

УДК

Я. И. БИНДЕР, Т. В. ПАДЕРИНА, А. С. ЛЫСЕНКО, А. Н. ФЕДОРОВИЧ

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ГИРОИНКЛИНОМЕТРОВ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ СЪЕМКИ СКВАЖИН ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Проводится сравнительный анализ характеристик известных и разрабатываемых гироинклинометров для непрерывной съемки, оцениваются варианты их применения и перспективы развития для скважин различного типа.

Введение

В условиях интенсивного развития направленного бурения и строительства скважин различного назначения все больше возрастает роль и значимость их непрерывной съемки, как единственного универсального способа, обеспечивающего контроль пространственного положения произвольно ориентированных стволов.

Неоспоримые преимущества и возможности непрерывной гироинклинометрической съемки – высокая производительность, возможность определения координат практически с любым шагом и отсутствие методических ошибок ее построения в сочетании с возможностями достижения более низкого, по сравнению с режимом точечного компасирования, уровня инструментальных ошибок, – в течение последнего десятилетия являются стимулом для разработки и внедрения новых типов непрерывных гироинклинометрических (ГИ) систем. При этом имеются в виду разработки, касающиеся не только приборной реализации конструктивных схем, но и создания (модернизации) чувствительных элементов (ЧЭ) ГИ, а также методов решения навигационных задач, и предназначенные для использования именно в скважинах.

Это коренным образом отличает нынешний этап развития техники непрерывных ГИ от начального, характеризующегося заимствованием идеологии построения и отдельных технических решений, использующихся в навигации подвижных объектов. Это вызвано отсутствием платежеспособного спроса на такие ГИ, и, как следствие, – отсутствием серьезной мотивации к разработке такого рода техники со стороны фирм, специализирующихся на создании систем навигации и управления. Сегодня рынок сложных технических средств скважинной навигации, к которым в первую очередь следует отнести ГИ для непрерывной съемки, характеризуется: – наличием ограниченного количества специализированных разработчиков-изготовителей, замкнутых исключительно

Биндер Яков Исаакович. Кандидат технических наук, главный конструктор по направлению ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Падерина Татьяна Владимировна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Лысенко Алексей Сергеевич. Инженер 2 категории ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Федорович Андрей Николаевич. Ведущий инженер ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Статья по докладу на XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

(или, во всяком случае, преимущественно) на сегмент промысловой геофизики; – существенным удельным весом «закрытого» сектора разработок, проводимых гигантами мирового нефтегазового сервиса, с привлечением специализированных гироскопических фирм («Speggy» и т.д.), исключительно для собственных нужд; – развитой специализированной нормативно-технической базой, поддерживающей развитие и стандартизацию тактико-технических требований к методам и средствам подземной навигации.

В работе рассматриваются наиболее общие принципы построения современных ГИ для непрерывной съемки, проводится анализ схем построения известных и разрабатываемых ГИ, оцениваются варианты их предпочтительного применения и перспективы развития, предлагаются новые схемы ГИ и алгоритмы работы, приводятся и обсуждаются результаты их эксплуатации и возможности использования для скважин различного типа.

1. Постановка задачи непрерывной гириноклинометрической съемки

Сегодня очевидно, что контроль пространственного положения скважины является ключевым фактором, гарантирующим попадание ствола скважины в заданный геологический объект, безопасность и экономичность проведения буровых работ. Отсюда следует, казалось бы, напрашивающийся вывод – основным показателем качества проведения инклинометрических измерений в скважине является точность определения декартовых координат ее траектории. Тем не менее до самого последнего времени мировая геофизическая практика руководствовалась (а российская руководствуется до сих пор [1]) стандартами, в которых критериями точности проводки скважины выступают углы (зенитный и азимутальный) ориентации ствола. Характерно, что даже разработчики самой известной и наиболее распространенной за рубежом непрерывной системы Gyrodata (USA) долгое время оставались в плену прежних («угловых») представлений. Упомянутая компания только в январе 2010 г. на своем сайте впервые позиционировала свой ГИ, как изделие, предназначенное именно для траекторных измерений (3-D trajectory profiles for oil and gas wells) [2].

Итак, будем исходить из того, что выходными параметрами непрерывного ГИ являются декартовы координаты E, N, h точек траектории скважины. Координаты рассчитываются классическим методом навигационного счисления, при котором приращения показаний одометра (в данном случае – длины геофизического кабеля, троса и т.д.) раскладываются по осям навигационного базиса и затем последовательно суммируются (интегрируются). Для получения искомых проекций на координатные оси инклинометрическая система вырабатывает матрицу направляющих косинусов, характеризующих ориентацию системы координат XYZ , связанной со скважинным прибором (СП), относительно географической системы координат ENh :

$$C_h^0 = \begin{matrix} & X & Y & Z \\ \begin{matrix} E \\ N \\ h \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (1)$$

На основании известных значений направляющих косинусов (1), определяющих положение продольной оси oZ СП относительно системы координат ENh (рис. 1) и информации о приращении длины кабеля L в непрерывном ГИ вычисляются искомые координаты траектории скважины

$$S_E = \int_0^L c_{13} dl, S_N = \int_0^L c_{23} dl, S_h = \int_0^L c_{33} dl \quad (2)$$

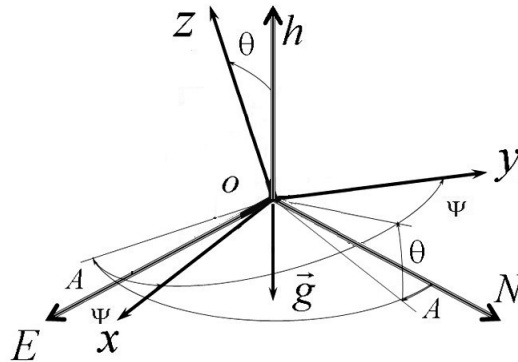


Рис. 1. Скважинные системы координат

Ошибки вычисления координат $\Delta S_E, \Delta S_N, \Delta S_h$ определяются погрешностями формирования направляющих косинусов $\Delta c_{13}, \Delta c_{23}, \Delta c_{33}$ и измерения длины кабеля L , значения которой корректируются с использованием специальных магнитных меток на каротажном кабеле. Ошибки в измерении длины кабеля $\Delta L (\leq 0,1\% L)$ хотя и заметны, но никак не сопоставимы с аналогичными погрешностями инклинометрической системы, реализующей принцип инерциального счисления, поэтому обходиться без информации о длине каротажного кабеля (например [3]) в ближайшее время не представляется разумным.

Для выявления структуры ошибок вычисления направляющих косинусов $\Delta c_{13}, \Delta c_{23}, \Delta c_{33}$ воспользуемся углами Эйлера (см. рис. 1) – зенитным – θ , азимутальным – A и поворота корпуса СП вокруг оси oZ – ψ («угол поворота отклонителя»).

При использовании углов A, θ, ψ матрица C_h^0 определяется следующим образом:

$$C_h^0 = \begin{matrix} & \begin{matrix} X & Y & Z \end{matrix} \\ \begin{matrix} E \\ N \\ h \end{matrix} & \begin{bmatrix} \cos A \cos \psi + \sin A \cos \theta \sin \psi & -\cos A \sin \psi + \sin A \cos \theta \cos \psi & -\sin A \sin \theta \\ -\sin A \cos \psi + \cos A \cos \theta \sin \psi & \sin A \sin \psi + \cos A \cos \theta \cos \psi & -\cos A \sin \theta \\ \sin \theta \sin \psi & \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

Как следует из (3), погрешности определения направляющих косинусов $\Delta c_{13}, \Delta c_{23}, \Delta c_{33}$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta c_{13} &= -\Delta A \cos A \sin \theta - \Delta \theta \cos \theta \sin A, \\ \Delta c_{23} &= \Delta A \sin A \sin \theta - \Delta \theta \cos \theta \cos A, \\ \Delta c_{33} &= -\Delta \theta \sin \theta, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta \theta, \Delta A$ – погрешности определения соответствующих углов Эйлера.

Очевидно, что при этом величина

$$\Delta C_0 = \sqrt{\Delta c_{13}^2 + \Delta c_{23}^2 + \Delta c_{33}^2} = \sqrt{(\Delta A \sin \theta)^2 + \Delta \theta^2} \quad (5)$$

будет характеризовать суммарный промах в определении местоположения точки траектории.

Ошибка $\Delta \theta$ в любых спроектированных ГИ определяется погрешностями измерителя ускорений (ИУ). Структуре его построения, выбору ЧЭ (акселерометров) посвящено достаточное количество публикаций, в том числе ([4]) с участием авторов настоящей статьи. Здесь мы только отметим, что в корректно спроектированных системах гироскопической навигации, а тем более в ГИ, где $|\Delta C_{33}| = \Delta \theta \sin \theta$ определяет важнейший для строительства скважины параметр – точность определения вертикальной глубины, слагаемые под знаком корня в (5) должны (в среднем по траектории) различаться не менее чем на порядок.

Основным же предметом рассмотрения в данной работе являются факторы, определяющие превалирующую компоненту погрешности координат современных ГИ.

$$\alpha = \Delta A \sin \theta. \quad (6)$$

2. Схемы реализации непрерывных ГИ

Современные разработки непрерывных ГИ, доведенные до реального внедрения, столь малочисленны и не похожи друг на друга, что это предельно облегчает их типизацию. Практически, каждая из них реализует определенный тип инклинометрической системы, а будучи проанализированы в совокупности, они позволяют предложить и рассмотреть новые технические решения, целесообразные с точки зрения универсализации, либо, наоборот, специализированные.

Основные факторы, определяющие облик ГИ, – это условия эксплуатации скважинного прибора, требования по его стоимости и эксплуатационной надежности. Существенное влияние может оказывать также обстановка на устье скважины, особенно в случае необходимости привязки ГИ или внешней выставки СП, однако бесспорно приоритетную роль для классификации ГИ играют:

- 1) минимальный проходной диаметр ствола;
- 2) максимальные глубины скважины по стволу и по вертикали (TVD);
- 3) количественные показатели надежности – вероятность безотказной работы, и т.д.;
- 4) цена гиринонклинометрической системы, включая скважинный прибор (СП) и наземный комплекс.

Вышеперечисленные факторы четко определяют поле возможных технических решений и одновременно проводят жесткие внутривидовые границы, поддерживаемые высокой ценой разработки и модернизационного сопровождения непрерывного ГИ. Точностные требования по большей части, в отличие от практики, принятой при формировании тактико-технических характеристик (ТТХ) систем навигации подвижных объектов, становятся зависимыми от конфигурации основных факторов.

Все изложенные здесь положения иллюстрируются нижеследующим материалом.

Наиболее серьезное влияние на построение любых ГИ бесспорно оказывают ограничения по диаметру. Сегодня универсальным может считаться только СП с Ø 1,75S (42 мм по стандартам РФ), что блокирует сколько-нибудь серьезные попытки разработок или глубокой модернизации ГИ большего диаметра. На практике судьба уже созданных систем с большими габаритами складывается по-разному. Так, первая скважинная БИНС – система Ring Laser Inertial Guidance Surveyor (RIGS) (1998г.), заимствованная из аэрокосмической отрасли и выведенная на рынок одним из мировых сервисных лидеров – Baker Hughes, имела наружный диаметр – 5S и, несмотря на очень высокую декларированную точность – 0,1% от глубины по стволу, – не нашла широкого применения.

В то же время единственный, до последнего времени, отечественный непрерывный ГИ – ИГН 73-100/80 (где традиционно первое число в обозначениях СП – его диаметр, далее – предельная температура эксплуатации в °С и давление в МПа), разработанный ОАО «Темп-Авиа» г. Арзамас, примерно в те же годы, уже «разменял» вторую сотню заводских номеров и активно эксплуатируется там, где это возможно, но не подвергается (в силу, ограниченности применения) серьезной модернизации, все более отставая от современных требований.

Прочие из пронумерованных в этом разделе факторов следует разбить на две группы: второй совместно с третьим и четвертый. Определяемые ими требования к ТТХ ГИ разделяют последние на существенно различные сегменты рынка, которые, достаточно условно можно назвать: «нефтегазовые» и «бюджетные».

Для первых характерны: сравнительно большое (1 ч и более) время измерительного галса, высокая (до 100-150°C) рабочая температура и значительная цена спускоподъемных операций (СПО), определяющая весьма серьезные требования по надежности изделия. Точность определения декартовых координат в плане $\leq 0,5\%$, а TVD $\leq 0,2\%$ от глубины по стволу. Стоимость таких ГИ является при этом скорее инструментом тендера, нежели реальным экономическим фактором.

В отличие от «нефтегазовых» ГИ для «бюджетных» цена изделия имеет ключевое значение, так как они предназначены для решения гораздо менее «капиталоемких» задач – съемки вспомогательных скважин в рудных телах, кимберлитовых трубках, шахтных выработках, на объектах подземного и транспортного строительства. Их глубины по стволу лежат, как правило, в диапазоне 60–600 м, что позволяет ограничить время съемки при движении в одну сторону 1-10 мин, а рабочие температуры 5–40°C. Требования к точности счисления плановых координат в зависимости от зенитного угла составляют 0,4-1,0% от глубины по стволу, хотя требования по TVD могут быть высоки – 0,1-0,2%.

Есть, впрочем, один интересный «штрих» к проводимому нами сравнительному анализу – сегмент «бюджетных» ГИ для непрерывной съемки не существует. Есть несколько публикаций (например, [5]), описывающих возможные схемы их построения, а также попытки шведской компании, поглотившей австралийскую фирму «Flexit», анонсировавшую непрерывные ГИ на MEMS ЧЭ, провести скважинные испытания этих приборов [6]. Режим съемки при использовании таких ГИ можно назвать квазинепрерывным – ZUPT-коррекция с чередованием десятисекундных остановок и движения. Какая-либо информация об устойчивости результатов испытаний на сегодня отсутствует.

Существуют, конечно, и задачи, не подпадающие под предложенную нами, очень условную классификацию. К ним, в частности, относятся измерения и взаимная привязка траектории некоторого количества («веер», «уступ») близлежащих коротких скважин, осуществляемые в условиях большой сложности или даже невозможности одновременного доступа к их устьям. В этом случае необходимо либо использование гирокомпасирования, либо независимое устройство для начальной выставки, входящее в комплект поставки изделия. К промежуточному типу, с точки зрения систематизации, следует отнести и съемку скважин средних (≤ 1000 м) размеров с точностными требованиями $\leq 0,5\%$ от глубины по стволу. Для каждой из таких специальных задач вполне возможно специальное решение ([5, 7]). Однако в силу уже упоминавшихся высоких удельных затрат, связанных с разработкой и сопровождением изделия и обусловленных низкой его серийностью, эти решения остаются на бумаге. В условиях отсутствия непрерывных ГИ, предназначенных для применения в таких (а равно и в «бюджетных») случаях, различные потребители используют самые разнообразные методы и средства контроля пространственного положения скважины – от примитивных (привязка устьев от внешнего источника с дальнейшим контролем прямолинейности оптическими средствами) и точечных до непрерывных «нефтегазовых» ГИ. Последнее, кстати, вполне оправдано в упомянутых здесь примерах привязки «уступов», съемки «километровых» скважин и еще в некоторых случаях. Для большинства же подобных применений экономическая целесообразность создания и использования «бюджетных» ГИ не вызывает сомнений.

При дальнейшем изложении мы постараемся подойти к рассмотрению непрерывных ГИ различного назначения с единых методологических позиций, что, на наш взгляд, позволяет в значительной степени унифицировать принципиальные схемно-конструктивные и алгоритмические решения.

2.1. Схема Z

Из основ теории инерциальных систем ориентации (см. [8]) известно, что для вычисления матрицы (1) в общем случае необходимы три измерителя, работающие в режиме датчиков угловой скорости (ДУС), например три двухстепенных гироскопа или один трехстепенной и один двухстепенной с осями чувствительности, не лежащими в одной плоскости (в идеале – ортогональными). Однако при определенных ограничениях на ориентацию скважины и при наличии в составе ГИ акселерометров задача непрерывной съемки может быть решена с помощью только одного трехстепенного, а при ограничениях иного типа – одного двухстепенного гироскопа. Сообразно ориентации осей чувствительности соответствующие схемы ГИ будем обозначать XY и Z (см. рис. 1) и называть неполными.

Анализ этих схем представляется естественным начать именно со схемы Z потому, что, во-первых, она выглядит наиболее экономичной, а во-вторых, понятно, что областью ее предпочтительного применения должны быть стволы, близкие к вертикальным, по-прежнему преобладающие среди нефтегазовых скважин, особенно подвергаемых повторным измерениям. При этом еще более очевидной является необходимость измерения в схеме Z значений угловой скорости, определяемых главным образом так называемым «моторным эффектом» (крутильными колебаниями геофизического кабеля) и достигающих десятков и

даже, если не принять специальных мер по ее ограничению, сотен градусов в секунду.

Приведенные здесь соображения, надо полагать, побудили разработчиков уже упоминавшегося здесь ГИ ИГН 73-100/80 к созданию на его базе одноосного индикаторного гиросtabilизатора (ОИГС) (рис. 2). Это оригинальное решение теперь уже можно смело назвать уникальным, так как более никто по этому пути не пошел. Технические характеристики ИГН 73 [3]: наружный диаметр – 73 мм, длина прибора – 2500 мм; диапазон измерения зенитного угла 0–70°, азимута 0–360°. Основная погрешность определения координаты смещения в плане скважины не более 0,5% от глубины скважины для географической широты (φ) до 60° и не более 0,6% от L для $\varphi > 60^\circ$ при $\theta \leq 10^\circ$.

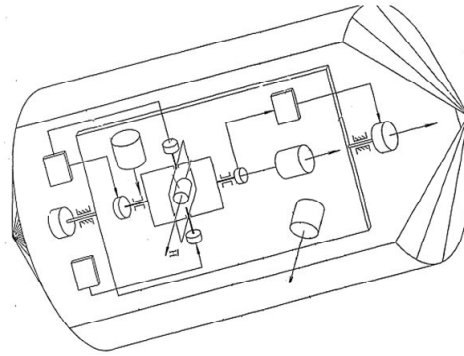


Рис. 2. Схема одноосного индикаторного гиросtabilизатора

При этом дополнительная погрешность, вызванная изменением θ , не более 0,1 величины основной на каждые 10°, превышающие $\theta = 10^\circ$.

В качестве чувствительных элементов в ИГН-73 используются двухканальный управляемый гироскоп со сферическим шарикоподшипниковым подвесом типа Д7-03И и два кварцевых акселерометра АТ-1104. Вектор кинетического момента гироскопа ориентирован в плоскости поперечного сечения СП, один канал гироскопа работает в режиме ДУС и используется при начальной азимутальной ориентации платформы гиросtabilизатора, другой канал является датчиком системы стабилизации, позволяющей удерживать платформу неподвижной относительно продольной оси СП. Акселерометры, установленные на платформе, измеряют две компоненты кажущегося ускорения.

Матрица ориентации формируется по информации акселерометров и угловой скорости управления платформой (при бесплатформенной реализации схемы Z эту функцию выполняет информация от ДУС с соответствующей осью чувствительности; очевидная аналогия такой гиросtabilизатора с бесплатформенной схемой позволяет использовать универсальный аппарат для их анализа). Следует подчеркнуть, что использование измерителя ускорений (ИУ) в качестве угломера (маятника), обеспечивающее возможность **пренебрежения инерционными ускорениями СП**, неоднократно подтверждавшееся как оценочными расчетами, так и многолетней практикой ([3]) является важнейшим **системообразующим фактором скважинной навигации**.

Для исследования погрешностей схемы Z воспользуемся одним из уравнений, связывающих угловые скорости вращения трехгранника XYZ с угловыми скоростями вращения географического трехгранника ENh и скоростями изменения азимута $\dot{A}$, зенитного угла $\dot{\theta}$ и угла поворота отклонителя $\dot{\psi}$ (см. рис. 1):

$$(\dot{A} - \Omega \sin \varphi) \cos \theta = \dot{\psi} - \omega_Z - \Omega \cos \varphi \cos A \sin \theta, \quad (7)$$

где ω_Z – абсолютная угловая скорость вращения трехгранника XYZ вокруг оси oZ , измеряемая ДУС; Ω – угловая скорость вращения Земли.

Варьируя уравнение (7) и опуская, с учетом качественного характера проводимого анализа и сравнительно малого времени работы ГИ, составляющие с множителями Ω , получим

$$\Delta \dot{A} = \frac{\Delta \dot{\psi} - \Delta \omega_z + \Delta \theta \dot{A} \sin \theta}{\cos \theta}. \quad (8)$$

На основании матрицы (3) можно легко получить выражения для нормированных составляющих n_x, n_y ускорения силы тяжести, измеряемых акселерометрами ИУ, варьирование которых приводит к следующим погрешностям $\Delta \theta, \Delta \psi$:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta n_{yx}(\psi)}{\cos \theta}, \quad \Delta \psi = \frac{\Delta n_{xy}(\psi)}{\sin \theta}, \quad (9)$$

где $\Delta n_{xy}(\psi) = \Delta n_x \cos \psi - \Delta n_y \sin \psi$, $\Delta n_{yx}(\psi) = \Delta n_x \sin \psi + \Delta n_y \cos \psi$, $\Delta n_x, \Delta n_y$ – погрешности акселерометров n_x, n_y ИУ.

На основании (8) с учетом (9) имеем

$$\begin{aligned} \alpha = & \Delta A_0 \sin \theta - \sin \theta \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{\Delta n_{xy}(\psi)}{\sin^2 \theta} d\theta + \sin \theta \int_{A_0}^A \frac{\Delta n_{yx}(\psi) \sin \theta}{\cos^2 \theta} dA - \sin \theta \int_0^t \frac{\Delta \omega_z dt}{\cos \theta} \\ & + \sin \theta \int_{\psi_0}^{\psi} \frac{\Delta n_{yx}(\psi) d\psi}{\cos \theta \sin \theta} + \sin \theta \int_0^t \frac{\Delta \dot{n}_{xy}(t) dt}{\cos \theta \sin \theta}. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее, полагая погрешности ИУ случайными константами, а угол ψ неизменным, получим первые, вполне прогнозируемые, результаты:

– сумму двух первых слагаемых в виде $(\tau_0 \sec \phi \sin \theta + \Delta n_{xy}(\psi))$, где τ_0 – погрешность моделирования оси Мира при компасировании в начальной точке (определяемая в ОИГС нескомпенсированным дрейфом гироскопа по оси ДУС); очевидно, что это выражение не имеет особенностей при любых θ ;

– третье и четвертое слагаемые, определяемые соответственно погрешностями акселерометров ИУ и дрейфом гироскопа по оси стабилизации, стремящиеся к нулю около вертикали ($\theta = 0^\circ$) и неограниченно возрастающие по мере приближения к горизонту ($\theta = 90^\circ$).

При рассмотрении бесплатформенной реализации схемы Z в дополнение к изложенному следует принять во внимание, что угол поворота отклонителя ψ можно считать меняющимся мало лишь в начале спускоподъемных операций (СПО), а при снятии этого ограничения второе слагаемое в (10) приобретает

коэффициент $\left(\frac{\sin \theta}{\sin \theta_0} - 1 \right)$ при погрешности ИУ, а пятое может вообще достичь

недопустимых значений, особенно при малых, быстроменяющихся значениях θ . Ну и, наконец, при использовании в ИУ микромеханических ЧЭ с высоким уровнем флуктуационных погрешностей, весьма значительным, причем по-прежнему, особенно в зоне малых зенитных углов становится последнее слагаемое в (10).

Тем не менее настоятельная потребность в съемке близких к вертикальным участков ствола побудила авторов настоящей статьи к практической реализации бесплатформенной схемы Z на MEMS ЧЭ в диапазоне малых зенитных углов. В ходе работы над этой схемой алгоритм (7) был проанализирован и отвергнут, а предложенный «гироазимутальный» оказался свободен от дополнительных погрешностей.

Для описания этого алгоритма введем углы μ, ν и угол ψ^M (рис. 3).

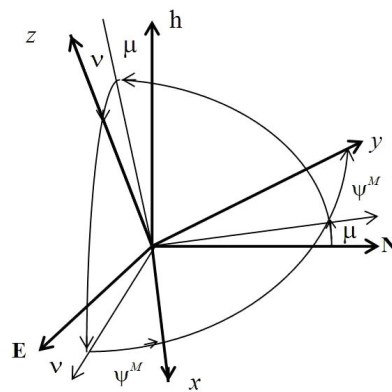


Рис. 3. Параметры ориентации для съемки скважин с малыми зенитными углами

Показания n_x, n_y ИУ могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} n_x &= \sin \mu \sin \psi^M - \cos \mu \sin \nu \cos \psi^M \\ n_y &= \sin \mu \cos \psi^M + \cos \mu \sin \nu \sin \psi^M, \end{aligned} \quad (11)$$

а матрица

$$C_h^0: \begin{matrix} E \\ N \\ h \end{matrix} \begin{matrix} X & Y & Z \end{matrix} \left[\begin{array}{ccc} \cos \nu \cos \psi^M & -\cos \nu \sin \psi^M & \sin \nu \\ \cos \mu \sin \psi^M + \sin \mu \sin \nu \cos \psi^M & \cos \mu \cos \psi^M - \sin \mu \sin \nu \sin \psi^M & -\cos \nu \sin \mu \\ \sin \mu \sin \psi^M - \cos \mu \sin \nu \cos \psi^M & \sin \mu \cos \psi^M + \cos \mu \sin \nu \sin \psi^M & \cos \nu \cos \mu \end{array} \right]. \quad (12)$$

При этом

$$\psi^M = \omega_Z - \mu \sin \nu - \Omega \sin(\varphi - \mu) \cos \nu. \quad (13)$$

Приравняв элементы c_{11} и c_{12} матриц (3) и (12), можно получить связь углов ψ^M и A :

$$\psi^M = \psi - \arctg(tg A \cos \theta). \quad (14)$$

Понятно, что попытка точного решения системы уравнений (11), (13) наталкивается ровно на те же трудности, что и интегрирование (7), так как изменения азимута скважины при малых углах θ при отсутствии стабилизации по углу ψ ненаблюдаемы. Ситуация, однако, предельно упрощается, если малость μ и ν (т. е. в конечном счете θ) позволяет пренебречь вторым членом в правой части (13). Варьируя элементы последнего столбца матриц (3) и (12), а также уравнений (11) и (14) и учитывая (6), а также предполагая (для наглядности) кратковременность прохождения вертикального ствола, разрешим, с учетом малости θ , полученную систему уравнений относительно α :

$$\alpha = \Delta \psi_0^M \theta + \theta \int_0^t \Delta \omega_Z dt - \Delta n_{xy}(\psi). \quad (15)$$

«Разгадка» эффективности (а заодно и названия) «гироазимутального» алгоритма полностью исчерпывается последней формулой, из которой следует, что погрешность, вносимая упрощением (13) (пренебрежением вторым слагаемым в правой части), пропорциональна θ^3 . Локализация бесплатформенной схемы Z

вблизи вертикали, таким образом, может быть не слишком жесткой, что позволяет отказаться от необходимости решения уравнений Пуассона, приемлемой только в ОИГС. О реальных и планируемых применениях рассмотренной схемы и данных ее апробации – см. ниже (раздел 2.3).

2.2. Схема ХУ

Этим очевидным, берущим начало в практике точечного компасирования, решением («продольная компоновка» [7] и т.д.) легко парируется основная проблема предыдущей схемы – необходимость измерения большой угловой скорости. В данном случае диапазон измерения ДУС по осям X и Y определяется величинами $\dot{\theta}$ и $\dot{A} \sin \theta$, которые, во всяком случае при обеспечении центрирования прибора в скважине, не превышают значения $\chi V \leq 0,5^\circ/\text{с}$ (здесь χ – кривизна скважины, $^\circ/\text{м}$; V – линейная скорость СПО, м/с). С учетом двух-трехкратного запаса, определяемого прежде всего неидеальностью центрирования, такой диапазон обеспечивается достаточно точными ДУС, как с механическим носителем вектора кинетического момента, так и без него.

Хорошо известные алгоритмы схемы ХУ, различные аспекты использования которых неоднократно анализировались ранее в публикациях авторов [4, 7] имеют следующий вид (рис. 1):

$$\dot{A} \sin \theta = \Omega(\sin \varphi \sin \theta + \cos \varphi \cos \theta) - \omega_y \cos \psi - \omega_x \sin \psi, \quad (16)$$

$$\dot{\theta} = \Omega \cos \varphi \sin A - \omega_y \sin \psi + \omega_x \cos \psi,$$

$$\psi = \arctg \frac{n_x}{n_y}, \quad (17)$$

$$\theta = \arcsin \frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{g} \quad (18)$$

В этих алгоритмах, как и в схеме Z , ИУ выполняет функцию угломера. Точность выработки θ может быть повышена за счет комплексирования его значений, полученных из (18) и (16), однако это отличие от схемы Z не играет первостепенной роли. А вот ошибка определения азимута ΔA при сравнении (8) неограниченно растет при $\theta \rightarrow 0$, и, таким образом, область предпочтительного применения схемы Z для продольной компоновки, как будто бы оказывается под запретом. Во всяком случае, этим в течение многих лет руководствовался мировой лидер в области ГИ для непрерывной съемки – Gyrodata, уже упоминавшаяся в первом разделе в качестве разработчика RGS-C.

Основные характеристики Rate-gyroscopic system continued (RGS-C): наружный диаметр 1,75S (44,45 мм), длина СП 3000 мм; диапазон измерения зенитного угла $0-120^\circ$, азимута 360° ; предельная рабочая температура 150°C ; предельное давление 100 МПа. Режим работы изделия в диапазоне зенитных углов $0-15^\circ$ – точечный; $15-120^\circ$ – непрерывный, декларируемая точность 0,1% от глубины по стволу.

Использование точечного компасирования при зенитных углах до 15° по зениту объясняется, видимо, приоритетом точности над производительностью при съемке достаточно протяженных стволов с небольшим отстоянием от вертикали (при $\Omega \cdot t > \theta$ схема ХУ имеет в непрерывном режиме большие погрешности, чем в точечном). Кроме того, необходимо подчеркнуть принципиальное

различие свойств рассматриваемых схем в части, касающейся начальных условий. В схеме Z выставка-компасирование (как в ОИГС) или внешняя (как в бесплатформенном варианте) производится только в устье скважины. В схеме ХУ выставки (как правило, гироскомпасирования) в устье может оказаться недостаточно – основным условием является все-таки кратковременность нахождения на участке ствола близ вертикали. С другой стороны, компасирование в этой схеме может производиться практически всегда в процессе съемки.

Как бы то ни было, ни эти, достаточно прозрачные, соображения, ни повышенное внимание при съемке к погрешности выработки углов ориентации (казалось бы, что в первую очередь должны интересовать погрешности выработки декартовых координат), характерное для времен разработки RGS-C, ни в коей мере не оправдывает исключение возможности непрерывной съемки с помощью схемы ХУ значительной (а для России – преобладающей) доли скважин, траектории которых целиком (или в основном) лежат внутри указанного выше диапазона зенитных углов.

Авторы данной статьи, начиная разработку непрерывного ГИ типа ХУ, лет на десять позже, чем коллеги из Gyrodata, и всего лишь через три года после обращения к инклинометрической тематике, были свободны от «призраков прошлого» и сделали предметом исследования характеристику промаха в плане скважины α (см.(6)). При этом было установлено, что при малых зенитных углах полагать характер поведения α определяемым погрешностью горизонтирования, отнесенной к малой величине θ , по меньшей мере, неточно. Чтобы убедиться в этом на качественном уровне, достаточно проварьировать уравнение (16) (пренебрегая членами с Ω и полагая $\cos \theta=1$, $\sin \theta=\theta$), а также (17) и проинтегрировать полученную систему линейных нестационарных дифференциальных уравнений. При этом получим

$$\alpha = \Delta A_0 \theta - \theta \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{\Delta n_{xy}(\psi) d\theta}{\theta^2} - \theta \int_{A_0}^A \frac{\Delta n_{yx}(\psi)}{\theta} dA - \theta \int_0^t \frac{\Delta \omega_{yx}(\psi) dt}{\theta}, \quad (19)$$

где $\Delta \omega_{yx}(\psi) = \Delta \omega_x \sin \psi + \Delta \omega_y \cos \psi$.

Сравнивая (19) с (10), нетрудно убедиться, что (для вертикального ствола) к двум первым слагаемым вполне применимы выводы, полученные для бесплатформенной реализации схемы Z. Сравнительно малое время прохождения вертикального ствола, позволяет не принимать во внимание последнее слагаемое, обусловленное уходами гироскопов. Третье слагаемое в (19) в силу, как правило, больших значений $\dot{A}$ при малых θ и быстрых изменениях последнего, может в несколько раз превышать уровень инструментальной погрешности ИУ, но это не меняет главного вывода – **какой-либо количественный критерий по углу θ для ограничения работоспособности непрерывного ГИ типа ХУ отсутствует.**

Тем не менее, сложности при практическом использовании такого ГИ вблизи вертикали, конечно, возникают, причем основными мешающими факторами здесь являются шумы акселерометров и конечная частота дискретизации измерительной информации. Весовые функции при этих возмущениях в правой части (19) в общем случае нестационарны, и от того, насколько существенна эта нестационарность (определяемая, в свою очередь, величиной χV , т.е. отчасти, управляемая), прежде всего зависит степень влияния флюктуационных погрешностей и малой дискретности.

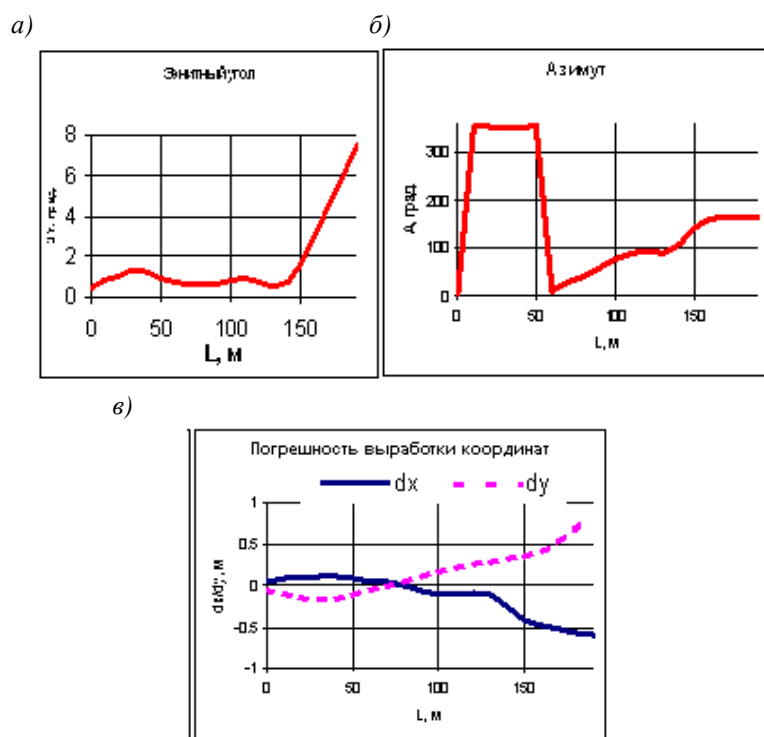


Рис. 4. Погрешности выработки плановых координат скважины 304 (Т-Русское месторождение) гироинклинометром УГИ- 42.03 (схема ХУ)

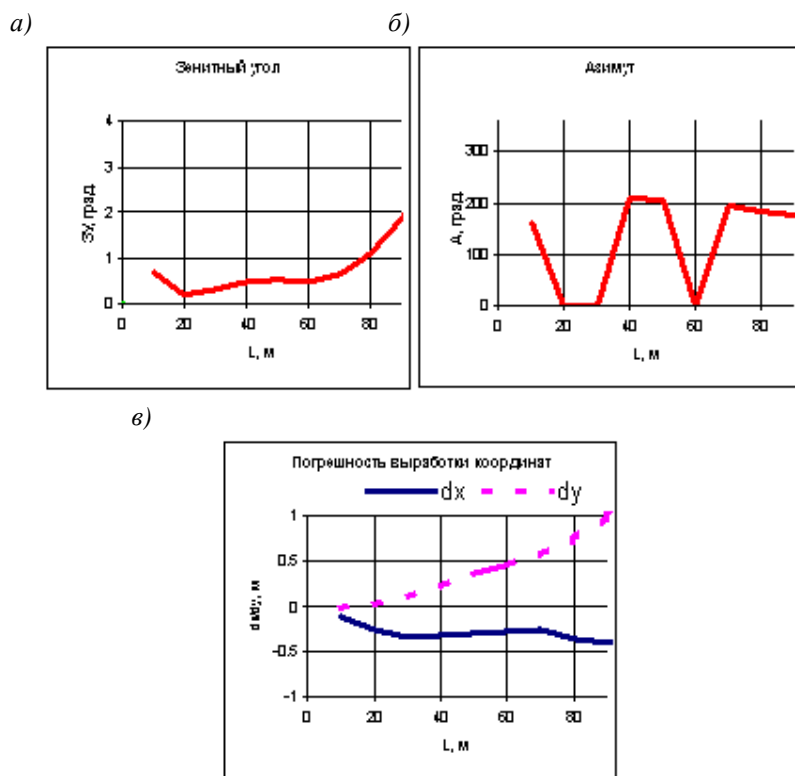


Рис. 5. Погрешности выработки плановых координат скважины 1792 (Лянторское месторождение) гироинклинометром УГИ- 42.03 (схема ХУ)

На рис. 4 и 5 приведены погрешности выработки плановых координат при съемке скважин гироинклинометром УГИ-42.03, выполненным по схеме ХУ. (рис 4 – скважина 304, месторождение Т-Русскинское, куст 13с, «Когалымнефтегеофизика», рис. 5 – скважина 1792, месторождение Лянторское, куст 324, «Сургутнефтегаз»). Из рис. 4 следует, что, несмотря на то, что среднее значение θ на первых 130 м не превышает 0.6° , ошибки плановых координат находятся в допуске, что полностью согласуется с малостью $\dot{A}$ и $\dot{\theta}$. В то же время на рис. 5 уже к 90 м ошибка в плане превышает 1% от L , притом что поведение θ на этом участке ствола не менее благоприятно, чем в предыдущем случае. Здесь все объясняется поведением азимутального угла, скорость изменения которого такова, что его определение ГИ сопровождается потерей знака $\dot{A}$ и сбоями на $180^\circ(!)$. Заметим, что бурное развитие как микропроцессорной, так и микросистемной техники позволяет, конечно, на этапе модернизации изделий серьезно продвинуться и в части повышения быстродействия контроллера, и в части снижения шума акселерометров, что, вероятно, позволит отодвинуть границу применимости схемы ХУ к значениям θ 0,2-0,25°. Однако ограничение универсальности (например, при работе на вертикальных стволах большой протяженности – подземные газохранилища, «правильно» пробуренные скважины старого фонда – с сохранением точностных требований) все равно остается стимулом к поиску более общих решений.

2.3. Сравнительные характеристики неполных схем. Результаты испытаний. Перспективы

Ни развернутый анализ ошибок схем Z и ХУ при произвольных θ и больших временах работы, ни даже подробное изложение его результатов, к сожалению, не совместимы с форматом публикации. Кроме того, точность, хотя и важнейший, но далеко не единственный параметр, определяющий качество работы ГИ, поэтому ниже приводятся сравнительные характеристики по основным показателям ГИ, сопровождая их необходимыми комментариями (см. таблицу).

Показатель качества	Схема Z	Схема ХУ
Диапазон измерения угловой скорости	40°/сек и более для бесплатформенного ГИ; либо ОИГС	1-2 град/с
Точность, в зависимости от угла θ	Высокая, при $\theta \rightarrow 0^\circ$ Соизмеримая с ХУ при $35^\circ < \theta < 55^\circ$ Низкая при $\theta > 70^\circ$, при $\theta \rightarrow 90^\circ$ неприменима	Не зависит
Точность на вертикальных ($\theta < (1-2)^\circ$) стволах при большой (>1км) глубине	Высокая	Ниже, чем у Z в $\text{ctg}\theta$ раз
Начальная выставка: – автономная – внешняя	Только для ОИГС на трехступенном гироскопе Без ограничений	Без ограничений Только при «быстром» отходе от вертикали

Однозначные выводы о предпочтительности той или иной схемы, очевидно, были бы затруднительны, если не принимать во внимание возможности их тех-

нической реализации. ДУС для создания бесплатформенного варианта схемы Z в «нефтегазовом» сегменте рынка сегодня не существует. Единственная, как уже было сказано, существующая разработка ОИГС обладает негативными особенностями конкретной реализации, обусловленными качеством сухих гироскопических ЧЭ – большой нестабильностью и сложной пространственной моделью дрейфа, что в свою очередь определяет необходимость частых остановок для его уточнения в процессе съемки, а также длительность и жесткую привязку к вертикальному положению СП процесса начальной выставки. При больших θ нестабильность дрейфа приобретает «коэффициент усиления», равный $\tan \theta$, что в конечном счете делает использование ГИ невозможным. Возможна модернизация [9]) схемы ИГН-73 посредством использования (например, при $\theta > 45^\circ$) информации ДУС, которым является гироскоп ОИГС, по оси, перпендикулярной оси стабилизации (см. рис. 2). Таким образом, реализуется режим, аналогичный бесплатформенной схеме XU . Этого, однако, не происходит, что, по всей видимости, объясняется техническими сложностями при создании нового режима и/или отсутствием при строительстве современных скважин сложного профиля интереса к ГИ с $\varnothing 73$ мм, который определяется использованием так называемой поперечной схемы [10] при создании ОИГС. Итак, круг замкнулся.

Построение ГИ по схеме XU , напротив, выглядит просто, если не сказать – примитивно. Задачи, подлежащие решению в процессе его создания, также вполне очевидны. Первая из них – применение удароустойчивого ДУС и создание условий, минимизирующих влияние его дрейфов при малых θ (иначе при равноточных гироскопах в таких стволах схема XU явно уступает схеме Z). Другая задача – минимизация влияния нестационарности алгоритмов идеальной работы (16) и (17) и нелинейности их реализации при $\theta \rightarrow 0$.

Однако, как следует из материалов подраздела 2.2, решения только этих задач может оказаться недостаточно. Поэтому при модернизации упомянутого там же (и ранее [4]) инклинометра УГИ-42.03, в числе создателей которого авторы статьи, основная схема XU была дополнена «бюджетным» вариантом бесплатформенного «гироазимута» с алгоритмами (13) на MEMS гироскопах. Результаты съемки различных скважин с помощью ИГН-73 и УГИ-42.03 представлены на рис. 6 (скважина 6146, куст 184, месторождение Тевлино-Русскинское, «Когалымнефтегеофизика») и рис. 7 (скважина 3243, куст 144, месторождение Западно-Сургутское, «Сургутнефтегаз»).

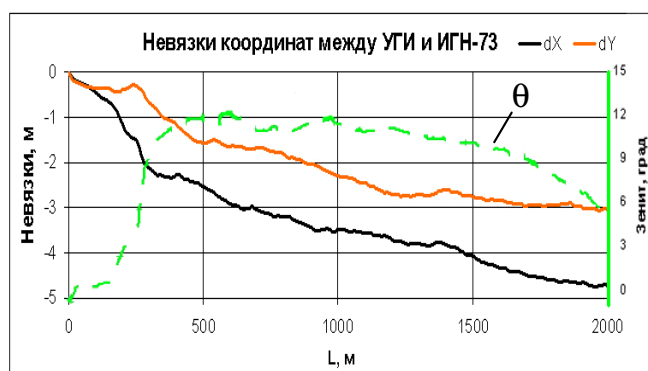


Рис. 6. Невязки в координатах скважины 6146 (Т-Русскинское месторождение) при измерении гириноклинометрами ИГН-73 и УГИ- 42.03 (схема XU)

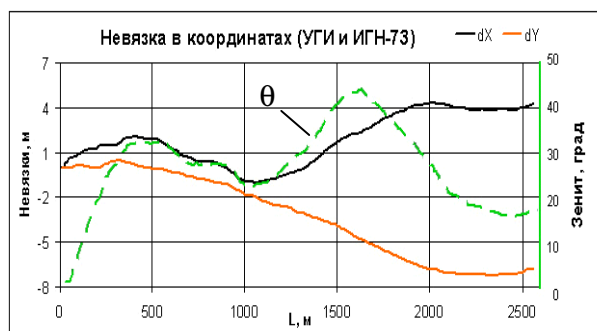


Рис. 7. Невязки в координатах скважины 3243 (Западно-Сургутское месторождение) при измерении гироскопическими системами ИГН-73 и УГИ-42.03 (схема XYZ)

Понятно, что отсутствие эталонирования в ходе реальной эксплуатации оставляет для анализа точности единственную возможность – оценку по невязке (представляющей разность одноименных координат скважины, выработанных двумя разными средствами). Она показывает, что съемка с помощью полученного описанным образом комплексного ГИ не менее эффективна, чем с ОИГС, несмотря на ориентацию скважин, более предпочтительную для схемы Z. И хотя анализ синтезированной схемы Xyz (малость последнего индекса вполне соответствует как вспомогательной функции MEMS гироскопа, так и «легкости» его введения в ГИ) – не предмет исследования в данной работе, отметим, что ее эффективность всецело определяется **апостериорной обработкой** – еще одним **системообразующим фактором скважинной навигации**.

И наконец, завершая рассмотрения неполных схем ГИ, напомним о предложенной одним из авторов ([11]) «диаметральной» схеме. При ее использовании на вертикальных участках в режиме ОИГС (в отличие от ИГН-73 с осью ДУС, перпендикулярной апсидальной плоскости скважины) можно было бы получить малогабаритный непрерывный ГИ, свободный от всех, анализировавшихся в разделе 2, недостатков. Однако известные трудности реализации узла неограниченного вращения, как и вообще сомнения в серьезности перспектив гиросtabilизаторов в XXI веке, пока мешают сколь угодно серьезной проработке этой идеи.

3. Трехосные ГИ. О целесообразности использования ИНС для навигационного счисления на ограниченно маневрирующих объектах

Основные положения этого раздела развиваются для ГИ, имеющих полный набор равноточных инерциальных ЧЭ. К схеме XYZ (и, теоретически возможной, XYZ, в которой измерительные оси x и y представлены, например, MEMS ЧЭ) получаемые результаты, разумеется, тоже приложимы, но не несут столь значимого практического смысла.

Целесообразность измерения непрерывным ГИ трех проекций абсолютной угловой скорости была показана в предыдущем разделе, что называется от противного. Можно предположить (а ниже – это показывается), что трехосная схема не имеет особенностей во всем диапазоне зенитных углов (как схема XY), обладая при этом масштабным коэффициентом ($\sin \theta$, как схема Z), резко понижающим ошибку съемки скважин с весьма распространенным типом

траектории. Однако столь же очевидной является и унаследованная от схемы Z необходимость измерения большой угловой скорости вокруг оси СП.

О первой скважинной трехосной схеме (RIGS) уже упоминалось в разделе 2. В настоящее время на рынке представлен трехосный ГИ малого диаметра Target (компания SEG, Германия, 2005 г.), построенный на двух двухосных динамически настраиваемых гироскопах фирмы Litton и трех акселерометрах. Алгоритм идеальной работы соответствует алгоритму, используемому в БИНС. Основные характеристики: наружный диаметр 1,75S; длина СП 1740 мм; предельная рабочая температура 125°C; предельное давление 100 МПа; диапазон измерения углов азимута, зенитного, поворота отклонителя – без ограничений. Погрешности составляют: 0,5% от глубины по стволу (1 σ) при $\varphi < 50^\circ$ и 0,5% / $\cos \varphi$ – при $50^\circ < \varphi < 70^\circ$.

Само по себе построение ГИ Target, потребовавшее очевидного схемно-конструктивного усложнения СП и прежде всего, как и в любой трехосной схеме, решения проблемы точности гироскопа с диапазоном измерения угловой скорости 75 град/с, большого интереса не вызывает. Несмотря на высокую цену разработки и поставки, обусловленную в первую очередь необходимостью применения Z-гироскопа с большим диапазоном измерения, данные совместных испытаний ГИ XYZ и XYZ (представленные, например, на рис. 8 – скважина HN13, Исландия) не выявляют очевидного приоритета XYZ.

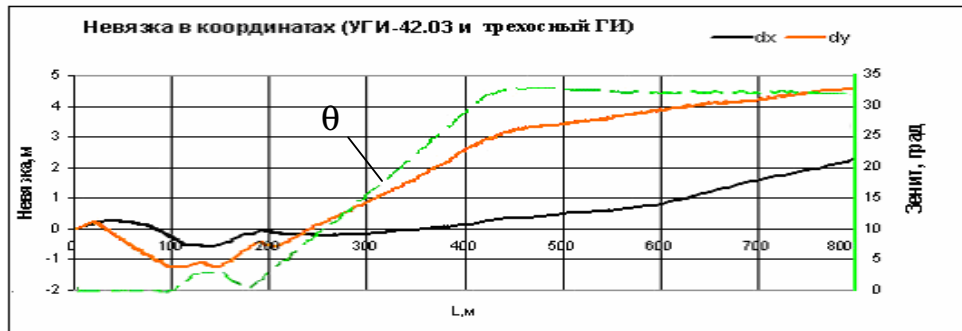


Рис. 8. Невязки в координатах скважины HN13 (Исландия) при измерении трехосным гироинклинометром (схема XYZ) и УГИ- 42.03 (схема XYZ)

В то же время целесообразность (а для «бюджетных» ГИ и необходимость) исследования трехосной схемы в общем случае не подлежит сомнению. Воспользовавшись соотношениями для погрешностей БИНС на коротких интервалах времени (при $t \ll \Omega^{-1}$) ([8, 12]) и проецируя дрейфы ДУС, заданные в осях XYZ на оси N и h географической системы координат, получим, опустив здесь (и далее) члены с Ω :

$$\Delta \dot{A} = \sec \varphi (\dot{\tau}_* + \dot{\gamma} \sin \varphi) + \frac{d(\Delta \psi \cos \theta)}{dt} = -\Delta \omega_{yx}(\psi) \sin \theta - \Delta \omega_z \cos \theta + \frac{d(\Delta \psi \cos \theta)}{dt} - \operatorname{tg} \varphi \left\{ -\Delta \omega_{xy}(\psi) \sin A + \left[\Delta \omega_{yx}(\psi) \cos \theta - \Delta \omega_z \sin \theta \right] \cos A \right\} + \dot{\gamma} \operatorname{tg} \varphi, \quad (20)$$

где τ_* – одна из погрешностей моделирования оси Мира ([8]), γ – «восточная» погрешность вертикали, $\Delta \omega_{xy}(\psi) = \Delta \omega_x \cos \psi - \Delta \omega_y \sin \psi$.

Последовательно проводя «линию» на устранение известных недостатков схем Z и XY (раздел 2), т.е. фактически объединяя их алгоритмы, получаем ГИ, который, естественно, было бы классифицировать как трехосный гироориентатор (ГО), корректируемый от маятника (З-ГО-КМ). Варьируя (16), а также используя (8) и (9), получим систему из пяти уравнений, описывающих погрешности синтезированной схемы:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{\theta} - \Delta\psi\dot{A}\sin\theta &= \Delta\omega_{yx}(\psi), \quad \Delta\theta = \frac{\Delta n_{yx}(\psi)}{\cos\theta}, \\ \Delta\dot{A}\sin\theta + \Delta\theta\dot{A}\cos\theta + \Delta\psi\dot{\theta} &= -\Delta\omega_{yx}(\psi), \quad \Delta\psi = \frac{\Delta n_{xy}(\psi)}{\sin\theta}, \\ \Delta\dot{A}\cos\theta - \Delta\theta\sin\theta\dot{A} - \Delta\dot{\psi} &= -\Delta\omega_z,\end{aligned}\tag{21}$$

из которой легко можно получить следующее выражение для $\Delta\dot{A}$

$$\Delta\dot{A} = -\Delta\omega_{yx}(\psi)\sin\theta - \Delta\omega_z\cos\theta + \frac{d(\Delta\psi\cos\theta)}{dt} + \dot{n}_{xy}(\psi).\tag{22}$$

Очевидно, что по сравнению с (22) выражение (20) содержит дополнительный блок погрешностей, описываемый его второй строкой. В свою очередь, в этом блоке следует выделить две составляющие, имеющие общий множитель $\tan\varphi$, но принципиально различные по природе. Одна из них определяется некоторой суммой проекций дрейфов ДУС (в фигурных скобках), а вторая – погрешностью построения инерциальной вертикали, не связанной с ошибками ИУ (последние в (20) и (22) опущены, так как они почти одинаково влияют на оба выражения).

Заметим, что в (22) введен член $\dot{n}_{xy}(\psi)$, отражающий влияние инерционных ускорений СП, хотя в статье неоднократно указывалось, что в практике инклинометрической съемки их влиянием пренебрегают. Это сделано с целью обратить внимание на то, что, используя алгоритмы **БИНС** и внося тем самым **дополнительные погрешности**, описываемые второй строкой (20), мы при этом фактически **ничего не выигрываем** просто в силу того, что сам предмет выигрыша ничтожен.

Пренебрежение погрешностями построения вертикали в ряде применений прецизионных инерциальных систем вполне оправдано, чего, конечно, не скажешь о БИНС любого назначения, использующих, как и «бюджетные» ГИ, гироскопы уровня MEMS. Воздействие их дрейфов на контур построения вертикали оказывается весьма заметным в итоговой ошибке курсоуказания. Однако к еще более серьезному возрастанию этой погрешности (причем независимо от уровня точности гироскопов) по сравнению с выражением (22), характеризующим режим (З-ГО-КМ), приводит первая составляющая второй строки (20).

Как показывают аналитические оценки (на основании сравнения выражений (20) и (22)), вполне подтверждаемые на апробированных моделях БИНС [13], соотношение дисперсий погрешностей ΔA (или, что в данном случае то же самое, α) схемы БИНС и «неинерциального» трехосного корректируемого гироориентатора (при $t \ll \Omega^{-1}$) равно $\sec^2\varphi$. При этом погрешность вертикали для чистоты модельного эксперимента исключалась, чтобы универсальность полу-

ченных результатов не была ограничена конкретными характеристиками дрейфов.

Во всем этом, строго говоря, нет ничего нового. Погрешность курсоуказания всегда определяется точностью моделирования полуденной линии, способы построения которой в системах гироскопического ориентирования и инерциальной навигации различаются принципиально. В любой ИНС это прямая, по которой пересекаются моделируемые плоскости горизонта и меридиана, причем последняя в силу неразрывности координатно-курсовой связи должна определяться осью Мира. Таким образом, наряду с уходом относительно вертикали полуденной линии, вокруг нее самой поворачивается плоскость меридиана и скорость этого ухода тем выше, чем ближе друг к другу ось Мира и вертикаль, т.е. чем ближе φ к 90° .

В системах гироскопического ориентирования направление на Север моделируется (хранится) физически, либо рассчитывается аналитически с помощью уравнения Пуассона. Аналогичное решение может быть получено в блоке ориентации ИНС при размыкании связи между этим блоком и выходами контура интегрирования. Синтезированная таким образом система ГО не будет иметь особенностей, связанных с ростом широты, однако все равно малоприспособна для непосредственного использования, поскольку погрешности азимута и вертикали теперь характеризуются вековыми членами и суточными колебаниями. Изменение характеристического уравнения достигается введением безынерционной (сглаживание флуктуаций требует наблюдательного времени порядка единиц секунд) коррекции ошибок вертикали от ИУ, приводящим в итоге (при $t \ll \Omega^{-1}$) к соотношениям (21) для ошибок системы.

Здесь, несколько выйдя за рамки темы статьи, уместно затронуть вопрос о других применениях схемы ГО с коррекцией от ИУ. Очевидно, что в первую очередь – это беспилотные подводные аппараты, суда с ограниченной маневренностью и т.п. объекты, навигация которых обеспечивается в режиме счисления. При этом в большинстве случаев автоматически удовлетворяются и требования, выдвигаемые системой управления. Нахождение корабля в высоких широтах, естественно, подчеркивает эффективность предложенной схемы. Время работы не является лимитирующим фактором – можно показать, что при удержании членов с Ω уравнения ошибок системы отвечают классической схеме комплексирования гирокомпаса и гироазимута.

Теперь, завершив обсуждение трехосной схемы, можно графически отразить представления авторов о сегодняшнем дне и ближайших перспективах развития гироинклинометров для непрерывной съемки (рис.9). Стрелками показаны пути трансформации исходных схем.

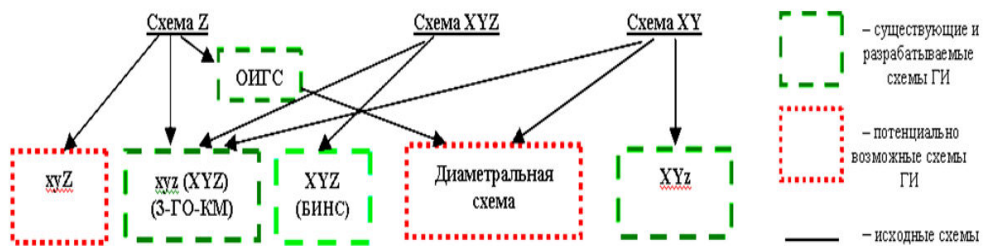


Рис. 9. Представления о сегодняшнем дне и ближайших перспективах развития гироинклинометров для непрерывной съемки

4. Заключение

В заключение сформулируем основные результаты проведенного в статье анализа:

1. Перспективы развития неполных схем, прежде всего XU , связаны: во-первых, с использованием возможностей MEMS-технологий (в связи с чем синтезированные схемы XUz можно было переименовать в трехосные неравноточные), во-вторых, с совершенствованием процессов управления положением СП при съемке. Реализация схемы xuZ в отсутствие серийного ЧЭ с высокой рабочей $t^\circ C$ вероятна, разве что для рудных и т.п. применений. Не закрыта потенциальная возможность реализации «диаметральной схемы», являющейся полной альтернативой трехосным равноточным ГИ.

2. Целесообразность создания равноточных трехосных схем (XYZ) в «нефтегазовом» сегменте не выглядит очевидной вследствие высокой цены разработки и поставки, обусловленной в первую очередь необходимостью применения Z-гироскопа с большим диапазоном измерения, тем более что данные совместных испытаний ГИ XYZ и XUz не выявили явного преимущества XYZ .

3. При создании трехосных схем для «бюджетного» сегмента использование алгоритмов БИНС в ГИ для непрерывной съемки представляется неоправданным, так как схема трехосного гироскопического ориентатора с коррекцией от измерителя ускорений, предложенная авторами, обеспечивает снижение погрешности (по сравнению с БИНС), определяемое главным образом широтой места и в некоторой степени уровнем точности гироскопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 153-39.0-072-01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах, Руководящий документ Министерства энергетики РФ, 2001.
2. <http://www.gyrodata.com>
3. **Непрерывные** гироскопические инклинометры – особенности построения и результаты эксплуатации /А.А.Гуськов [и др.]// НТВ «Каротажник», Тверь: Изд. АИС. Вып. 4(181), 2009.
4. **Биндер, Я.И.**, Падерина Т.В., Розенцвейн В.Г. Высокопроизводительная прецизионная инклинометрическая съемка скважин малого диаметра. Результаты практического внедрения / Я.И.Биндер, Т.В.Падерина, В.Г. Розенцвейн // Гироскопия и навигация. 2009. №1.
5. **Abdelmagd Noureldin**, Dave Irvine-Halliday, Martin Mintchev Accuracy Limitations of FOG-Based Continuous Measurement-While_Drilling Surveying Instruments for Horizontal Wells, IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol. 51, N6, December 2002.
6. <http://www.flexit.se>
7. **Малогобаритные** гироскопические инклинометры, проблемы, концепция развития, результаты разработки и внедрения / Я.И.Биндер [и др.]// Гироскопия и навигация. 2006. №3.
8. **Анучин, О.Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О.Н.Анучин, Г.И. Емельянцев. – СПб.:ЦНИИ «Электронприбор», 2003.
9. **Фрейман, Э.В.** Особенности построения алгоритмов ориентации гироскопических инклинометров на базе одноосного гиросtabilизатора / Э.В. Фрейман, С. В. Кривошеев, В. В. Лосев // Применение гравитационных технологий в геофизике. Сб. статей и докладов. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2002.
10. **Биндер, Я.И.** Бесплатформенный гироскопический инклинометр с ориентацией главной оси двумерного датчика угловой скорости в плоскости поперечного сечения скважины / Я.И.Биндер, Т.В. Падерина // Гироскопия и навигация. 2004, № 2.

11. **Биндер, Я.И.** Универсальный гироскопический датчик угловой скорости в диаметральной плоскости скважины // Гироскопия и навигация. 2005, № 4.
12. **Каракашев, В. А.** Обобщенные уравнения ошибок инерциальных навигационных систем //Изв. вузов. СССР, «Приборостроение», 1973, №3.
13. **Емельянец, Г.И.** Об эффективности использования данных относительного лага в корабельных интегрированных системах ориентации и навигации на основе бескарданных инерциальных модулей / Г.И. Емельянец, О. Н. Анучин. // Гироскопия и навигация 2001, № 3.

Abstract. The paper is devoted to the current design and use of various schemes of gyroscopic inclinometers (GI) performing the continuous survey of wellbores. This research is mostly conditioned by the first Russian-made strapdown small-sized GI UGI 42-03 appearing in the Russian oil and gas market, and the desire to provide a correct and clear description of the system operating principles. Comparative analysis of characteristics of continuous GI, both known and under development, is presented. Now that directional drilling is progressing rapidly and various kinds of wellbores appear in increasing numbers, continuous GI are a unique aid for monitoring the position of arbitrarily-oriented wellbores, and it is an absolute reason to further perfect and introduce these systems. The paper estimates the current state of continuous GI development and reveals the trends and factors influencing their state in future using the detailed analysis of all data available. The outlined regularities may serve as background for designing new types of these systems.