

Универсальный гироскопический инклинометр на базе единственного одноосного датчика угловой скорости

Я. И. Биндер, И. А. Хазов ✉

АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации",
Санкт-Петербург, Россия

✉ IvanHazov@okb3d.com

Аннотация

Введение. Сегодня универсальность и надежность гироскопических инклинометров (ГИ) более, чем точность, определяют их комплектацию и конструктивный облик. Императивные условия универсальности: диаметр 42...44.5 мм и совмещение функций съемки точечной и непрерывной; а безотказность определяется, прежде всего, робастностью основных элементов. Принципиальна "адаптивность" к траектории – "равноточность" в рабочем диапазоне зенитных углов, определяющем выбор ориентации датчиков угловой скорости (ДУС) при их неполном (< 3) числе. По совокупности критериев габаритов и точности сегодня преимущественно применяются двухосные динамически настраиваемые гироскопы, но их упругий подвес при частых операциях "зарезки боковых стволов" (из ранее пробуренных), сопровождаемых ударами большой интенсивности, постепенно деградирует.

Цель работы. Создать недорогой универсальный ГИ, сохраняющий компромисс ударостойкости и точности (сопоставимой с волоконно-оптическими ДУС), на базе одноосного кольцевого вибрационного гироскопа (КВГ) с резонатором индукционного типа, выполненным по MEMS-технологии.

Материалы и методы. Метод многопозиционного компасирования при единственном одноосном ДУС реализуется переходом от одновременных двухосных измерений к одноосным – в пяти последовательных (через 90°) положениях рамки по углу отклонителя. Экспериментальные материалы о дрейфах выбранного КВГ позволяют статистическими методами построить вариацию Аллана, которая подтверждает, что предложенная методика по сравнению с базовой не увеличивает общего времени компасирования. Непрерывный режим такого ГИ, исследованный методами решения дифференциальных уравнений, требует удержания входной оси ДУС около апсидальной плоскости с помощью той же поворотной рамки.

Результаты. Полученные соотношения подтверждают: тактико-технические характеристики ГИ с одноосным ДУС примерно соответствуют традиционной двухосной схеме. К тем же выводам приводят результаты математического моделирования съемки типового нефтегазового ствола.

Заключение. Описанный ГИ, содержащий единственный ДУС с косвенной стабилизацией входной оси, – итог последовательного развития подхода к использованию неполной информации.

Ключевые слова: гироскопический инклинометр, продольная схема, двухосный ДУС, одноосный ДУС, динамически настраиваемый гироскоп, кольцевой вибрационный гироскоп

Для цитирования: Биндер Я. И., Хазов И. А. Универсальный гироскопический инклинометр на базе единственного одноосного датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 133–148. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023; принята к публикации после рецензирования 14.08.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Versatile Gyroinclinometer Based on a Single Axis Angular Rate Sensor

Yakov I. Binder, Ivan A. Khazov ✉

"Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC,
St. Petersburg, Russia

✉ IvanHazov@okb3d.com

Abstract

Introduction. Currently, the versatility and reliability of gyroscopic inclinometers (GI), more than accuracy, determine their configuration and design. Imperative conditions for versatility include a diameter of 42...44.5 mm and a combination of point and continuous survey modes. Reliability is primarily determined by the robustness of the main elements. The fundamental parameter is adaptability to the trajectory, in other words, equal accuracy in the operating range of zenith angles, which determines the choice of orientation of the angular velocity sensors (ARS) with incomplete (< 3) number of their axis. Presently, biaxial dynamically tuned gyroscopes (DNG) are widely used due to their dimension and accuracy criteria; however, their elastic suspension gradually degrades as a result of frequent sidetracking operations (from previously drilled ones) accompanied by high-intensity impacts.

Aim. To develop an inexpensive versatile GI that maintains a balance between shock resistance and accuracy (comparable to fiber-optic ARS) based on a single-axis vibrating ring gyroscope (VRG) with an induction-type resonator made using MEMS technology.

Materials and methods. The method of multi-position compassing with a single uniaxial ARS was implemented by transition from simultaneous biaxial measurements to uniaxial measurements in five successive positions of the frame (through 90°) along the toolface angle. Experimental data on the drifts of the selected VRG allow statistical methods to be used to construct an Allan-variance plot to confirm that the proposed method does not increase the total compassing time compared to the basic one. The continuous mode of such a GI, studied by solving differential equations, requires holding the input axis of the ARS near the apsidal plane using the same rotating frame.

Results. The obtained ratios confirm that the performance characteristics of a GI with a uniaxial ARS approximately correspond to the conventional biaxial scheme. These conclusions were also confirmed by the mathematical modeling of a survey of a typical oil and gas well.

Conclusion. The described GI containing a single ARS with indirect stabilization of the input axis is the result of a consistent development of the approach to the use of incomplete information.

Keywords: gyroinclinometer, longitudinal scheme, two-axis ARS, single-axis ARS, dynamically tuned gyroscope, vibrating ring gyroscope

For citation: Binder Ya. I., Khazov I. A. Versatile Gyroinclinometer Based on a Single Axis Angular Rate Sensor. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 133–148. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-133-148

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 20.03.2023; accepted 14.08.2023; published online 28.09.2023

Введение. Рынки как собственно скважинных гироскопических инклинометров (ГИ), так и соответствующих сервисных услуг переживают в настоящее время вполне определенную стагнацию. Она вызвана, прежде всего, ускорением тенденцией к уменьшению времени строительства новых скважин и, соответственно, к росту удельной стоимости времени скважинных работ. Инклинометрическая съемка ранее пробуренной обсаженной скважины, проводи-

мая с целью окончательной паспортизации ее траектории для реестровых документов, требует обычно от 4...6 ч до полусуток. Это время необходимо для монтажа геофизического подъемника, подготовки устья скважины, тестирования оборудования в устье перед спуско-подъемной операцией (СПО), начальной выставки (гироскопирования (ГК) или внешнего курсоуказания) ГИ, собственно СПО с эксплуатационными и тактико-техническими

ограничениями по скорости, неизбежными запланированными (для повторного ГК и/или коррекции уходов гироскопов) и еще более частыми внеплановыми и т. п. остановками и т. д. [1–3]. Определенное время отнимает камеральная (апостериорная) обработка результатов, а в случае выявления в ее ходе существенных отклонений от прогнозированной траектории может потребоваться и повторный замер. Однако если совсем еще недавно, в начале века, эти часы соответствовали нескольким единицам (а то и долям) процентов от общего времени строительства скважины, что было вполне допустимо, то при нынешних технологиях проходки время съемки может достигать 10 % от общего времени строительства. В совокупности с относительно высокой ценой и известной "капризностью" ГИ (как и любого инерциального модуля) при обслуживании это ведет к тому, что гироинклинометрическая съемка все чаще уступает свою роль так называемой геонавигации [4–6], осуществляемой непосредственно в процессе разбуривания стволов. С помощью целого ряда различных зондов (датчиков, измеряющих скважинные параметры различной физической природы) получают информацию, характеризующую положение, в том числе ориентацию, бурового инструмента относительно продуктивного пласта флюида (нефти или газа), его кровли и подошвы. При этом к точности выработки абсолютных (географических или в местной системе) координат, одновременно получаемых по данным феррозондовых инклинометров в процессе бурения, требования могут быть предъявлены не столь высокие, как при гироинклинометрической съемке обсаженных скважин [7].

Из вышеизложенного, разумеется, не следует делать выводы об утрате профильным рынком интереса к ГИ, использование которых базальтернативно для ряда задач геофизической съемки. Можно отметить другое: более высокими, нежели снижение погрешностей, приоритетами для этого рынка в настоящее время является повышение иных эксплуатационных требований, в частности, к универсальности и надежности ГИ, имеющих определяющее значение для его комплектации и конструктивного облика. Так, в XXI в. универ-

сальным может считаться только прибор с диаметром 42...44.5 мм (1.75" по стандарту SPE). Это условие императивное. Далее следует упомянуть требование совмещения функций съемки точечной и непрерывной [8]. Последняя уже давно считается обеспечивающей максимально возможную для имеющегося набора датчиков первичной информации (ДПИ) точность, но ее нижней границей остается погрешность точечного ГК при начальной выставке. Значимым для универсального ГИ следует считать и необходимость обеспечения его "равноточности" во всем диапазоне зенитных углов скважины – от вертикального положения в устье ($\theta = 0^\circ$) до сколь угодно близких к 90° (и даже превышающих его на "восходящих" стволах) зенитных углов. При этом необходимо принять во внимание, что значениями θ однозначно определяется предпочтительность той или иной ориентации гироскопических датчиков угловой скорости (ДУС) при неполном (< 3) числе их входных осей [9].

Наконец, еще одна, постоянно ставящаяся перед ГИ задача: азимутальная выставка "клина-отклонителя" при зарезке бокового ствола (ЗБС) из ранее (чаще всего, давно) пробуренного вертикального ствола [10–12]. При ее решении взаимные противоречия базовых требований, предъявляемых к ГИ, достигают апогея. Дело в том, что ЗБС сопровождается интенсивным (до 100 кН) ударным воздействием [13–15], возникающим при срезании шпильки, с помощью специальной оснастки закрепляющей корпус ГИ на теле клина-отклонителя. Удары для традиционных гироскопов, обладающих механическим подвесом, в принципе неблагоприятны, причем по мере роста требований к точности ДУС при одних и тех же воздействиях приходится переходить от проблематики ударостойкости к категории ударопрочности. Ожидания потребителей при выставке клина-отклонителя (несколько градусов, до пяти и даже выше), казалось бы, не очень высоки, но единственный способ их удовлетворения – точечное компасирование, погрешность которого зависит от дрейфа ДУС следующим образом [16]: $\Delta A = \Delta\omega / (\Omega \cos \varphi)$, где A – азимут скважины; Ω – угловая скорость вращения Земли; φ – широта места; $\Delta\omega$ – уход ДУС.

Таким образом, принимая во внимание регионы преимущественного нефтегазового залежания России, приходим к выводу об уровне требований к уходу ДУС, каковые вполне можно отнести к навигационно-тактическому классу – $0.2...0.5$ °/ч [17, 18]. Однако упомянутые требования по ударостойкости при ЗБС сегодня коррелируются только с производимыми в соответствии с MEMS-технологиями микромеханическими гироскопами, наиболее прецизионные (и – назовем вещи своими именами – практически недоступные на открытом рынке) из которых пока еще не менее чем на порядок уступают по точности требуемым вышеприведенным характеристикам [19]. В этих условиях, с учетом массогабаритных и иных эксплуатационных ограничений самым востребованным, а по существу – единственным ДУС, нашедшим применение в универсальных ГИ, как в отечественных (МИГ-42, УГИ-42), так и в зарубежных ГИ (RGS-CT, Gyrodata, USA, SPT 007/42, SPT, Stockholm) стал двухосный динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ). Будучи установлен на поворотной рамке при ориентации вектора кинетического момента по оси скважины, он реализует так называемую продольную (или XY) схему [9], позволившую, хотя и известными изъятиями, добиться универсального использования ГИ. Среди ДНГ удалось найти гироскопы, позволяющие вписаться в трубные корпуса ГИ с указанными выше диаметрами, с приемлемыми для скважинной навигации точностными характеристиками и термоустойчивостью. Однако упругий подвес ДНГ чрезвычайно чувствителен к внешним механическим нагрузкам, в силу чего сопровождающие выставку клина-отклонителя значительные ударные воздействия приводят к его постепенной деградации и потере точностных характеристик прибора после некоего ограниченного числа операций ЗБС. Последующие попытки вернуться к использованию такого ГИ для инклинометрической съемки, требуемая точность которой существенно выше, обычно не дают приемлемого результата. Дальнейшее использование прибора для таких задач потребует его дорогостоящего заводского ремонта, сопровождаемого, как правило, заменой гироскопа. Но и отказавшись от задач съемки в пользу постоянного

использования ГИ для ЗБС, нельзя быть уверенным в том, что он будет соответствовать своим расчетным ресурсным характеристикам.

Цель работы. Занимаясь в течение длительного времени вопросами разработки, изготовления и эксплуатации ГИ, авторы данной статьи понимали, что скорейшее достижение принципиально новых потребительских качеств, и прежде всего сочетания желаемого уровня эксплуатационной надежности с универсализацией этих приборов, возможно только по мере интеграции MEMS-технологий в каком-то из сегментов инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ).

Теперь, когда появились кольцевые вибрационные гироскопы (КВГ) с ЧЭ индукционного типа, выполненными по MEMS-технологии, с неограниченной практически ударопрочностью, высокой ударо- и термоустойчивостью и стабильностью дрейфа, сопоставимой с волоконно-оптическими и лазерными ДУС ($\sim 10^{-1}$ °/ч), проблема создания дешевого, робастного ГИ, пригодного для решения любых задач позиционирования скважин, может быть решена [20].

Гироскоп с одноосным ДУС. Приступая к обсуждению конструктивного облика, кинематической схемы, режимов управления и алгоритмов обработки информации проектируемого ГИ, выделим определяющие технические новации, либо вновь привнесенные в разработку, либо ранее просто не использовавшиеся. К первым следует отнести то, что, оставаясь единственным, новый ДУС, в отличие от ДНГ, является одноосным. Ко вторым – функциональное расширение применения поворотной рамки, режим использования которой при стандартном построении продольной схемы ГИ – многопозиционное компасирование [16] в точечном режиме (в УГИ-42.03 еще и в непрерывном режиме для автокомпенсации "корпусных" дрейфов по методу МУДР [21, 22]). В совокупности эти базовые свойства разработки подсказывают направление поиска новой схемы ГИ, использующей единственный одноосный ДУС, что заметно удешевляет изделие, а также упрощает его схемно-конструктивное исполнение, позитивно сказываясь на надежности.

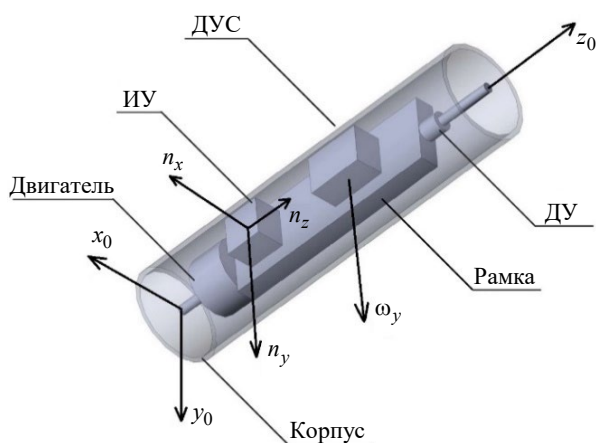


Рис. 1. ГИ с одноосным ДУС

Fig. 1. Gyroinclinometer with a single-axis angular rate sensor

Предлагаемая кинематическая схема скважинного прибора (СП) ГИ приведена на рис. 1.

Основным элементом конструкции является подвижная рамка, которая разворачивается с помощью двигателя с редуктором вокруг продольной оси на заданный угол, измеряемый датчиком угла (ДУ) поворота. На рамке размещается одноосный ДУС с осью чувствительности, лежащей в плоскости поперечного сечения СП, блок акселерометров (измеритель ускорений трехосный, ИУТ) и электронные платы. В точечном режиме работы ГИ развороты рамки должны обеспечить многопозиционное ГК, аналогично традиционной продольной (ХУ) схеме с двухосным ДУС [9], однако, в отличие от нее, возможность управления положением рамки в одноосной схеме – условие, необходимое для самого ее существования.

На рис. 1 не показан токоподвод, осуществляющий транзит питающих и сигнальных токоведущих линий между подвижной и неподвижной составными частями ГИ. Основой для его конкретного исполнения могут быть различные физические принципы гальванической или бесконтактной (индуктивной, оптической и т. д.) связи, которые здесь не рассматриваются. Принципиальным для дальнейшего синтеза алгоритмов управления ГИ в различных режимах является наличие или отсутствие ограничения для разворота токоподвода. Как следует из дальнейшего изложения, точечный режим ГК может быть обеспечен не только при неограниченной свободе вращения рамки, но и

при использовании "гибкого жгута", ограничивающего ее не более чем одним оборотом.

В непрерывном режиме выходные сигналы ДУС, ИУТ и ДУ поступают в бортовой вычислитель, где формируется закон управления приводом разворота рамки, парирующий вращение СП вокруг его продольной оси, вызванное, главным образом, так называемым моторным эффектом (крутильными колебаниями геофизического кабеля, на котором производится СПО ГИ). Это необходимо для удержания оси чувствительности ДУС в требуемом положении, т. е. в апсидальной плоскости (АП) ГИ [9]. В связи с ожидаемым выводом на рынок ГИ с обоими типами токоподводов следует обратить внимание на то, что возможность неограниченного вращения рамки сводит необходимый закон управления ею к "грубой" стабилизации около АП. Конструктивно более простой – назовем его "бюджетным" – вариант ГИ с "гибким жгутом", рекомендуемый потребителю, специализирующемуся на проведении точечных замеров (например, при ранее упомянутой выставке клина-отклонителя), в общем случае требует в непрерывном режиме реализации нетривиальных алгоритмов управления движением рамки. Их рассмотрение не является предметом данной статьи, а включение в комплект поставки программного обеспечения, реализующего эти алгоритмы, предполагается опционально – по запросу потребителя.

Многопозиционное компасирование на наклонном участке скважины. Под "точечным" в инклинометрической практике понимается проведение измерений на остановках в выбранных согласно тем или иным критериям точках траектории. "Многопозиционным" принято называть нахождение азимута методом компасирования при определенных ориентациях гироскопа(ов) с последующей совместной обработкой результатов этих измерений в целях повышения точности.

В условиях остановки в точках траектории скважины единственным способом управления ориентацией ДУС являются конструктивно предусмотренные развороты по углу "отклонителя" (ψ) рамки, на которой установлены инерциальные элементы (рис. 2). Далее приводятся сопровождаемые некоторыми аналитическими выкладками соображения, обосновывающие пред-

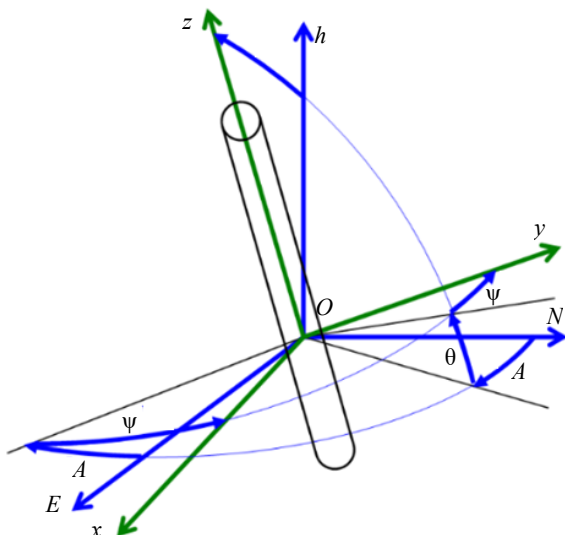


Рис. 2. Скважинная система координат

Fig. 2. Borehole coordinate system

лагаемые методики многопозиционного компасирования схемы с одним одноосным ДУС.

Как и упомянутые здесь же для сопоставления методики, ранее разработанные для двухосных ДУС, они используют ту же аксиоматику [23]: g -зависимые дрейфы полагаются только систематическими, т. е. все коэффициенты их модели дрейфа считаются константами, заранее определенными при заводской калибровке, а так называемый корпусный, не связанный с ориентацией гироскопа относительно вектора силы тяжести, уход является суммой случайной константы и линейного тренда с постоянной на ограниченном промежутке времени случайной скоростью.

Далее приведем основные соотношения, необходимые для описания режима точечного компасирования, независимо от количества используемых ДУС, их ориентации и т. д.

Три угла (рис. 2): азимут A , зенитный угол θ и угол ψ определяют положение системы координат $Oxyz$, связанной с корпусом СП, относительно географического трехгранника ENh [16]. На основании полученных значений A , θ в каждой точке проведения измерения с помощью ГИ, а также длины колонны труб или геофизического кабеля формируются координаты траектории скважины.

Углы θ и ψ вычисляются по показаниям составляющих ускорения свободного падения n_x , n_y , n_z , измеряемых ИУТ:

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{n_y}{n_x}\right); \theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z}\right).$$

Проекции угловой скорости вращения Земли Ω на оси $Oxyz$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \sin \psi - \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \cos \psi + \cos A \cos \theta \sin \psi) + \Delta \omega_x; \\ \omega_y &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \cos \psi + \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \sin \psi + \cos A \cos \theta \cos \psi) + \Delta \omega_y; \\ \omega_z &= \Omega \sin \varphi \cos \theta - \Omega \cos \varphi \sin \theta \cos A + \Delta \omega_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta \omega_i$ ($i=x, y, z$) – проекции дрейфа ДУС на соответствующие оси.

Уравнения (1) подсказывают идею компасирования при наличии единственного одноосного ДУС с измерительной осью, расположенной в плоскости поперечного сечения СП. Если в схеме XY однократное вычисление $\sin A$, $\cos A$ принципиально возможно при любых углах ψ , то в данном случае базовый алгоритм требует выполнения измерений при двух значениях этого угла, которым, в целях максимизации "наблюдаемости", желательно отличаться друг от друга на 90° .

Сопутствующая задача, чрезвычайно важная с точки зрения точности компасирования, – исключение влияния не зависящих от силы тяжести дрейфов ДУС – также решается с помощью дополнительных разворотов на углы, кратные 90° , аналогично тому, как это реализовано в схеме XY. В ней, напомним, используются развороты рамки: от положения (обозначим его ψ_{01}), в котором производится первое измерение, осуществляется разворот на 180° (в положение ψ_{180}) для второго измерения, а затем – возврат в начальное положение (ψ_{02}) для третьего измерения [23].

Из (1) нетрудно получить следующий алгоритм:

$$\omega_i = \frac{\omega^i_{\psi_{01}} + \omega^i_{\psi_{02}} - \omega^i_{\psi_{180}}}{2},$$

где $i = [x, y]$. Результатом его использования является компасирование, свободное от влия-

ния g -независимых дрейфов гироскопа $\Delta\omega_i$ в предположениях о том, что их модель соответствует зависимости

$$\Delta\omega_i = \Delta\omega_{0i} + \Delta\dot{\omega}_{0i}\tau, \quad (2)$$

где $\Delta\omega_{0i}$ – постоянная составляющая ухода гироскопа; $\Delta\dot{\omega}_{0i}$ – составляющая ухода, линейно меняющаяся со временем.

При этом время проведения компасирования τ в каждой точке не меняется, будучи много больше времени перевода рамки из точки в точку.

В схеме с одним одноосным ДУС, являющейся предметом данной статьи, для аналогичного построения ГИ потребуется использование пяти положений по углу отклонителя. Это позволяет получать значения азимута скважины, свободные от влияния g -независимого дрейфа гироскопа, который на сравнительно малом интервале времени (о его длительности см. далее) можно описать выражением (2).

С учетом (2) в пяти последовательных положениях рамки по углу отклонителя, т. е. добавив к ранее введенным $(\psi_{0_1}, \psi_{180}, \psi_{0_2})$ ψ_{90} и ψ_{270} , получаем следующие выражения для выходного сигнала ДУС:

$$\begin{cases} \omega_{0_1} = \omega_{x_1} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0\tau; \\ \omega_{90} = \omega_{x_2} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 2\tau; \\ \omega_{180} = -\omega_{x_1} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 3\tau; \\ \omega_{270} = -\omega_{x_2} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 4\tau; \\ \omega_{0_2} = \omega_{x_1} + \Delta\omega_0 + \Delta\dot{\omega}_0 5\tau, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \omega_{x_1} &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \sin \psi_{0_1} - \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \cos \psi_{0_1} + \cos A \cos \theta \sin \psi_{0_1}) + \Delta\omega_{x_1}; \\ \omega_{x_2} &= \Omega \sin \varphi \sin \theta \cos \psi_{0_1} + \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\sin A \sin \psi_{0_1} + \cos A \cos \theta \cos \psi_{0_1}) + \Delta\omega_{x_2}; \end{aligned}$$

$\Delta\omega_{x_1}, \Delta\omega_{x_2}$ – некомпенсированные составляющие ухода гироскопа.

Пять уравнений (3) содержат 4 неизвестных $\omega_{x_1}, \omega_{x_2}, \Delta\omega_0, \Delta\dot{\omega}_0$. Такая система с избы-

точностью может быть решена любым методом оценивания, в частности методом наименьших квадратов. Здесь же покажем принципиальную возможность определения ω_{x_1} и ω_{x_2} :

$$\begin{aligned} \omega_{x_1} &= \frac{\omega_{0_1} + \omega_{0_2} - \omega_{180}}{2}; \\ \omega_{x_2} &= \frac{\omega_{90} - \omega_{270}}{2} + (\omega_{180} - \omega_{0_1} + 2\omega_{x_1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения желательной длительности компасирования τ имеет смысл руководствоваться критериями достижения допустимого уровня погрешностей кривыми вариации Аллана для ДУС (например, рис. 3) и ИУТ (например, рис. 4). В то же время, необходимо принимать во внимание и эксплуатационные соображения, в данном случае – ограничение времени точечного компасирования, определяемое предельным временем, выделяемым для съемки скважины, и заданным количеством точек. Как правило (исключение – начальная выставка в устье скважины), время для обработки одной точки траектории не должно превышать 4 мин. По совокупности изложенных здесь соображений, в данном случае полагаем $\tau = 40$ с.

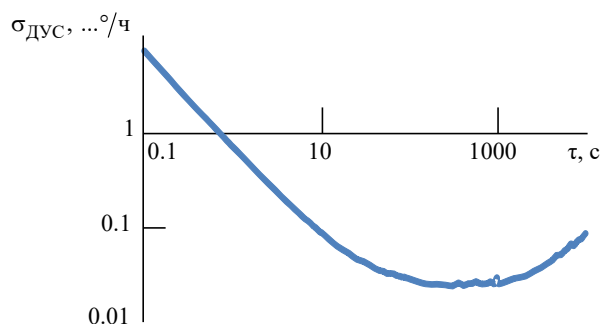


Рис. 3. Вариация Аллана для ДУС

Fig. 3. Allan Variance for angular rate sensor

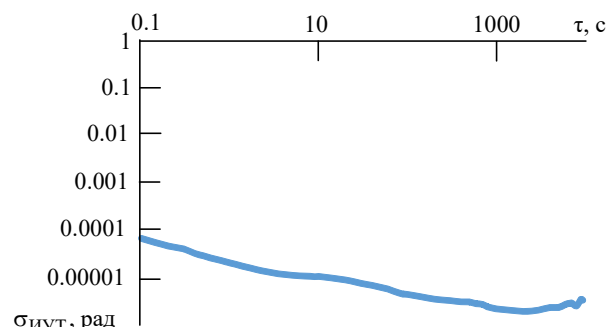


Рис. 4. Вариация Аллана для акселерометра

Fig. 4. Allan Variance for accelerometer

С учетом (4) получим следующие выражения для вычисления тригонометрических функций $\sin A$ и $\cos A$ в этой схеме:

$$\sin A = \frac{-\omega_{x1} \cos \psi_{01} + \omega_{x2} \sin \psi_{01}}{\Omega \cos \varphi}; \quad (5)$$

$$\cos A = \frac{\omega_{x1} \sin \psi_{01} + \omega_{x2} \cos \psi_{01} - \Omega \sin \varphi \sin \theta}{\Omega \cos \varphi \cos \theta}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) получим формулу для вычисления $\operatorname{tg} A$:

$$\operatorname{tg} A = \frac{(-\omega_{x1} \cos \psi_{01} + \omega_{x2} \sin \psi_{01}) \cos \theta}{\omega_{x1} \sin \psi_{01} + \omega_{x2} \cos \psi_{01} - \Omega \sin \varphi \sin \theta}. \quad (7)$$

Легко показать, что при использовании в ГИ одного одноосного ДУС режим точечного компасирования, построенный в соответствии с алгоритмами (5), (7), обладает всеми свойствами продольной схемы (ХУ) на базе двухосного ДУС [16].

Варьируя (5) и (7), получим соответственно следующие выражения для погрешности ΔA :

$$\Delta A \cos A = \frac{-\Delta \omega_{x1} \cos \psi_{01} + \Delta \omega_{x2} \sin \psi_{01}}{\Omega \cos \varphi} + \frac{\Delta n_{xy}}{g \sin \theta} (\cos \theta \cos A + \operatorname{tg} \varphi \sin \theta); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta A = & \frac{-\Delta \omega_{x1}}{\Omega \cos \varphi \cos \theta} \times \\ & \times (\cos A \cos \theta \cos \psi_{01} + \sin A \sin \psi_{01}) + \\ & + \frac{\Delta \omega_{x2} (\cos A \cos \theta \sin \psi_{01} - \sin A \cos \psi_{01})}{\Omega \cos \varphi \cos \theta} + \\ & + \frac{\Delta n_{xy}}{g \sin \theta} \times \\ & \times \left(\sin \theta \cos A \operatorname{tg} \varphi + \frac{\sin^2 A + \cos^2 A \cos^2 \theta}{\cos \theta} \right) + \\ & + \frac{(\Delta n_{yx} \cos \theta + \Delta n_z \sin \theta) \sin A}{g \cos \theta} \times \\ & \times (\cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \sin \theta \cos A), \quad (9) \end{aligned}$$

где $\Delta n_{xy} = \Delta n_x \cos \psi_{01} - \Delta n_y \sin \psi_{01}$; $\Delta n_{yx} = \Delta n_x \times \sin \psi_{01} + \Delta n_y \cos \psi_{01}$ – ошибки ИУТ, приведенные к апсидальной плоскости ($\Delta n_x, \Delta n_y,$

Δn_z – погрешности соответствующих акселерометров).

Анализ погрешностей (8), (9) показывает, что в рассматриваемой схеме, как и в схеме ХУ, при условии $|\operatorname{tg} A| < \left| \frac{1}{\cos \theta} \right|$ для измерения азимута скважины целесообразно воспользоваться алгоритмом (5), погрешность которого не зависит от $\sec \theta$, в противном случае – алгоритмом (7) [16].

Для применяемого в схеме ДУС справедливо соотношение

$$\sigma_{\Delta \omega_{x1}}^2 = \sigma_{\Delta \omega_{x2}}^2 = \sigma_{\Delta \omega_x}^2,$$

где $\sigma_{\Delta \omega_x}^2$ – дисперсия погрешности ДУС. Следовательно, дисперсии ΔA , вычисляемые по (8) и (9), при учете только погрешностей ДУС $\Delta \omega_{x1}$ и $\Delta \omega_{x2}$ будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta A}^2 &= \frac{\sigma_{\Delta \omega_x}^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 A}; \\ \sigma_{\Delta A}^2 &= \frac{\sigma_{\Delta \omega_x}^2 (\sin^2 A + \cos^2 A \cos^2 \theta)}{\Omega^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \theta}. \end{aligned}$$

Данные формулы подтверждают сделанное ранее предположение об идентичности точностных характеристик рассматриваемого построения ГИ с одним одноосным ДУС и схемы ХУ. При этом имеется в виду, что учет погрешностей ИУТ для обоих вариантов ГИ особенностей не имеет.

Многопозиционное компасирование на вертикальном участке скважины. Под "вертикальными" в геофизической практике понимаются стволы скважин, зенитный угол которых составляет первые единицы градусов. Численные характеристики "вертикальности" варьируются в зависимости от ряда факторов: конкретной задачи, режима перемещения ГИ, инструментальных погрешностей ИУТ и т. д., однако они не имеют принципиального значения. Практически все нефтегазовые стволы (а это более 90 % протяженности скважин всех видов и разного назначения) забуриваются вер-

тикально, да и в целом ряде случаев математическое ожидание зенитного угла на весьма протяженных участках траектории является нулевым. В частности, это касается задачи выставки клина-отклонителя, упомянутой во вводной части настоящей статьи. Это связано с тем, что забуривание так называемых вторых стволов чаще всего производится из номинально вертикальных "первых" стволов старого фонда.

Как бы то ни было, из рис. 2 очевидно, что при $\theta \rightarrow 0$ угол A вырождается, и при этом уравнения (1) теряют информационный смысл. В этом случае вместо ранее введенных для наклонного участка скважины углов Эйлера имеет смысл ввести углы μ , ν и Φ (рис. 5) [24] и матрицу направляющих косинусов C_k^h между трехгранниками ENh и $Oxyz$:

$$C_k^h = \begin{matrix} & x & y & z \\ E \left[\begin{array}{ccc} \cos \nu \cos \Phi & -\cos \nu \sin \Phi & \sin \nu \\ \cos \mu \sin \Phi + \sin \mu \sin \nu \cos \Phi & \cos \mu \cos \Phi - \sin \mu \sin \nu \sin \Phi & -\cos \nu \sin \mu \\ \sin \mu \sin \Phi - \cos \mu \sin \nu \cos \Phi & \sin \mu \cos \Phi + \cos \mu \sin \nu \sin \Phi & \cos \nu \cos \mu \end{array} \right. \end{matrix}$$

Здесь руководствуемся следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \sin \mu &= \frac{n_x \sin \Phi + n_y \cos \Phi}{g}; \\ \sin \nu &= \frac{-n_x \cos \Phi + n_y \sin \Phi}{g \cos \mu}, \end{aligned} \quad (10)$$

где n_x , n_y – выходные сигналы ИУТ по осям Ox и Oy соответственно.

Составляющие угловой скорости по осям Ox и Oy системы координат $Oxyz$ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega \sin \varphi \times \\ &\times (\sin \mu \sin \Phi - \cos \mu \sin \nu \cos \Phi) + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\cos \mu \sin \Phi + \sin \mu \sin \nu \cos \Phi); \\ \omega_y &= \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\cos \mu \cos \Phi - \sin \mu \sin \nu \sin \Phi) + \\ &+ \Omega \sin \varphi (\sin \mu \cos \Phi + \cos \mu \sin \nu \sin \Phi). \end{aligned} \quad (11)$$

Для схемы с одним одноосным ДУС по аналогии с (3) справедливы соотношения

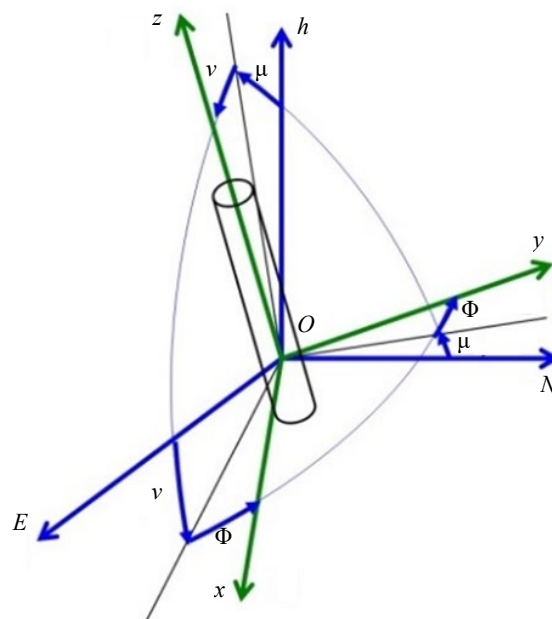


Рис. 5. Система координат для съемки вертикальных скважин

Fig. 5. Coordinate system for vertical wells surveying

$$\begin{aligned} \omega_{x1} &= \Omega \sin \varphi \times \\ &\times (\sin \mu \sin \Phi_0 - \cos \mu \sin \nu \cos \Phi_0) + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\cos \mu \sin \Phi_0 + \sin \mu \sin \nu \cos \Phi_0); \\ \omega_{x2} &= \Omega \cos \varphi \times \\ &\times (\cos \mu \cos \Phi_0 - \sin \mu \sin \nu \sin \Phi_0) + \\ &+ \Omega \sin \varphi (\sin \mu \cos \Phi_0 + \cos \mu \sin \nu \sin \Phi_0), \end{aligned} \quad (12)$$

где Φ_0 – значение угла Φ в начале процедуры компасирования, которое определяет положение клина-отклонителя.

Тригонометрические функции для определения угла Φ_0 , исходя из (10)–(12), будут иметь вид

$$\begin{aligned} \sin \Phi_0 &= \frac{\omega_{x1} g - n_x \Omega \sin \varphi}{\Omega g \cos \varphi}; \\ \cos \Phi_0 &= \frac{\omega_{x2} g - n_y \Omega \sin \varphi}{\Omega g \cos \varphi}. \end{aligned}$$

И, следовательно, вычисление угла Φ_0 осуществляется с использованием алгоритма

$$\Phi_{01} = \arctg \frac{\omega_{x1} g - n_x \Omega \sin \varphi}{\omega_{x2} g - n_y \Omega \sin \varphi}. \quad (13)$$

Варьируя (13), получим:

$$\Delta\Phi_0 = \frac{\Delta\omega_{x1} \cos \Phi_0 - \Delta\omega_{x2} \sin \Phi_0}{\cos \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \left(\frac{\Delta n_x}{g} \cos \Phi_0 - \frac{\Delta n_y}{g} \sin \Phi_0 \right). \quad (14)$$

При использовании равенства $\sigma_{\Delta\omega_{x1}}^2 = \sigma_{\Delta\omega_{x2}}^2 = \sigma_{\Delta\omega_x}^2$ выражение для дисперсии $\Delta\Phi_0$, учитывающее в (14) только погрешности $\Delta\omega_{x1}$, $\Delta\omega_{x2}$, будет иметь вид

$$\sigma_{\Delta\Phi_0}^2 = \frac{\sigma_{\Delta\omega_x}^2}{\Omega^2 \cos^2 \varphi}. \quad (15)$$

Представленный алгоритм вычисления угла Φ_0 (13) и полученное выражение для его погрешности (15) подтверждают отсутствие каких-либо ограничений при использовании одного одноосного ДУС в процессе компасирования на вертикальных участках скважин.

Результаты натурного моделирования.

С целью оценки погрешности режима точечного компасирования при использовании ГИ с одноосным ДУС была проведена экспериментальная проверка этого режима при установке кольцевого вибрационного микромеханического гироскопа на делительной головке, планшайба которой была выставлена относительно севера с помощью гиротеодолита.

Эксперимент проходил в условиях стенда (широта места расположения – 60° с. ш.) при комнатной температуре, начальное положение планшайбы делительной головки, на которой устанавливался ДУС, соответствовало условному нулевому положению (ψ_{01}) измерительной оси гироскопа в плоскости горизонта. Планшайба вместе с ДУС разворачивалась вокруг оси, нормальной к плоскости горизонта, относительно начального положения соответственно на углы 90° (ψ_{90}), 180° (ψ_{180}), 270° (ψ_{270}) и снова возвращалась в начальное положение (ψ_{02}) – эти положения соответствуют режиму

разворота рамки с одноосным ДУС по углу отклонителя при точечном компасировании в реальной скважине. Время осреднения выходного сигнала гироскопа в каждом положении измерительной оси ДУС составляло $\tau = 40$ с.

Таким образом, имитировался режим многопозиционного компасирования в точке "скважины" ψ_{01} . С использованием выражений (4) были получены значения ω_{x1} , ω_{x2} и в соответствии с выражением $A = \arctg \frac{\omega_{x1}}{\omega_{x2}}$ вычислялся "азимут" данной точки.

Разворачивая планшайбу в горизонте последовательно с дискретностью 10° и повторяя в каждом положении указанные ранее действия, можно получить рассчитанные значения азимута в точках "скважины", погрешности которых определялись с учетом известного эталонного значения азимута.

Результаты натурного моделирования приведены в таблице. По результатам данного эксперимента погрешности вычисления азимута ΔA в представленных точках "скважины" при использовании одного ДУС и пяти последовательных разворотов его измерительной оси по углу отклонителя не превысили значения $\pm 1.09^\circ$, что вполне отвечает современным требованиям к точности съемки скважин произвольной ориентации [25].

Непрерывная съемка наклонных стволов скважин. В непрерывном режиме работы ГИ составляющие угловой скорости вращения связанной с корпусом СП системы координат $Oxyz$ определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\theta} \cos \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \sin \psi - \\ &- \Omega \cos \varphi (\sin A \cos \psi - \cos A \cos \theta \sin \psi); \\ \omega_y &= -\dot{\theta} \sin \psi + (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \sin \theta \cos \psi + \\ &+ \Omega \cos \varphi (\sin A \sin \psi + \cos A \cos \theta \cos \psi); \\ \omega_z &= (\Omega \sin \varphi - \dot{A}) \cos \theta - \dot{\psi} - \Omega \cos \varphi \cos A \sin \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

В ГИ с одной измерительной осью ДУС, лежащей в поперечной плоскости СП, алгоритм вычисления азимута может быть получен с использованием одного из первых двух уравнений (16), например:

Результаты натурного моделирования режима компасирования
 Results of compassing mode test

Сигнал ДУС в положении, ...°/ч					Расчет, ...°/ч		$\Delta A, \dots^\circ$
Ψ_{01}	Ψ_{90}	Ψ_{180}	Ψ_{270}	Ψ_{02}	ω_{x1}	ω_{x2}	
5.468	13.165	5.414	-2.033	5.548	0.047	7.639	0.35
6.97	12.954	4.309	-1.786	6.922	1.319	7.347	0.18
8.112	12.464	2.879	-1.377	8.272	2.657	7.002	0.78
9.129	11.914	1.934	-0.914	9.299	3.64	6.499	-0.75
10.287	11.553	0.879	-0.07	10.298	4.707	5.818	-1.03
11.528	10.429	-0.056	0.58	11.524	5.791	4.923	-0.37
12.115	9.427	-1.054	1.836	11.965	6.547	3.721	0.39
12.734	8.218	-1.239	3.077	12.438	6.913	2.424	0.68
12.907	6.834	-1.721	4.397	12.75	7.275	1.141	1.09
13.165	5.414	-2.033	5.548	13.262	7.623	-0.019	0.14

$$\dot{A} \sin \theta \cos \psi = -\dot{\theta} \sin \psi + \Omega \sin \phi \sin \theta \cos \psi + \Omega \cos \phi (\sin A \sin \psi + \cos A \cos \theta \cos \psi) - \omega_y. \quad (17)$$

Из первичного рассмотрения соотношения (17), выбранного для реализации алгоритма ГИ, очевидно, что при произвольном изменении угла поворота отклонителя (ψ) рассматриваемая схема с одноосным ДУС – в отличие от продольной схемы ХУ с двухосным ДУС, реализующей режим бесплатформенного ГИ [9], – неработоспособна. Для ее реализации требуется избегать значений $\cos \psi$, приближающихся к 0, т. е. управлять положением рамки относительно корпуса СП, компенсируя попадания последнего в неблагоприятные зоны. Очевидно, что наиболее естественным, с точки зрения максимизации точности ГИ, в этом случае является приблизительное удержание положения $|\cos \psi| = 1$ с помощью мотор-редуктора, управляемого вычисляемыми по данным ИУТ значениями ψ , т. е. грубая стабилизация.

Проварьбуем выражение (17), пренебрегая, с учетом времени работы $t \ll \frac{2\pi}{\Omega \cos \phi}$, членами с Ω по сравнению с угловыми скоростями изменения параметров ориентации и полагая $\psi = \Delta\psi$ (где $\Delta\psi$ – ошибка системы стабилизации). При этом учтем, что последняя есть малый угол рассогласования действительного и заданного положений рамки, обусловленный

"алгоритмической" (заведомым упрощением) или аппаратной "грубостью" системы стабилизации, но известный с погрешностью ИУТ:

$$\Delta \dot{A} \sin \theta + \Delta \theta \dot{A} \cos \theta = -\dot{\theta} \Delta \psi - \Delta \omega_y. \quad (18)$$

Известные выражения для погрешностей $\Delta \theta$ и $\Delta \psi$ [9], применительно к условиям "грубой" стабилизации, будут иметь вид:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta n_y}{\cos \theta}; \quad \Delta \psi = \frac{\Delta n_x}{\sin \theta}. \quad (19)$$

Теперь, подставляя (19) в (18) и сравнивая его решение в квадратурах с выражением для "промаха в плане" схемы ХУ, представленным в [9], легко убедиться в их фактической идентичности:

$$\alpha = \Delta A_0 \sin \theta - \sin \theta \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{\Delta n_x d\theta}{\sin^2 \theta} - \sin \theta \int_{A_0}^A \frac{\Delta n_y dA}{\sin \theta} - \sin \theta \int_0^t \frac{\Delta \omega_y dt}{\sin \theta}. \quad (20)$$

Выбор для ИУТ акселерометров со сравнительно малыми (по отношению к корректно сопоставленным гироскопическим составляющим) инструментальными погрешностями, являющийся системообразующим фактором при проектировании ГИ, в настоящее время легко достижим уже на базе MEMS-технологий. Поэтому основная погрешность режима непрерывной съемки рассматриваемого ГИ для углов θ , не очень близких к 0° , будет, как и в схеме

ХУ, определяться дрейфом ДУС $\Delta\omega_y$ в процессе движения СП и погрешностью начальной выставки ΔA_0 , которая при автономном способе ее осуществления формируется дрейфом того же ДУС при осуществлении точечного компасирования.

Имитационное моделирование непрерывной съемки наклонных стволов скважин. Для верификации приведенных ранее расчетных оценок было проведено имитационное моделирование.

Приведем результаты моделирования работы такой схемы при съемке скважины, типичной для Быстринского месторождения (ХМАО), угловые параметры которой показаны на рис. 6 и 7 (начальное значение зенитного угла составляет 5°). Поворот корпуса СП вокруг продольной оси по углу отклонителя показан на рис. 8.

На рис. 9, 10 приведены погрешности съемки данной скважины при движении СП со скоростью 1 м/с, а также при применении в ГИ ЧЭ со следующими инструментальными погрешностями:

- постоянная ошибка одноосного ДУС (3σ) – $0.1^\circ/\text{ч}$;
- постоянная ошибка акселерометров (3σ) – $4.4 \cdot 10^{-4} g$;
- шум акселерометров (1σ) – $10'$.

В результате применения схемы ГИ при съемке рассматриваемой скважины:

- ошибка определения координат в плане $\Delta S = \sqrt{\Delta S_N^2 + \Delta S_E^2}$ (где $\Delta S_E, \Delta S_N$ – соответственно погрешности восточной и северной составляющих декартовых координат скважины) при глубине ствола 690 м не превышает значения 1.1 м (рис. 9);
- погрешность угла азимута A , накопленная за время проведения непрерывной съемки, не превышает 0.23° (рис. 10).

Что же касается стволов скважин, близких к вертикальным, то по известным причинам (см. второе слагаемое в (20)) их непрерывная съемка сопряжена с трудностями, возможности разрешения которых подробно исследовались, в том числе в более ранних работах авторов данной статьи [9].

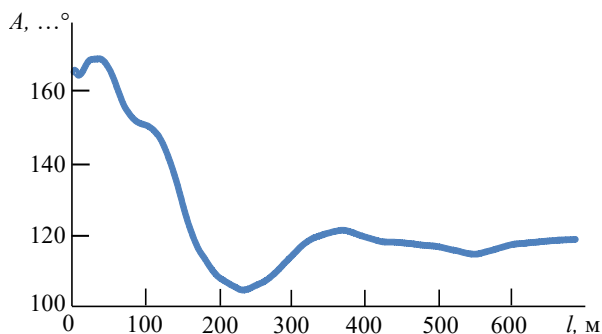


Рис. 6. Угол азимута в зависимости от глубины скважины
 Fig. 6. Azimuth angle relative to borehole depth

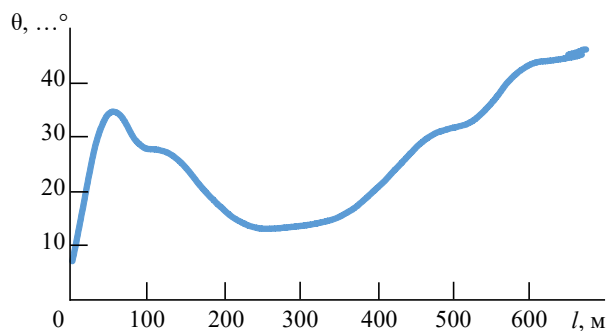


Рис. 7. Зенитный угол в зависимости от глубины скважины
 Fig. 7. Borehole inclination relative to borehole depth

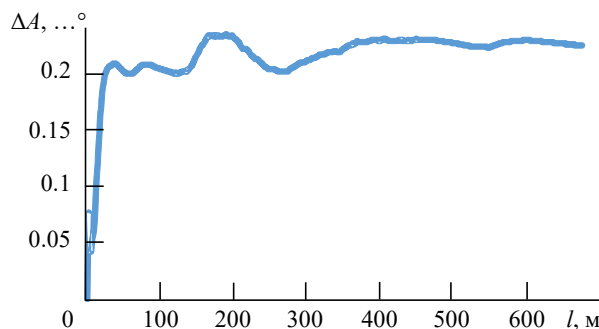


Рис. 8. Погрешность азимута в зависимости от глубины скважины

Fig. 8. Azimuth error relative to borehole depth

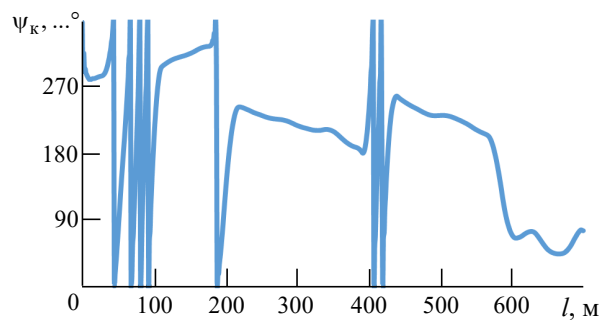


Рис. 9. Угол разворота корпуса СП вокруг продольной оси в зависимости от глубины скважины

Fig. 9. Inclinator body rotation angle around the longitudinal axis relative to borehole depth

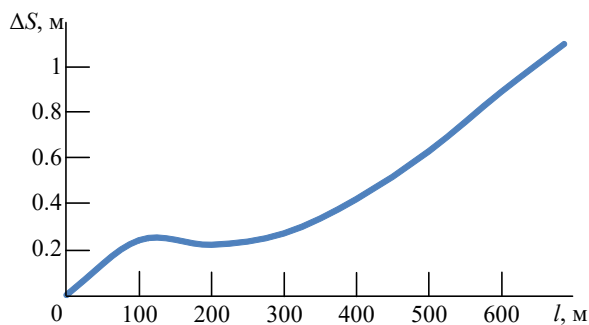


Рис. 10. Погрешность плановых координат в зависимости от глубины скважины

Fig. 10. Plan coordinate error relative to borehole depth

Использование дополнительного грубого широкодиапазонного микромеханического гироскопа для измерения угловой скорости по оси z [23] с комплексированием результатов его и основной схемы [9] – паллиативное решение, реализованное в ГИ УГИ42.03, – следует признать ограниченно эффективным как с точки зрения количественного выигрыша, так и по критерию адаптивности к траектории скважины.

Возможность решительного шага в этом направлении предполагается в развитии одноосного решения ГИ, описанного в данной публикации, но его рассмотрение выходит за ее рамки.

Заключение. В статье развивается подход к созданию инерциальных измерительных модулей (ИИМ) с неполным (< 3) количеством осей измерения углового положения (скорости) для решения задач ориентации и навигации. При этом решение последней подразумевается методом не инерциального, а навигационного счисления координат, базирующимся на параметрах ориентации и внешней относительно ИИМ информации о приращении пути от одометрических и им подобных источников.

Сферой приложения результатов исследования является гироскопическая инклинометрия скважин, где нашли практическое применение современные приборы, обычно построенные на двухосном измерении угловой скорости с помощью ДУС, как правило, роторных с механическим носителем вектора кинетического момента. Побудительными причинами для поиска иных решений является избыточная сложность и относительная дороговизна таких ГИ, а также низкая вибро- и удароустойчивость, особо проявляющаяся при их использовании для ориентирования направления забу-

ривания так называемых вторых стволов из первого вертикального.

В статье предложены схемно-конструктивные и алгоритмические решения по созданию ГИ только с одним ДУС. Авторы рассматривали их и ранее в рабочем порядке (вне публикаций), но, обладая большим опытом работы на рынке сугубо прикладных исследований, перешли к серьезным работам на этом направлении только после появления отличающихся высокой стабильностью КВГ с резонатором индукционного типа, выполненным по MEMS-технологии. При этом была поставлена задача достижения безусловного соответствия нового прибора базовым характеристикам – габаритам (прежде всего, диаметру) и универсальности по признаку типа измерения (точечно-непрерывный), а также той степени адаптивности к траектории скважины, которые свойственны современным двухосным ГИ.

Вновь созданная схема ГИ основана:

- на использовании – впервые при измерениях в непрерывном режиме для удержания ("косвенной, грубой стабилизации") оси единственного ДУС около апсидальной плоскости – поворотной рамки с ДПИ, являющейся базовым конструктивно-техническим решением всех современных ГИ и используемой обычно в режиме точечного компасирования;

- на переходе в режиме точечного компасирования от одновременных измерений взаимно-перпендикулярных проекций горизонтальной составляющей скорости суточного вращения Земли двухосным ДУС к новому алгоритму их одноосных измерений при последовательных поворотах рамки на $n \times 90^\circ$ ($n = 0 \dots 4$) вокруг продольной оси СП. Эти повороты, сопровождаемые фиксацией показаний ДУС, используются в ГИ независимо от количества измерительных осей и составляют суть многопозиционного компасирования – процедуры, позволяющей резко снизить ошибку определения азимута за счет "автокомпенсации" дрейфов ДУС, не зависящих от перегрузки.

Подчеркнем, завершая, что рассмотренная в статье новация позволяет, по сути, реализовать "продольную" (ХУ) схему универсального ГИ на одном одноосном ДУС, одновременно (и существенно) повышая ее надежность и снижая

стоимость. Как уже отмечалось, "степень адаптивности к траектории скважины, свойственная современным двухосным ГИ," остается той же, т. е. ограниченной. В следующей публикации авторы планируют показать, как может быть

развито предложенное техническое решение с целью достижения абсолютной адаптивности к траектории, т. е. независимости точности съемки от ориентации ствола скважины.

Список литературы

1. Jamieson A. Introduction to Wellbore Positioning. Research Office in Inverness, University of the Highlands and Islands, Scotland. 2012. P. 52–81. URL: https://www.uhi.ac.uk/en/t4-media/one-web/university/research/eBook_V9_10_2017-redux.pdf (дата обращения 18.01.23)
2. Eren T., Suicmez V. S. Directional drilling positioning calculations // J. of Natural Gas Science and Engineering. 2020. Vol. 73. P. 103081. doi: 10.1016/j.jngse.2019.103081
3. Codling J. Low Angle Survey Errors // Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section 49th General Meeting. Den Haag, Netherlands, 2019. doi: 10.2118/187249-MS
4. Современные информационно-измерительные комплексы подземной навигации и ориентации / Я. И. Биндер, И. Е. Гутнер, А. П. Мезенцев, А. А. Молчанов // Гирскопия и навигация. 2003. № 1 (40). С. 110–123.
5. Морозов О., Овчинников А. Геологическое сопровождение бурения online. Горизонтальные скважины на Приразломном – под контролем // Offshore (Russia). 2015. С. 52–56.
6. Живов П. Н., Оганов А. С. Научно-методические решения по автоматизированному управлению траекторией ствола направленной скважины // Вестн. Ассоциации буровых подрядчиков. 2010. № 3. С. 38–42.
7. Hawkinson B. Gyro Technology in the Oil and Gas Industry // Proc. of the 39th Meeting of Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section. Long Beach, California, USA, 9 May 2014.
8. Арсланов И. Г., Ягафарова Х. Н. Особенности применения непрерывных гирскопических инклинометров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 5. С. 16–19. doi: 10.30713/1999-6934-2018-5-16-19
9. Об использовании различных схем гироинклинометров для непрерывной съемки скважин произвольной ориентации / Я. И. Биндер, Т. В. Падерина, А. С. Лысенко, А. Н. Федорович // Гирскопия и навигация. 2010. № 4 (71). С. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020
10. Иконников Ю. А. Боковые стволы – руководство пользователя. О целесообразности регламентирования выполнения работ по резке боковых стволов из ранее пробуренных скважин в ОАО "ЛУКОЙЛ" // Нефтегазовая вертикаль. 2006. № 2. С. 49–52.
11. Варушкин С. В., Хакимова Ж. А. Проектирование геологоразведочных работ методом строительства боковых стволов // Вестн. ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2018. Т. 18, № 1. С. 16–27.
12. Куликов С. В. Капитальный ремонт скважин резкой боковых стволов // Нефть. Газ. Новации. 2011. № 12. С. 71–75.
13. Гилязов Р. М. Бурение нефтяных скважин с боковыми стволами. М.: ООО "Недра Бизнесцентр", 2002. 255 с.
14. Вализада Б. А., Очерedyкo Т. Б. Применение горизонтальных скважин для повышения эффективности разработки месторождений на примере 302–303 залежей Ромашкинского месторождения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестн.). 2017. № 4. С. 226–249.
15. Оценка перспективности бурения боковых горизонтальных стволов и совершенствования системы разработки на турнейском объекте Черновского месторождения / О. В. Савенок, Д. А. Березовский, Г. В. Кусов, М. Норманн // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестн.). 2018. № 2. С. 123–141.
16. Биндер Я. И. Аналитическое компасирование в инклинометрии скважин малого диаметра // Гирскопия и навигация. 2003. № 2 (41). С. 38–46.
17. Гуськов А. А., Цыбрюева И. В. Метод повышения точности начальной азимутальной ориентации гирскопического инклинометра // Материалы конф. XVIII Туполевские чтения: междунар. молодеж. науч. конф., Казань, 26–28 мая 2010 г. / КГТУ. Казань, 2010. Т. IV. С. 614–616.
18. Скважинный прибор инклинометра / К. О. Барышников, М. И. Коптенков, А. И. Баландин, Е. В. Шаховцев // Лесной вестн. 2015. № 3. С. 50–55.
19. Сысоева С. С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. 2014. № 6. С. 40–46.
20. Advanced Trajectory Computational Model Improves Calculated Borehole Positioning, Tortuosity and Rugosity / M. F. Abughaban, B. Bialecki, A. W. Eustes, J. P. de Wardt, S. Mullin // Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conf. and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA, March 2016. doi: 10.2118/178796-MS
21. Автокомпенсация дрейфов ДУС непрерывного гироинклинометра с использованием дискретных модуляционных разворотов / Я. И. Биндер, А. С. Лысенко, Т. В. Падерина, В. Г. Розенцвейн // Сб. материалов XIX Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 2012. С. 8–15.

22. Лысенко А. С., Елисеенков А. Е. Результаты испытаний малогабаритного гироинклинометра с системой автокомпенсации дрейфов датчика угловой скорости // *Материалы докл. XIV конф. молодых ученых "Навигация и управление движением"*, Санкт-Петербург, 13–16 марта 2012 г. / ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2012. С. 88–94.

23. Биндер Я. И., Падерина Т. В. Бесплатформенные инерциальные измерительные модули: компасирование и калибровка на неподвижном основа-

нии в условиях ограничения угловых перемещений // *Гироскопия и навигация*. 2003. № 4 (43). С. 29–40.

24. Лысенко А. С. Алгоритмы работы и схема построения гироинклинометра с продольной компоновкой для вертикальных участков стволов скважин // *Гироскопия и навигация*. 2016. Т. 24, № 1 (92). С. 72–87. doi: 10.1134/S207510871603010X

25. Исаченко В. Х. *Инклинометрия скважин*. М.: Недра, 1987. С. 5–10.

Информация об авторах

Биндер Яков Исаакович – кандидат технических наук (1988), главный конструктор АО "СКБ ПН". Автор 109 научных работ. Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области морской и подземной навигации.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Хазов Иван Анатольевич – инженер АО "СКБ ПН", аспирант 1-го года обучения кафедры лазерных измерительных и навигационных систем факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов: разработка и исследование информационно-навигационных систем в области морской и подземной навигации; обработка данных.

Адрес: АО "Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации", Беловодский пер., д. 9, корп. 2, лит. Ц, Санкт-Петербург, 194044, Россия

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>

References

1. Jamieson A. Introduction to Wellbore Positioning. Research Office in Inverness, University of the Highlands and Islands, Scotland. 2012, pp. 52–81. Available at: https://www.uhi.ac.uk/en/t4-media/one-web/university/research/eBook_V9_10_2017-redux.pdf (accessed 18.01.23)

2. Eren T., Suicmez V. S. Directional drilling positioning calculations, *J. Nat. Gas Sci., Eng.* 73 (2020), p. 103081. doi: 10.1016/j.jngse.2019.103081

3. Codling J. Low Angle Survey Errors. Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section 49th General Meeting. Den Haag, Netherlands, 2019. doi: 10.2118/187249-MS

4. Binder Y. I., Gutner I. E., Mezentsev A. P., Molchanov A. A. Present-Day Information-Measuring Systems for Subsurface Navigation and Orientation. *Гироскопия и навигация* [Gyroscope and navigation]. 2003, no.1 (40), pp. 110–123. (In Russ.)

5. Morozov O., Ovchinnikov A. Geological Drilling Support Online. Horizontal Wells at Pribrazlomnoye are under Control. Offshore. 2015, pp. 52–56. (In Russ.)

6. Zhivov P. N., Oganov A. S. Scientific and Methodological Solutions for Automated Control of the Trajectory of a Directional Wellbore. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*. 2010, no. 3, pp. 38–42. (In Russ.)

7. Hawkinson B. Gyro Technology in the Oil and

Gas Industry. Proc. of the 39th Meeting of Soc. of Petroleum Engineers, Wellbore Positioning Technical Section. Long Beach, California, USA, 9 may 2014.

8. Arslanov I. G., Yagafarova Kh. N. Specific Features of Use of Continuous Gyroscopic Incliner. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2018, no. 5, pp. 16–19. doi: 10.30713/1999-6934-2018-5-16-19 (In Russ.)

9. Binder Y. I., Lysenko A. S., Paderina T. V., Fedorovich A. N. Various Schemes for Continuous Gyro-Inclinometric Survey of Arbitrarily Oriented Wellbores. *Gyroscope and Navigation*. 2010, no. 4 (71), pp. 53–73. doi: 10.1134/s2075108711010020 (In Russ.)

10. Ikonnikov Ju. A. Side Barrels – User Manual. on the Expediency of Regulating the Performance of Work on Sidetracking from Previously Drilled Wells in JSC "LUKOIL". *Oil and Gas Vertical*. 2006, no. 2, pp. 49–52. (In Russ.)

11. Varushkin S. V., Hakimova Zh. A. The Design of Geological Exploration with Side Track Drilling. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*. 2018, no. 1 (18), pp. 16–27. (In Russ.)

12. Kulikov S. V. *Kapitalnyy remont skvazhin zarezkoj bokovykh stvolov* [Well Workover with Sidetracking]. *Nef't. Gaz. Novatsii*. 2011, no.12, pp. 71–75. (In Russ.)

13. Giljazov R. M. Drilling Oil Wells with Lateral

Boreholes. *Nedra Biznes Tsentr* [Nedra Business Center]. 2002, 255 p. (In Russ.)

14. Valizada B. A., Ochered'ko T. B. Application of Horizontal Wells to Increase the Efficiency of Field Development by the Example of Deposits 302–303 of the Romashkinskoye Field. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2017, no. 4, pp. 226–249. (In Russ.)

15. Savenok O. V., Berezovskiy D. A., Kusov G. V., Norman M. Estimation of the Perspectiveness of Drilling of Side Horizontal Steels and Improvement of the Development System at the Turney Object of the Chernovskoye Field. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2018, no. 2, pp. 123–141. (In Russ.)

16. Binder Y. I. Analytical Compassing in Slim Hole Inclinometry. *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2003, no. 2 (41), pp. 38–46. (In Russ.)

17. Gus'kov A. A., Cybrjaeva I. V. *Metod povysheniya tochnosti nachal'noj azimutal'noj orientatsii girokopicheskogo inklinometra* [Method for Improving the Accuracy of the Initial Azimuth Orientation of a Gyroscopic Inclinometer]. Proc. of the XVIII Tupolev Readings: Intern. Youth Scientific Conf., Kazan, 26–28 May 2010. Kazan State Technical University. 2010, pp. 614–616. (In Russ.)

18. Baryshnikov K. O., Koptenkov M. I., Balandin A. I., Shahovtsev E. V. The Device for the Well to the Inclinometers. *Forestry Bulletin*. 2015, no. 3, pp. 50–55. (In Russ.)

19. Sysoyeva S. S. Market trends for high-end MEMS inertia sensors. New Levels of Performance and Performance. *Komponenty i Tekhnologii* [Components & Technologies]. 2014, no. 6, pp. 40–46. (In Russ.)

20. Abughaban M. F., Bialecki B., Eustes A. W., de Wardt J. P., Mullin S. Advanced Trajectory Computational Model Improves Calculated Borehole Positioning, Tortuosity and Rugosity. Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conf. and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA, March 2016. doi: 10.2118/178796-MS

21. Binder Y. I., Lysenko A. S., Paderina T. V., Rozentsvejn V. G. *Avtokompensacija drejfov DUS nepreryvnogo giroinklinometra s ispol'zovaniem diskretnyh moduljacionnyh razvorotov* [Auto-Compensation of the ARS Drifts of a Continuous Gyroinclinometer Using Discrete Modulation Turns]. Proc. of the XIX Saint Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, 28–30 May 2012, pp. 8–15. (In Russ.)

22. Lysenko A. S., Eliseenkov A. E. *Rezultaty ispytaniy malogabaritnogo giroinklinometra s sistemoi avtokompensatsii drejfov datchika uglovoi skorosti* [Test Results of a Small-Sized Gyroinclinometer with an Auto-Compensation System for the Angular Velocity Sensor Drifts]. Proc. of the 14th Conf. of Young Scientists "Navigation and Motion Control", Saint Petersburg, 13–16 March 2012. Concern CSRI Elektropribor, 2012, pp. 88–94. (In Russ.)

23. Binder Y. I., Paderina T. V. Strapdown Inertial Measuring Units: Compassing and Calibration under Restriction of Angular Movements. *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2003, no. 4 (43), pp. 29–40. (In Russ.)

24. Lysenko A. S. Algorithms and Design of Longitudinal Gyroinclinometer for Vertical Parts of Wellbores. *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation]. 2016, no. 7, pp. 253–263. doi: 10.1134/S207510871603010X

25. Isachenko V. Kh. *Inklinometriya skvazhin* [Well Inclinometry]. Moscow, Nedra, 1987, pp. 5–10. (In Russ.)

Information about the authors

Yakov I. Binder, Cand. Sci. (1988), Chief designer of Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation. The author of 109 scientific publications. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of marine and underground navigation.

Adress: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: j459190@yahoo.com

<https://orcid.org/0009-0001-5950-1980>

Ivan A. Khazov, engineer of Special design bureau of devices of underground navigation, Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: development and research of information and navigation systems in the field of underground navigation; data processing.

Adress: "Special Design Bureau of Devices of Underground Navigation" JSC, 9/2, Belovodskii per., St Petersburg 194044, Russia

E-mail: IvanHazov@okb3d.com

<https://orcid.org/0009-0006-3770-0133>
