

Г. А. Иванова

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Предложена схема комплексного использования магнитометрических и гироскопических модулей, позволяющая расширить функциональные возможности, повысить точность и надежность измерительной системы. *Системы подземной навигации; магнитометрические, гироскопические инклинометрические системы*

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК), и в особенности его нефтегазовый сектор, играет важную роль в экономике нашей страны. Разработка нефтяных, газовых и рудных месторождений в тяжелых климатических условиях, уменьшение потерь на различных стадиях работы, сокращение расходов и увеличение качества продукции требуют ускорения развития научно-технического прогресса и совершенствования приборной базы [1].

В условиях интенсивного развития наклонно-направленного и горизонтального бурения все больше возрастают требования к точности определения пространственного положения оси ствола скважины.

Современная задача подземной ориентации решается при помощи инклинометрических систем (ИС), представляющих собой информационно-измерительный комплекс, состоящий из технических средств, методического и математического обеспечения [2].

В статье рассмотрены варианты реализации интегрированной инклинометрической системы, позволяющие проводить измерения в обсаженных и не обсаженных скважинах, повысить надежность измерительной системы за счет совместного применения феррозондов, акселерометров и гироскопов. С целью повышения точности инклинометрической системы предложена процедура начальной оценки погрешности измерений, а также компенсация дрейфа гироскопических датчиков с привлечением информации от спутниковых навигационных систем.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Классификация ИС представляет собой многоуровневую систему. По принципу возможности совмещения с процессом бурения ИС делят на забойные и промерочные. Первые

встраивают в бурильную колонну и используют для контроля пространственного положения в процессе бурения. Вторые применяют для измерения уже пробуренных участков скважин, или коррекции траектории при остановке бурения. В рамках данной статьи рассматриваются промерочные ИС.

По принципу работы датчика азимута принято различать магнитометрические и гироскопические инклинометры [2].

В магнитометрических инклинометрах (МИ) в качестве датчика азимута используют феррозонды, измеряющие проекции напряженности магнитного поля Земли. В гироскопических инклинометрах (ГИ) – датчики угловых скоростей (ДУС), измеряющие проекции угловой скорости Земли на оси, связанные с корпусом прибора. Современные МИ получили большее распространение благодаря высокой вибра- и ударостойкости, приемлемой стоимости и возможности работы в широком диапазоне температур. Однако точность измерения азимута МИ существенно зависит от наличия намагниченных масс – бурильных труб, обсадных колонн и т. д.

Необходимость определения параметров ориентации скважин, пробуренных в средах с аномальными магнитными свойствами, обсаженных стальными трубами, при восстановлении старых месторождений, при исследовании рудных скважин, контроле трубопроводов, проложенных в труднодоступных местах, и строительстве различных подземных объектов приводит к целесообразности применения гироскопических инклинометров. Из недостатков ГИ следует отметить более высокую стоимость и габариты чем у МИ. При измерении азимута в таких системах необходимо учитывать величину накапливающейся ошибки ДУС (дрейфа гироскопов).

Из зарубежных фирм производителей МИ и ГИ можно отметить Sperry Sun (Великобрита-

ния), Azinbee (Франция), Smith international (США), Gyrodata (США), Фирма SEG (Германия).

Известны также отечественные разработки ИС, выполняемые в рамках научных школ и коллективов: ООО «Тренд» (г. Миасс), ОАО НПФ «Геофизика» (г. Уфа), ООО «Аркон» (г. Арзамас), НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (г. Москва), ОАО «Арзамаское научно-производственное предприятие «Темп-Авиа» (г. Арзамас), НИИ «Пилот» (г. Уфа), НПП Азимут (Украина), ЦНИИ «Электроприбор» (г. Санкт - Петербург) и др.

Анализ отечественных и зарубежных работ, отражающих вопросы создания МИ показывает, что наиболее перспективным направлением является построение скважного прибора на основе трех ортогональных феррозондов и акселерометров неподвижно закрепленных относительно корпуса.

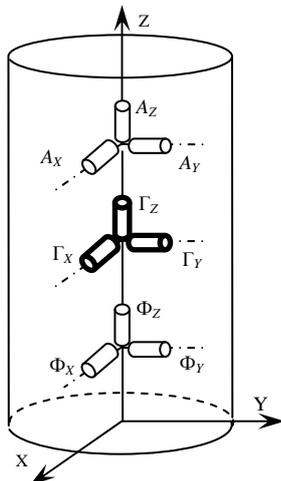


Рис. 1. Компонновка первичных датчиков в скважном модуле ИС

В отечественных и зарубежных ГИ нашли наибольшее применение динамически настраиваемые (ДНГ) и поплавковые гироскопы. Одно из направлений дальнейшего развития ГИ связано с возможностью включения в скважный модуль современных гироскопов, построенных на различных физических принципах: волоконно-оптических (ВОГ), волновых твердотельных (ВТГ) и микромеханических гироскопов.

С целью обоснования вышесказанного в работах [3, 4] рассматривалось влияние относительной погрешности масштабного коэффициента и величины случайного дрейфа ДУС на точность определения азимута. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования в измерительном модуле приборов, относительная погрешность масштабного коэф-

фициента и случайный дрейф которых не превышает 5 % и 0,4 град/час соответственно. Таки образом, был сделан вывод о перспективности использования в качестве датчиков азимута ВОГ и ВТГ.

Следует отметить, что высокоточные гироскопические датчики обладают достаточно большими габаритами и стоимостью. Например, ВОГ инерциального класса точности с величиной дрейфа 0,01 град/час имеют диаметр катушки от 100 мм и выше. Диаметр ВОГ среднего класса точности, удовлетворяющих по точности требованиям, предъявляемым ИС, составляет от 50 мм и выше. При этом стоимость датчиков составляет от 100 тыс. руб. и выше. По этой причине, как было отмечено ранее, ГИ проигрывают МИ по таким показателям как стоимость и габариты.

На сегодняшний день намечаются тенденции к комплексному использованию МИ и ГИ. Справедливо ожидать, что две системы, обладающие ошибками разного характера, при совместном применении будут дополнять и корректировать друг друга.

Таким образом, цель представленной работы заключалась в следующем: предложить универсальную инклинометрическую систему на базе гироскопических, грави- и магнитометрических модулей, позволяющую проводить измерения в обсаженных и открытых скважинах, повысить надежность подземных измерительных систем.

2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИС И ИХ НЕДОСТАТКИ

Первые упоминания о так называемых гибридных или интегрированных ИС можно встретить в работах [5, 6], где рассматривается возможность алгоритмического и аппаратного резервирования ИС при совместном использовании разных типов первичных датчиков.

В работе [6] за основу берется упомянутая выше схема магнитометрической инклинометрической системы на основе триады ортогональных феррозондов и акселерометров и дополняется триадой гироскопов (рис. 1).

Фактически в схеме блок гироскопических датчиков используется для измерения географического азимута при спуске в обсаженную скважину, после чего блок отключается, и измерение азимута ведется при помощи блока феррозондов.

Недостаток предложенной ИС заключается в следующем. Включение в состав измеритель-

ного модуля трех или двух одноосных гироскопических датчиков (ДНГ, ВОГ, ВТГ) приводит к увеличению стоимости и габаритов системы, что в свою очередь ограничивает возможность применения ИС при бурении скважин малого диаметра (38–42 мм). Использование же точных и дорогостоящих гироскопов только на начальном этапе измерений (при спуске в обсаженную скважину) нерационально с экономической точки зрения.

Количественная оценка увеличения стоимости МИ при условии внедрения в его состав гироскопических датчиков приводит к следующим результатам. При средней стоимости МИ 500 тыс. руб., включение в состав гироскопов средней точности вызовет увеличение стоимости измерительного блока на 30–50 %.

Принимая во внимание все вышесказанное, сделан вывод о продуктивности использования блока гироскопических датчиков на всем этапе работы с целью расширения возможных областей применения ИС и реализации резервирования измерительной системы. В свою очередь, при использовании в составе измерительного модуля точных гироскопических датчиков, правильнее говорить о резервировании ГИ магнитометрическим модулем. В этом случае помимо основной задачи определения пространственной ориентации нефтяных и газовых скважин можно предложить использовать интегрированную ИС для решения геологических задач. Например, осуществлять поиск полезных ископаемых, фиксируя наличие объектов повышенной магнитной восприимчивости.

3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИС

Принцип работы предлагаемой интегрированной ИС следующий. Скважный модуль устанавливается в устье скважины. Проекция напряженности магнитного поля Земли, ускорения свободного падения и угловой скорости Земли, измеренные соответственно феррозондами, акселерометрами и гироскопами поступают на коммутатор (рис. 2). Далее происходит преобразование аналоговых сигналов в цифровой вид в АЦП и передача в наземное устройство (рис. 2, 3). В наземном устройстве происходит вычисление углов ориентации по формулам:

$$\alpha_{\omega} = \text{Arctg} \left[\frac{(D_1 A_2 - D_2 A_1) \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{A_3 (D_1 A_1 + D_2 A_2 + D_3 A_3) - D_3 (A_1^2 + A_2^2 + A_3^2)} \right],$$

$$\alpha_h = \text{Arctg} \left[\frac{(H_1 A_2 - H_2 A_1) \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{A_3 (H_1 A_1 + H_2 A_2 + H_3 A_3) - H_3 (A_1^2 + A_2^2 + A_3^2)} \right] + d,$$

$$\theta = \text{arctg} \left[\frac{1}{A_3} \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \right], \quad \varphi = \text{arctg} \left(-\frac{A_2}{A_1} \right),$$

$$\nu = \arcsin \left[\frac{H_1 A_1 + H_2 A_2 + H_3 A_3}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2}} \right], \quad (1)$$

где α_{ω} , α_h – азимут, рассчитанный соответственно по сигналам с гироскопов и феррозондов, θ – зенитный угол, φ – визирный угол, d – угол магнитного склонения, ν – угол магнитного наклона, A_i , H_i , D_i – сигналы с акселерометров, феррозондов и гироскопов.

В запоминающем устройстве фиксируются полученные опорные значения углов ν и d (рис. 3).

В процессе измерений сигналы с блока феррозондов, гироскопов и акселерометров, через коммутатор поступают в АЦП и далее через блок связи по каналу связи передаются в блок приема и дешифрации информации (рис. 2). Обработанная информация поступает на вход блока обработки информации. Показания с первичных датчиков после коррекции поступают в вычислитель (рис. 3). Здесь происходит расчет углов ориентации и углов ν и d по формулам (1). Далее полученные значения передаются в блок сравнения, где сравниваются с опорными значениями, хранящимися в запоминающем устройстве (рис. 3). В процессе измерений в необсаженной скважине рассчитанные углы ν и d совпадают с опорными или величина расхождения не превышает допустимое значение, и в результате сравнения на экран оператора выводится значение азимута, рассчитанное по результатам измерений феррозондов и акселерометров.

В обратном случае на экране оператора отображается значение азимута, рассчитанное по результатам измерений гироскопических датчиков и акселерометров.

Интеграция гироскопических датчиков в МИ с целью работоспособности последней при спуске в обсаженную скважину (для случаев кратковременной неработоспособности феррозондов) обоснована только в том случае, если в качестве ДУС используются дешевые и малогабаритные гироскопы, к примеру – микромеханические гироскопы (ММГ).

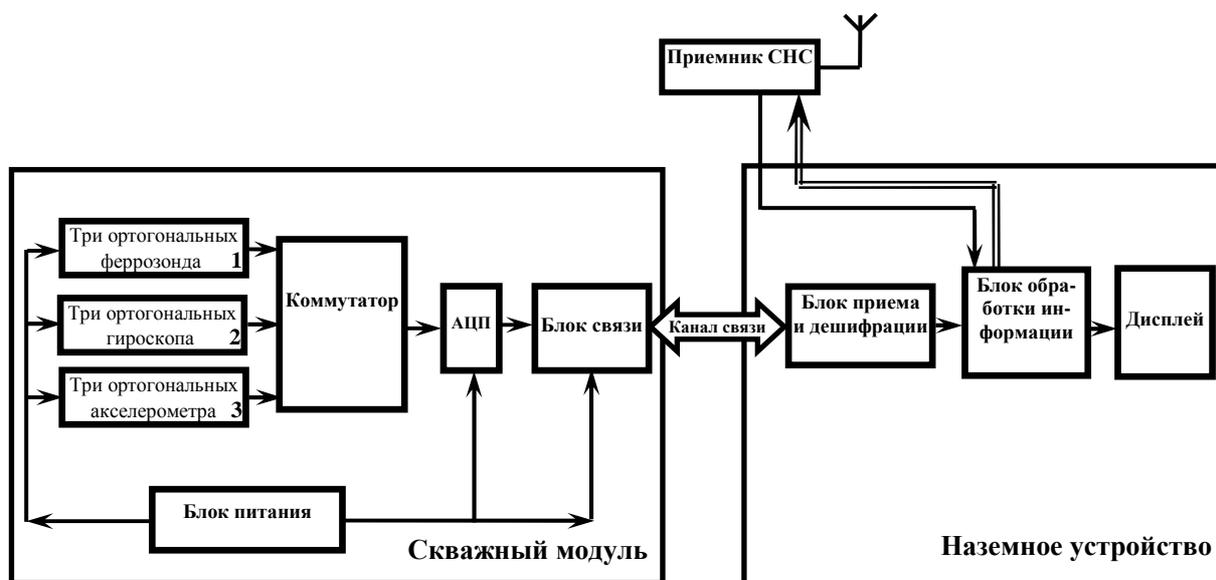


Рис. 2. Структурная схема интегрированной инклинометрической системы

ММГ были разработаны для применения в устройствах, где время автономной работы ДУС достаточно мало, поскольку дрейф этих гироскопов составляет порядка 10 град/час. Однако ММГ обладают рядом преимуществ перед другими типами ДУС, такими как: малые габариты и масса, низкое энергопотребление, устойчивость к ударам и вибрациям, надежность, низкая стоимость. На сегодняшний день ММГ активно применяют для решения задач навигации различных объектов. Перечисленные факторы позволяют говорить о перспективности включения ММГ в состав ИС.

Таким образом, можно предложить еще один вариант интегрированной ИС на базе феррозондов, акселерометров и ММГ. В этом случае блок ММГ выполняет резервную функцию и позволяет измерять азимут при временной неработоспособности блока феррозондов, т. е. при спуске в обсаженную скважину или в случае прохождения участка с магнитными аномалиями.

Для уменьшения величины дрейфа ММГ и обеспечения требуемой точности в схеме реализованы операции начальной оценки погрешности и последующая коррекция гироскопических датчиков. Оценить начальное состояние погрешностей ММГ можно при помощи внешнего курсоуказателя, в качестве которого предлагается использовать спутниковую навигационную систему (СНС), например GPS или Глонасс [7]. Компенсацию дрейфа предлагается осуществлять, используя информацию от феррозондовых датчиков (рис. 3).

При таком способе определения углов искривления скважины одной из ключевых задач является необходимость выявления магнитных аномалий или отказа блока феррозондов, и дальнейшее вычисление углов ориентации по соответствующему алгоритму.

Критерием для принятия решения также являются результат сравнения углов d и v с исходными величинами.

Если в результате сравнения рассчитанные углы d и v совпадают с опорными или величина расхождения не превышает допустимое значение, в фильтре Калмана по сигналу с блока управления осуществляется оценка погрешности ММГ с учетом информации от феррозондов и последующая коррекция сигналов гироскопов (рис. 3). Также принимается решение о достоверности значения азимутального угла, рассчитанного по сигналам с феррозондов и акселерометров.

В обратном случае блок управления подает сигнал на фильтр Калмана проводить коррекцию гироскопических датчиков без привлечения информации от феррозондов. Достоверным считается значение азимута, рассчитанного по сигналам с гироскопов и акселерометров.

Процедура начальной оценки погрешности ММГ осуществляется в устье скважины. Для этого блок управления подает управляющий сигнал на приемник СНС и на вычислитель, где происходит вычисление географического азимута по показаниям сигналов с блока микромеханических гироскопов, блока акселерометров и приемника СНС.

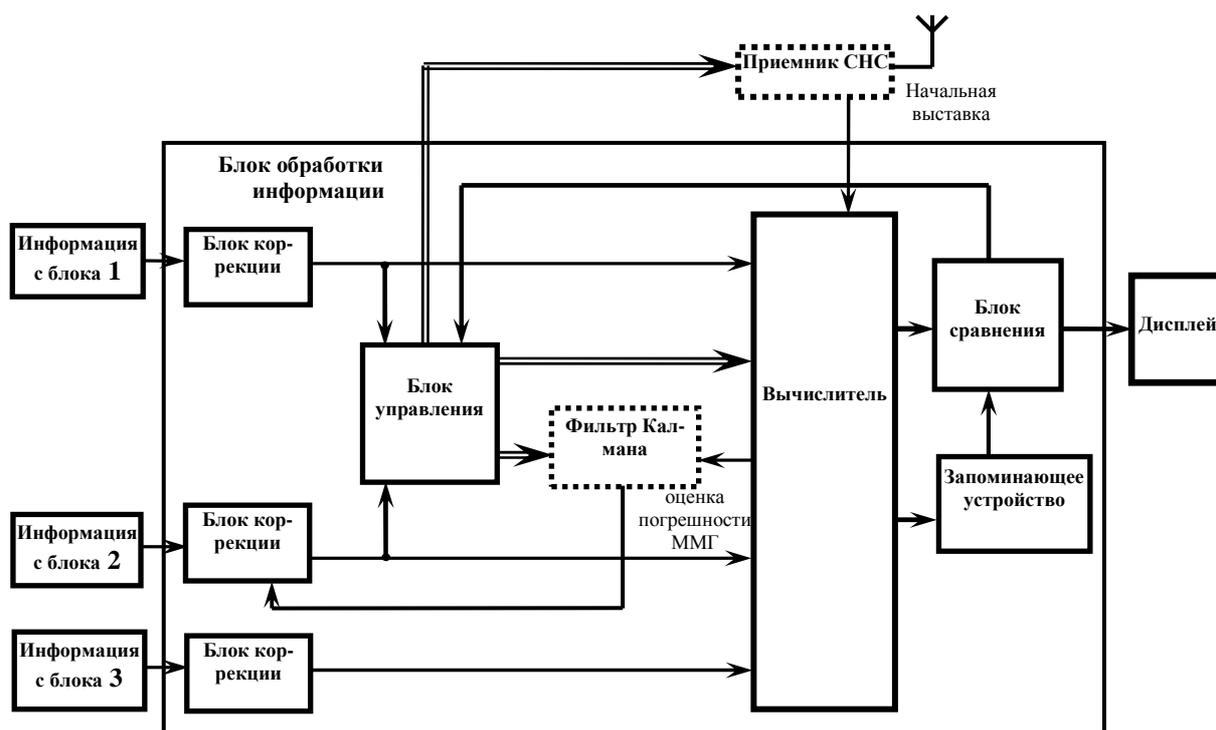


Рис. 3. Структурная схема блока обработки информации

В фильтр Калмана поступает начальная оценка погрешности ММГ и далее информация о поправке погрешности передается в блок коррекции сигналов гироскопов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная схема интегрированной ИС позволяет расширить функциональные возможности за счет проведения измерений в обсаженной и открытой скважинах, повысить точность измерений за счет совместного применения феррозондов и гироскопов, а также компенсации дрейфа последних. Комплексное использование магнитометрического и гироскопического модулей сокращает время измерений, как минимум, в 2 раза и, следовательно, снижает расходы на измерения, а также обеспечивает работоспособность измерительного модуля при отказе одного из блоков первичных датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие нефтяной промышленности России: Взгляд с позиции ЭС-2030 / В. Бушуев [и др.] // Нефтегазовая вертикаль. 2010. № 13–14. С. 4–11.
2. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987. 216 с.
3. Терешин В. Г., Иванова Г. А. Перспективы использования волоконно-оптических гироскопов в

инклинометрической технике // Вестник УГАТУ. 2011. № 1. С.70–75.

4. Терешин В. Г., Иванова Г. А. К вопросу выбора динамически настраиваемых и волоконно-оптических гироскопов для инклинометрической техники // Вестник УГАТУ. 2012. № 1. С. 62–69.

5. Алимбеков Р. И., Рогатых Н. П., Терешин В. Г. Построение инклинометрических комплексов с использованием инерциальных технологий // Вестник УГАТУ. 2002. № 2. С. 145–149.

6. Патент 2166084 Российская Федерация, МПК7 E21B47/022. Устройство для определения углов искривления скважины / Г. Н. Ковшов [и др.]; заявитель и патентообладатель Уфимск. гос. нефт. техн. ун-т; заявл. 14.07.2000; опубл. 27.04.2001.

7. Первовский В. С., Биндер Я. И. Азимутальная выставка гироинклинометров для скважин произвольной ориентации с использованием GPS-компыаса // Науч.-техн. вестник С.-Петербургск. гос. ун-та инф. технологий, механики и оптики. 2009. № 57. С. 41–46.

ОБ АВТОРЕ

Иванова Галина Алексеевна, соиск. каф. теоретическ. основ электротехники. Дип. инженер по средствам связи с подвижными объектами (УГАТУ, 2006). Готовит дис. по использованию гироскопических приборов в системах ориентации и навигации подвижных объектов.