$$

где U_1 — измеряемый сигнал с акселерометра, параллельного с осью скважинного прибора; U_2 , U_3 — измеряемые сигналы с акселерометров, расположенных в плоскости, перпендикулярной оси скважинного прибора.

Значения составляющих вектора геомагнитного поля Z , H , H_y вычисляются исходя из измеряемых сигналов с феррозондов Z_m , X_m , Y_m и ранее вычисленных углов φ и α :

$$\left. \begin{aligned} Z &= X_m \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi - Y_m \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi + Z_m \cdot \cos \varphi, \\ H_y &= X_m \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi + Y_m \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi + Z_m \cdot \sin \varphi, \\ H_x &= -X_m \cdot \sin \alpha + Y_m \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \right\} (3)$$

Тогда магнитный азимут скважины A вычисляется из отношения горизонтальных составляющих вектора геомагнитного поля:

$$A = \arctg \frac{H_y}{H_x}. \quad (4)$$

Алгоритмы вычислений составляющих вектора геомагнитного поля и угловых параметров (A , φ , α) скважины в вертикальной системе координат, привязанной к плоскости наклона скважины (1-4) справедливы только в случае идеального исполнения конструкции прибора, что на практике осуществить практически невозможно. В совокупности параметров, влияющих на точность измерений, особое место занимают факторы, обусловленные конструктивным исполнением прибора инструментальные погрешности, обусловленные, в первую очередь, отклонением осей чувствительности первичных преобразователей от осей опорного базиса прибора, из-за чего измеряемые значения могут существенно отличаться от истинных. Погрешности, характеризующие конструктивное исполнение аппаратуры являются систематическими для каждого конкретного прибора и вносят мультипликативные помехи в результаты измерений.

Исследования, направленные на изучение влияния инструментальных погрешностей на выходные параметры первичных преобразователей, привели к созданию программного обеспечения и методики настройки аппаратуры, позволяющей вычислить эти погрешности с точностью до десятых долей градуса и устранить их математическим путем. Использование алгоритмических методов позволило значительно повысить точность измерения составляющих геомагнитного поля, что особенно актуально при использовании скважинной магнитометрии на месторождения никеля, алмазов, золота и др.

В последние годы анализу инструментальных погрешностей инклинометров и методам их устранения было посвящено много разработок. Наиболее полно этот вопрос рассматривался Г.Н. Ковшовым [3] и Г.В. Миловзоровым [4] и Д.Г. Миловзоровым [5].

Для прибора МИ-3803 была разработана методика и программный модуль (рис.1), позволяющий за короткое время свести ошибки измерений, обусловленные этими погрешностями, к допустимым значениям при испытаниях в немагнитном поворотном инклинометрическом столе [1, 2]. Так как скважинная аппаратура для исследования разведочных скважин разрабатывается для производственных организаций, где, как правило, отсутствуют инклинометрические столы высокой точности, необходимые для настройки прибора по известным методикам, то преимуществами предлагаемой методики являются:

- простота в применении, которая не требует высокой квалификации настройщиков аппаратуры;
- использование инклинометрических столов любого класса точности;
- сложная математическая основа алгоритми-

ПОДБОР ПОПРАВКИ													
MI-3803	Z	X	Y	U1	U2	U3	Alt	F1	HOXY	HOZU3	Zp	Uip	
1557	2877	1021	4260	1416	1050	127	240	3034	1879	1303	4230		
1557	2880	1020	4260	1416	1050	127	239	3037	1878	1303	4231		
1557	2878	1020	4260	1416	1050	127	239	3035	1878	1303	4231		
1557	2878	1020	4270	1416	1050	127	239	3035	1878	1303	4231		
1557	2877	1020	4260	1417	1050	127	239	3034	1879	1303	4230		
1556	2878	1021	4270	1417	1050	127	240	3035	1880	1303	4231		
1556	2878	1021	4270	1419	1050	127	240	3035	1880	1303	4231		
1555	2879	1021	4270	1418	1050	127	240	3036	1880	1304	4232		
1556	2878	1021	4270	1417	1050	127	239	3035	1878	1303	4230		
1554	2879	1020	4270	1418	1050	127	239	3036	1879	1303	4230		
1555	2880	1022	4271	1418	1050	127	239	3037	1880	1303	4231		
1554	2879	1021	4271	1418	1050	127	239	3036	1880	1303	4231		
1555	2879	1021	4270	1417	1050	127	239	3036	1879	1303	4230		
1554	2879	1021	4271	1418	1050	127	239	3036	1880	1303	4231		
1555	2878	1021	4270	1419	1050	127	240	3035	1880	1303	4231		
1554	2878	1021	4270	1418	1050	127	240	3035	1880	1303	4231		
1555	2880	1022	4271	1418	1050	127	239	3037	1880	1303	4231		
1554	2878	1021	4270	1029	1058	136	207	3035	1602	1302	4199		

Рис. 1. Пример окна программы для подбора углов несоосности и неортогональности установки первичных преобразователей

ческой обработки данных.

Основным условием проведения настроечных работ является однородность магнитного поля в месте установки инклинометрического стола.

В идеальном случае оси чувствительности феррозондов X, Y, Z и акселерометров U1, U2, U3 направлены по осям базиса корпуса прибора и соосны между собой. На практике углы отклонения осей чувствительности первичных преобразователей от осей базиса прибора могут достигать 5° (рис. 2).

Суть методики определения инструментальных погрешностей заключается в том, что прибор последовательно ориентируется в пространстве так, чтобы вклад каждой соответствующей составляющей систем акселерометров или феррозондов принимал определенное значение, при котором влияние на них инструментальных погрешностей будет максимально (при определении углов несоосности и неортогональности осей первичных преобразователей) или, наоборот, ничтожно мало (при определении «нулей» и коэффициентов преобразования первичных преобразователей).

В процессе измерений происходит регистрация некоторых параметров $Z_{\text{м}}, X_{\text{м}}, Y_{\text{м}}, U1_{\text{м}}, U2_{\text{м}}, U3_{\text{м}}$. Для того чтобы привести их к истинным значениям, связанным с системой координат скважинного прибора, воспользуемся формулами преобразования прямоугольных координат. Тогда выходные параметры первичных преобразователей вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} U1 &= K1(U1_{\text{м}} - U1_0) - K2(U2_{\text{м}} - U2_0) \cdot \sin f1 - K3(U3_{\text{м}} - U3_0) \cdot \cos f1', \\ U2 &= K2(U2_{\text{м}} - U2_0) - K1(U1_{\text{м}} - U1_0) \cdot \sin f2, \\ U3 &= K3(U3_{\text{м}} - U3_0) - K1(U1_{\text{м}} - U1_0) \cdot \sin f3 - K2(U2_{\text{м}} - U2_0) \cdot \sin \gamma1; \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{м}} &= K_z(Z_{\text{м}} - Z_0) - K_x(X_{\text{м}} - X_0) \cdot \cos f4 - K_y(Y_{\text{м}} - Y_0) \cdot \sin f4', \\ X &= K_x(X_{\text{м}} - X_0) - K_z(Z_{\text{м}} - Z_0) \cdot \sin f5, \\ Y &= K_y(Y_{\text{м}} - Y_0) - K_z(Z_{\text{м}} - Z_0) \cdot \sin f6 - K_x(X_{\text{м}} - X_0) \cdot \sin \gamma2, \\ a &= a_{\text{м}} \pm 5a \end{aligned} \right\} (6)$$

где: $U1_{\text{м}}, U2_{\text{м}}, U3_{\text{м}}$ - сигналы, снимаемые с акселерометров; $X_{\text{м}}, Y_{\text{м}}, Z_{\text{м}}$ - сигналы, снимаемые с феррозондовых датчиков; $U1_0, U2_0, U3_0, X_0, Y_0, Z_0$ - смещение нулевого уровня сигналов первичных преобразователей; $K1, K2, K3, K_x, K_y, K_z$ - коэффициенты

передачи первичных преобразователей; $f1', f2, f3, f4', f4'', f5, f6, \gamma1, \gamma2$ - углы отклонений первичных преобразователей от базисов прибора; Δa - угол несоосности двух измерительных систем.

Определение «нулей» и коэффициентов преобразования акселерометров и феррозондов
 $U2_0$ и $U3_0$ «нули» акселерометров, расположенных ортогонально к оси скважинного прибора, определяются при горизонтальном расположении

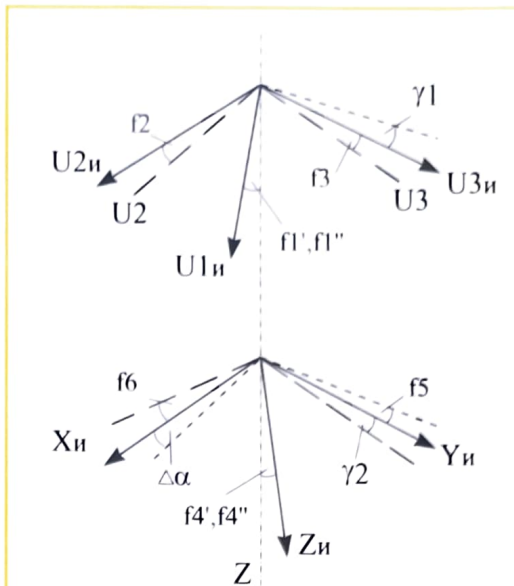


Рис. 2. Источники инструментальных погрешностей при изготовлении систем феррозондов и акселерометров:

$f1', f2'$ - углы между осью скважинного прибора и осью чувствительности акселерометра U1;
 $f2, f3$ - углы отклонения от ортогональности осей скважинного прибора и акселерометров U2, U3; $f4', f4''$ - углы между осью скважинного прибора и осью чувствительности феррозонда Z;
 $f5$ - угол отклонения от ортогональности осей скважинного прибора и феррозонда Y;
 $f6$ - угол отклонения от ортогональности осей скважинного прибора и феррозонда X;
 $g1$ - угол отклонения от ортогональности акселерометров U2, U3;
 $g2$ - угол отклонения от ортогональности феррозондов X, Y;
 Δa - угол между осями феррозонда X и акселерометра U₂.

оси скважинного прибора (зенитный угол $\varphi=90^\circ$) и его полной прокрутке по визирному углу с шагом 90° (рис.36).

При такой прокрутке выходное значение, снимаемое с акселерометра U2, расположенного по линии силы тяжести, т.е. вниз, будет максимально и положительно ($U2_{\text{макс}}$), в то время как показание ортогонального к нему акселерометра U3 будет близко к нулю, и наоборот. Значения, снимаемые с акселерометров, ориентированных вверх (против силы тяжести), будут максимально отрицательны ($U2_{\text{мин}}$, $U3_{\text{мин}}$). При этом искажения выходных параметров акселерометров U2 и U3, связанные с отклонением их осей от осей базиса прибора, практически не сказываются. Коэффициент преобразования осевого акселерометра условно принимаем за единицу, тогда за счет коэффициентов K2 и K3 приводим уровень выходных параметров акселерометров U2, U3 к выходному уровню акселерометра U1.

Для определения $U1_0$ смещения нуля акселерометра U1, соосного с осью скважинного прибора показания снимаются при вертикальном положении оси скважинного прибора. Максимально положительное значение $U1_{\text{макс}}$ соответствует положению прибора, когда осевой акселерометр направлен по направлению силы тяжести G (зенитный угол $\varphi=0^\circ$), и соответственно, максимально отрицательное значение $U1_{\text{мин}}$ снимается при ориентировании осевого акселерометра U1 против силы тяжести ($\varphi=180^\circ$). «Нули» акселерометров, установленных перпендикулярно оси скважинного прибора U2₀ и U3₀, определяются

ТЕХНОЛОГИЯ В ГЕОФИЗИКЕ

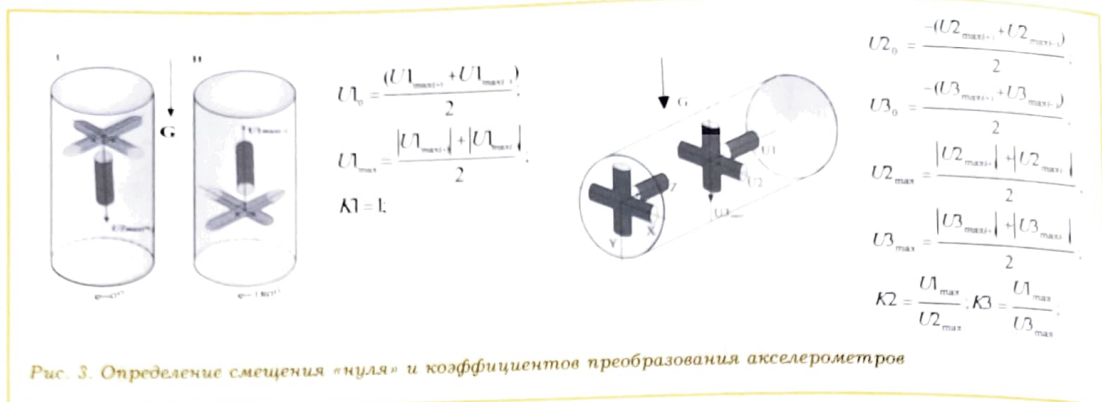


Рис. 3. Определение смещения «нуля» и коэффициентов преобразования акселерометров

при установке оси скважинного прибора перпендикулярно направлению вектора силы тяжести G и его полном повороте по визирному углу (рис. 3а).

«Нули» X_0 , Y_0 , феррозондов X, Y , соосных с акселерометрами $U2$, $U3$, определяются при установке оси скважинного прибора перпендикулярно направлению вектора геомагнитного поля и его полным повороте по визирному углу с шагом 90 (методика 4-х положений). Z_0 «нуль» осевого феррозонда Z определяется по аналогии с осевым акселерометром $U1$, но в данном случае прибор устанавливается по- и против направления вектора геомагнитного поля. Коэффициенты преобразования K_1 , K_2 , K_3 предварительно определяются при градуировке прибора в градуировочных кольцах, где за базисное значение принимается сигнал Z_0 . Затем коэффициенту K_1 присваиваем значение 1, а коэффициенты K_2 и K_3 приводим к коэффициенту K_1 .

Все полученные «нули» и коэффициенты преобразования вносим в корректирующий файл первичных поправок. На рис. 4 представлено распределение погрешностей измерения азимута (A) при полной прокрутке прибора МИ-3803 по визирному углу в зависимости от ввода поправок.

Определение углов несоосности и отклонения от ортогональности осей измерительных систем

После вычисления «нулей» и коэффициентов преобразования производится определение углов несоосности и отклонения от ортогонального положения измерительных систем с помощью программного модуля, входящего в состав программного обеспечения прибора, позволяющего путем полуавтоматического подбора определить значение углов $\Pi\delta$ с точностью до десятых долей угловых минут.

Все подобранные таким образом коэффициенты преобразования, «нули» и углы отклонения измерительных систем от осей базиса скважинного снаряда заносятся в корректирующий файл, который участвует при обработке измерений в рабочем режиме.

Измерение и расчет вторичных поправок

Расчет вторичных поправок производится по результатам эталонных измерений, которые проводятся при осевом вращении блоков первичных преобразователей в нормальном магнитном поле с жестким закреплением корпуса скважинного прибора в инклинометрическом столе. Измерения проводятся по определенной сетке. Дискретность измерений по зенитному углу составляет 5 или 10 в зависимости от технического задания прибора. Для каждого установленного угла производится полная прокрутка прибора по азимутальному углу через 30 для каждого значения азимута, дискретность изменения которого составляет 30. По азимуту также производится полный оборот прибора (0, 30, 60... 330).

Таким образом, для каждого зенитного угла создается 12 таблиц, соответствующих 12-ти азимутам, где записываются изменения парамет-

ров при полном обороте прибора вокруг своей оси с дискретностью 30. После записи всего массива данных производится расчет вторичных поправок исходя из функциональной независимости вычисленных физических параметров от осевого вращения скважинного снаряда. Таким образом, рассчитывается отклонение измеренных параметров от теоретических. При этом во всех формулах, используемых для расчета составляющих геомагнитного поля, используются все ранее вычисленные погрешности и коэффициенты, которые записаны в файлах первичных поправок. Результаты расчета записываются в таблицы вторичных поправок.

Методика ввода первичных и вторичных поправок в измеренные данные обеспечивает точность измерения составляющих геомагнитного поля в пределах ± 20 нТл.

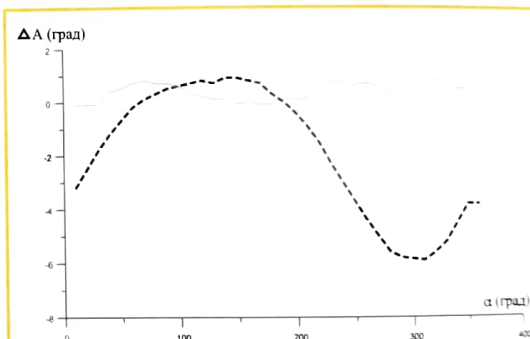


Рис. 4. Распределение погрешностей измерения азимута (ΔA) при повороте прибора по визирному углу:

- Расчет азимута без учета первичных поправок
- Расчет азимута с введением первичных поправок

Литература

1. Астраханцев Ю. Г., Белоглазова Н. А. Аппаратурно-программный комплекс для непрерывной инклинометрии нефтяных и газовых скважин // Практика приборостроения. 2003а. № 1.
2. Белоглазова Н. А. Программно-методические приемы повышения точности инклинометрических и магнитных измерений // Практика приборостроения. 2003. № 2. С. 68-71.
3. Ковшов Г. Н., Алимбеков Р. Н., Жибер А. В. Инклинометрия (Основы теории и проектирования). Уфа: Гилем, 1998. 380 с.
4. Милонов Д. Г. Анализ инструментальных погрешностей инклинометрических устройств. Уфа: Гилем, 1997. 184 с.
5. Милонов Д. Г. Информационно-измерительные системы контроля комплекса угловых параметров пространственной ориентации скважин и скважинных объектов. Автореф. дис. канд. тех. наук. Ижевский гос. тех. университет. Ижевск, 2005.