УДК 531.746:550.8.08

В. Н. Ситников, А. Б. Королев, И. В. Гринев
ООО «Нефтегазгеофизика»

MERA: ИННОВАЦИОННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИНКЛИНОМЕТРОВ

Представлена программа, реализующая гибридный метод градуировки с анализом нелинейности первичных преобразователей. Программа основана на системном подходе к повышению точности налаживаемых датчиков, в связи с чем имеет ряд преимуществ перед стандартными программами того же профиля. MERA осуществляет контроль над параметрами датчика и установки, а также за состоянием среды, в которой проходят измерения. Кроме того, программа позволяет повысить класс точности используемой калибровочной установки и имеет ряд новшеств, призванных упростить работу и сделать ее более стабильной и быстрой.

Ключевые слова: инклинометр, градуировка, поверка, калибровочная установка, программное обеспечение, системный подход.

Введение

В условиях повышающихся требований к точности проводки скважин и привязки пластов закономерно возрастают требования к точности используемой навигационной аппаратуры. В то же время точность навигационной аппаратуры в значительной степени зависит от используемого для ее наладки аппаратурного и программного обеспечения.

К настоящему времени накоплено большое количество аппаратурных и программных средств повышения точности магнитометрических инклинометров. К ним можно отнести изготовление калибровочных установок с высокой точностью воспроизведения углов [3], разработку более совершенных методов калибровки, в том числе не требующих точного воспроизведения углов во время калибровки [5, 9, 11], учет флуктуаций и неоднородности измеряемого магнитного поля [1, 4, 6], использование интернет-сервисов для учета состояния геомагнитного поля (ГМП) [2] и т. п.

Перечисленные средства и меры, используемые вместе с программой калибровки, могут быть систематизированы и автоматизированы

для минимизации погрешности инклинометрического датчика, а также для увеличения удобства и скорости проведения наладочных работ. Данная задача может быть решена с использованием системного подхода, развиваемого авторами в работе [7]. В рамках системного подхода искомая программа должна «взаимодействовать» не только с датчиком и оператором, но и со средой, в которой проводятся наладочные работы, с установкой, а также с режимом эксплуатации датчика и установки. Данный подход был применен авторами к описанной задаче и воплощен в инновационной программе для калибровки магнитометрических инклинометров MERA.

Системный подход к созданию программы калибровки

При создании стандартных программ калибровки неявным образом рассматривается минимальная система, включающая инклинометрический датчик и программу калибровки (рис. 1*а*). В редких случаях рассматривается более полная система, включающая обратную связь с установкой, и взаимодействие с магнитометром [4] или специализированными интернет-сервисами [2]. Отдельно стоит отметить автоматизированные установки [10], которые представлены крайне малым числом малосерийных устройств и не используются в большинстве метрологических лабораторий.

Система, представленная на рис. 1*а,* ограничена и может быть в значительной степени расширена за счет внесения основных элементов, влияющих на точность наладки инклинометрических датчиков. Этими элементами, помимо датчика, являются:

– инклинометрическая установка;

– физическая среда, в которой проводятся работы;

– оператор, проводящий наладочные работы;

– эксплуатация, под которой подразумеваются действия оператора над датчиком, установкой и программой.

Кроме того, в рамках системы должны быть введены средства анализа среды (сеть Интернет – для получения данных от глобальной сети геомагнитных обсерваторий и векторный магнитометр), а также презентер, позволяющий управлять программой дистанционно. Взаимодействие компонентов расширенной системы приведено на рис. 1*б*.

Рис. 1. Схема взаимодействия программы калибровки, оператора и аппаратурных средств: *а* – классическая схема; *б* – в случае использования программы MERA.

Данные от каждого из элементов системы поступают в программу MERA.

1. Датчик передает данные об эксплуатации установки через расчетные значения выставленных углов. Программа калибровки осуществляет обратную связь с оператором относительно его действий (контроль действий оператора на рис. 1*б*). Данная связь осуществляется через интерфейс программы путем указания на ошибки выставления углов, а также внешние возмущения при сборе данных (критические магнитные или вибрационные помехи). Кроме того, значения углов корректируются при помощи девиационных таблиц установки [8], записанных в программе.

2. Сеть Интернет осуществляет связь с сетью геомагнитных обсерваторий и дает информацию о глобальной геомагнитной обстановке.

3. Векторный магнитометр соединяется с программой и передает данные о естественных и техногенных флуктуациях магнитного поля в лаборатории.

4. Презентер ускоряет взаимодействие между оператором и программой.

Далее более подробно рассмотрены используемые компоненты системы и связанные с ними меры, примененные в программе.

Инклинометрический датчик

Высокая точность геометрической градуировки:

– используемый метод позволяет достичь высокой точности измерений зенитного, визирного углов, азимута и магнитного визира: 0,08, 0,8, 0,8 и 0,8 *град* соответственно. Такая точность достигается как за счет алгоритма поиска глобального минимума для набора данных для градуировки, так и за счет поиска нелинейности преобразователей.

Примечание: метод полной полевой калибровки [11], метод итерационного варьирования [9], гибридный метод [5] – неклассические методы калибровки, развиваемые с 1980-х годов. Общим местом данных методов является отсутствие прямых измерений величины, по которой производится наладка. В то же время под «калибровкой» подразумевается использование метода прямых измерений, что не позволяет применить данный термин к описанным выше неклассическим методам. Разрабатываемый авторами гибридный метод, включающий неклассический метод для акселерометров и метод

прямых измерений для магнитометров, в данной работе используется под термином «градуировка».

Вспомогательные настройки и данные:

– возможность просмотра и изменения внутренних параметров датчика, включая значение внутреннего фильтра;

– полный доступ к паспорту, градуировочным коэффициентам, а также к архиву паспортов и градуировочных коэффициентов.

Калибровочная установка

Требования к калибровочной установке и выставлению углов:

– отсутствие высоких требований к выставлению нуля лимба азимута установки (по буссоли возможна точность выставления не выше 15 *мин*, точность программного вычисления сдвига в MERA – 2 *мин*);

– отсутствие жестких требований к калибровочной установке по зенитному и визирному углам, а также к их оборудованию: не нужны средства точного выставления угла, высокоточные фиксирующие устройства.

Повышение класса точности калибровочной установки:

– способ повышения класса используемой установки с применением девиационных таблиц лимбов установки [8] (в реальных условиях нередко используются устаревшие калибровочные установки с недостаточными точностями). Стоит отметить, что данный метод применим не только к устаревшим, но и к любым установкам с погрешностью воспроизведения углов больше 1 *мин*;

– поиск отклонения нуля лимба азимута установки при помощи специального встроенного в программу алгоритма. Возможность использования найденного значения при поверке, а также при настройке установки;

– учет суточных вариаций склонения магнитного поля во время поверки.

Физическая среда

Контроль рабочей среды:

– система контроля геомагнитной обстановки. Предупреждение в случае Kp-индекса больше 3. Доступ к прогнозу геомагнитной обстановки и годовым изменениям параметров геомагнитного поля (ГМП);

– возможность подключения векторного магнитометра [4, 6] как для анализа суточных вариаций ГМП, так и для мониторинга техногенных возмущений;

– контроль гравитационного поля (ударов и вибраций) по анализу разброса данных в снятом кадре.

Примечание: контроль неоднородности магнитного поля [4] при использовании адаптера необходимой длины не требуется в связи с тем, что магнитометры датчика помещаются в точку пересечения осей калибровочной установки. Данная мера оптимально подходит для магниторезистивных датчиков, которые занимают очень небольшой объем в пространстве. В случае использования ферромагнитных датчиков в точку пересечения осей устанавливается середина триады магнитометров.

Эксплуатация установки, датчика и программы

Контроль процессов градуировки и поверки:

– контроль правильности заданных (оператором) углов при градуировке;

– контроль заданных углов при поверке;

– вывод предварительных результатов градуировки;

– сохранение протоколов поверки вместе с первичными данными позволяет не проводить повторный сбор данных в том случае, если их погрешности превышают в некоторых положениях установленные пределы. Данные во время поверки снимаются до конца, а после новой градуировки проводится их пересчет по сохраненным значениям;

– регулировка времени сбора данных в кадре (усреднение данных);

– настройка программного фильтра.

Оптимизация рабочих процессов:

– оптимальный порядок сбора данных при градуировке;

– оптимальный порядок сбора данных при поверке;

– оптимизация порядка сбора данных при градуировке на установке с зенитными углами до 120 *град* (УПИ-1, УПИ-3, УПН-1, УКИ-3 и др.);

– использование презентера, который значительно ускоряет процесс сбора данных при градуировке и поверке.

Вспомогательная информация:

– вывод значений углов, а также расчетных модуля и наклонения ГМП;

– вывод (в отдельном окне) ошибок при поверке, что облегчает визуальный анализ данных величин на расстоянии.

Иные новшества

Унификация:

– четыре варианта поверки: полный и короткий; с поверкой магнитного визира и без нее;

– возможность градуировки разных типов датчиков: нет жесткой привязки к датчику, может проводиться градуировка магнитометрических инклинометров БДИ-32, БДИ-33 и других при условии соответствующей подстройки программы;

– разные режимы сбора данных для установок с диапазонами воспроизведения зенитных углов 0–180 и 0–120 *град*.

Для апостериорной обработки данных: запись в список градуировочных коэффициентов средних модуля и наклонения ГМП, которые используются при контроле качества измерений, а также для расчета влияния поля колонны и/или сборки приборов.

Результаты

Результаты использования программы MERA для градуировки инклинометрических датчиков БДИ-32 приведены на рис. 2. На рис. 2*а* и 2*б* область 1 соответствует случаю градуировки и поверки по минимальной схеме (рис. 1*а*), область 2 соответствует случаю использования всех перечисленных в работе мер, а область 3 – использованию всех мер, но со снижением у датчика шумов первичных преобразователей гравитационного поля за счет иного способа внутренней фильтрации и большего времени усреднения данных в программе. В итоге по зенитному углу максимальная абсолютная погрешность не превышала 0,08 *град*, а по азимуту – 0,78 *град*.

Таким образом, использование программы MERA позволило повысить точность измерения зенитного угла и азимута более чем на 30% (рис. 3*а* и 3*б*). Кроме того, используемые меры позволили на 40% сократить время проведения наладочных работ (рис. 4). Данные на рис. 3, 4 рассчитывались для датчика БДИ-32 и установки УГИ-1 с близкими к УНЭИИП-2М [1] показателями точности.

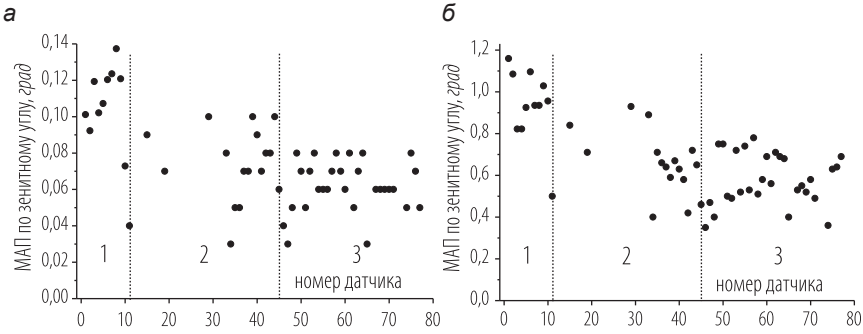

Рис. 2. Максимальная абсолютная погрешность (МАП) датчиков, налаженных при помощи программы MERA: *а* – по зенитному углу; *б* – по азимуту (в диапазоне зенитных углов от 6 до 174 *град*); *1* – с использованием только расчетного ядра MERA; *2* – с использованием MERA в полном объеме; *3* – с использованием MERA с малыми шумами первичных преобразователей гравитационного поля

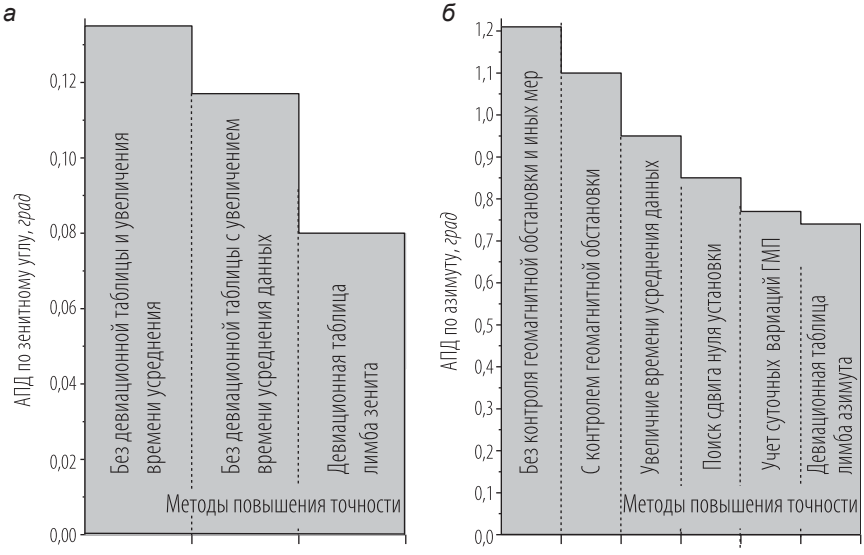

Рис. 3. Влияние на абсолютную допускаемую погрешность (АДП) методов из программы MERA: *а* – для зенитного угла; *б* – для азимута

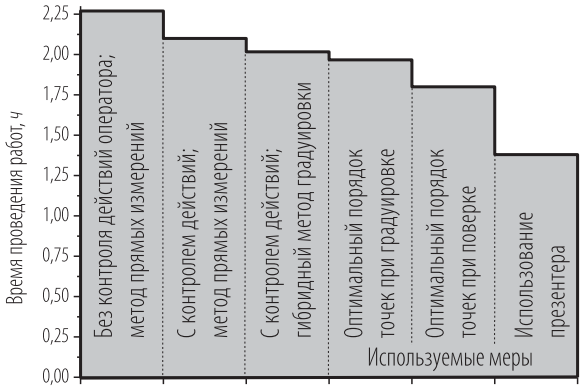

Рис. 4. Время проведения наладочных работ (градуировка и поверка)

Выводы

Показано, что разработанная на базе ООО «Нефтегазгеофизика» программа для калибровки магнитометрических инклинометров MERA по числу и системности используемых решений является в своем классе инновационной.

Стоит отметить, что современный этап развития программы нельзя считать окончательным. Так, перспективными улучшениями являются:

– совмещение с программой температурной наладки. Повышение точности температурных зависимостей сигналов первичных преобразователей благодаря учету вариаций ГМП, входящих в зависимости и снятых векторным магнитометром, располагающимся в лаборатории;

– добавление модели регулярных суточных вариаций ГМП в зависимости от координат места проведения наладочных работ. Данная мера необходима при отсутствии векторного магнитометра в метрологической лаборатории;

– использование калибровочной установки не с лимбами, а с абсолютными емкостными энкодерами угла поворота. Напомним, что использование энкодеров способно еще в два раза повысить точность налаживаемых инклинометров по зенитному углу, а также существенно сократить время проведения наладочных работ в связи с тем, что не потребуется точное выставление положений – значения угла будут считываться с энкодера;

– дополнительные калибровки модуля и угла наклонения ГМП для расчета их с большей точностью, что необходимо для контроля данных во время бурения или каротажа, а также при апостериорной обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воробьев А. В., Шакирова Г. Р., Иванова Г. А.* Исследование и анализ естественных факторов, воздействующих на метрологические характеристики магнитометрических инклинометров // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 1 (67). С. 107–115.
2. *Воробьев А. В., Воробьева Г. Р.* Применение геоинформационных систем для мониторинга и аналитического контроля параметров космической погоды, геомагнитного поля и его вариаций // Информация и космос. 2016. № 1. С. 115–122.
3. *Гарейшин З. Г.* Концептуальные вопросы компоновки метрологических установок пространственной ориентации скважинной инклинометрической аппаратуры // Нефтегазовое дело. 2006. Вып. 2. С. 1–33.
4. *Гарейшин З. Г.* Совершенствование метрологического обеспечения инклинометрии нефтегазовых скважин. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Уфа: НПФ «Геофизика», 2006. 24 с.
5. *Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н.* Гибридный метод градуировки инклинометрических датчиков // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2018. Вып. 9 (291). С. 62–73.
6. *Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н., Тихомиров А. Н.* Мониторинг вариаций геомагнитного поля с целью комплексного уточнения инклинометрических измерений // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. № 9 (267). С. 172–185.
7. *Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н.* Системная интеграция мер по повышению точности измерений магнитометрическими инклинометрами // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2021. Вып. 6 (312). С. 176–186.
8. *Гринев И. В., Ситников В. Н., Королев А. Б.* Программное использование таблиц девиации установки для калибровки инклинометров // Нанотехнологии: наука и производство. 2023. № 3. С. 8–11.
9. *Редькина Т. А., Миловзоров Д. Г., Садрутдинов Р. Р., Морозова Е. С.* Метод итерационного варьирования констант в трехкомпонентных векторно-измерительных преобразователях // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 138–143.
10. «Урал-Гео» – Центр метрологических исследований [Электронный ресурс]: УАК-СИ-АЗВ: установка для автоматизированной калибровки скважинных инклинометров. URL: https://www.uralgeo.com/uak-si-azv.
11. *Estes R., Walters P.* Improvement of Azimuth Accuracy by Use of Iterative Total Field Calibration Technique and Compensation for System Environment Effects // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 8–11 October, San Antonio, Texas, 1989.

Рецензент доктор техн. наук, проф. В. М. Лобанков