

Т. В. ПАДЕРИНА, Д. А. СОКОЛОВ

ВАРИАНТЫ КОНСТРУКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДИАМЕТРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГИРОИНКЛИНОМЕТРА ДЛЯ ВЫСОКОШИРОТНЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ

Приводятся основные схемно-конструктивные решения, полученные при разработке компоновок модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации, предназначенной для работы на шельфе арктических морей.

Ключевые слова: система подземной навигации, бесплатформенный гироскопический инклинометр, шельф арктических морей.

Введение. Строительство нефтегазовых скважин в сложнейших условиях континентального шельфа невозможно без применения современных средств подземной навигации. Так, лидерами мирового нефтесервиса — компаниями “Shlumberger”, “Halliburton”, “Baker Hughes” (все — США) — при бурении с морских платформ, помимо магнитометрических, в обязательном порядке применяются и гироскопические MWD-системы (Measurement While Drilling): соответственно GyroPulse, Evader Gyrotool, GyroTrak. В перечисленных системах, по-видимому, реализуется так называемая продольная схема бесплатформенного гироскопического модуля, включающего, кроме блока акселерометров, гироскопический датчик угловой скорости (ДУС), оси чувствительности которого расположены в плоскости поперечного сечения скважины. Данная схема имеет ограничения при работе на больших зенитных углах и, как правило, применяется только для позиционирования верхних участков стволов при плотной сетке их разбуривания с морской платформы.

Очевидно, что создание систем для разработки арктических шельфовых месторождений нефти и газа представляет собой еще более сложную научно-техническую задачу. В настоящее время самым высокоширотным уже разработанным месторождением является газоконденсатно-нефтяное месторождение Snohvit, расположенное на широте $\varphi=71^\circ$ с.ш., для $\varphi \geq 74^\circ$ с.ш. буровые работы только предполагаются.

Как известно, в высоких широтах значительно снижаются уровни полезных сигналов — горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и горизонтальной составляющей угловой скорости вращения Земли, на измерении которых основана работа соответственно магнитометрических и гироскопических инклинометров компасного типа. Из-за появления недопустимо больших погрешностей, обусловленных влиянием естественных флуктуаций магнитного поля Земли (магнитные бури и аномалии) и девиаций, создаваемых искусственно буровыми сооружениями (морской платформой, бурильными и обсадными колоннами и т. д.), магнитометрические инклинометры не могут быть применимы на $74\text{—}78^\circ$ с.ш. Что же касается хорошо известной процедуры гирокомпасирования, являющейся основой работы точечных гироскопических инклинометров (ГИ), то погрешность определения азимута в этих широтах увеличивается соответственно в 1,8—2,4 раза по сравнению с аналогичной погрешностью на 60° с.ш.

Для обеспечения подземной навигации на арктическом шельфе необходимы нестандартные решения, и одно из таких решений базируется на применении так называемой диаметральной схемы построения ГИ [1].

Основная особенность диаметральной схемы — возможность разворота корпуса ДУС вокруг поперечной оси скважинного прибора (СП), при этом вектор кинетического момента остается перпендикулярным оси разворота и находится в диаметральной плоскости прибора.

Эта схема позволяет создать на основе одного двухосного ДУС новую гироскопическую систему подземной навигации, обладающую рядом характеристик, особо значимых при работе в высоких широтах:

— адаптивностью к траектории скважины, т.е. способностью измерения азимута в любых произвольно ориентированных скважинах;

— возможностью проведения инвариантного компасирования, при котором погрешность определения азимута не зависит от пусковых погрешностей гироскопа [1, 2].

В работе [3] было показано, что реализация режима инвариантного компасирования возможна не только при полном диапазоне разворота корпуса ДУС в диаметральной плоскости, но и при значительном уменьшении этого диапазона.

В настоящей статье представлены результаты исследования схемно-конструктивных решений диаметральной схемы, которые могут быть применены как для кабельного, так и забойного варианта исполнения гироинклинометра.

Режим инвариантного компасирования в диаметральной схеме гироинклинометра.

В работах [1, 2] исследовалась возможность реализации в диаметральной схеме режима инвариантного компасирования. Поясним этот термин. В силу особенностей точечного компасирования, связанного, прежде всего, с необходимостью включения ДУС в каждом цикле измерения и относительно короткой продолжительностью цикла, пусковая погрешность гироскопа однозначно превалирует над нестабильностью сигнала в процессе работы и определяет точность этого режима. С помощью управления углами разворотов ψ и χ в диаметральной схеме ГИ (рис. 1) в каждом цикле измерения азимута могут быть откалиброваны практически все составляющие ухода ДУС, и, таким образом, обеспечена их последующая компенсация. Вычисление коэффициентов ухода ДУС в этом случае является только промежуточным этапом, который может быть исключен, например, за счет установки измерительных осей датчика в определенные положения, когда составляющие его ухода, зависящие от вектора перегрузки, автоматически обнуляются. Такой режим, характеризующийся минимизацией числа установок корпуса ДУС и соответственно минимизацией общего времени цикла измерения, и называется режимом инвариантного компасирования.

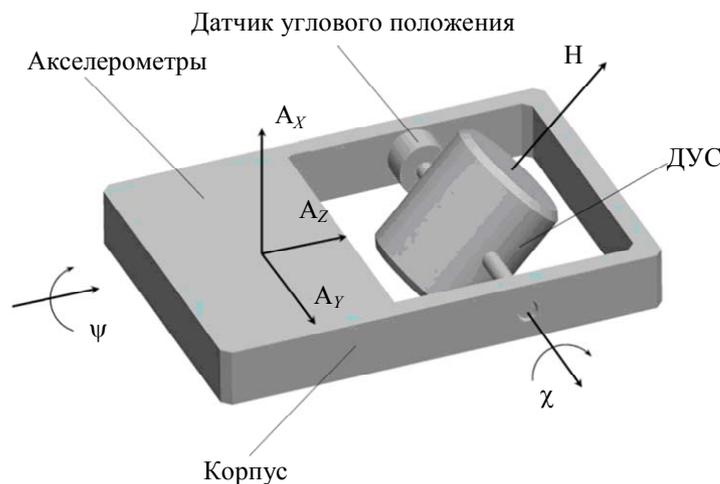


Рис. 1

В работе [1] были получены следующие выражения для проекций угловой скорости вращения Земли на измерительные оси ДУС:

$$\begin{aligned} \omega_{\chi} = & \Omega \sin \varphi (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi) + \\ & + \Omega \cos \varphi [\cos A (\cos \theta \cos \psi \cos \chi - \sin \theta \sin \chi) + \sin A \sin \psi \cos \chi] + \tau_{\chi} - \\ & - \rho_{\chi} (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi) + \varepsilon_{\chi} \sin \theta \sin \psi; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \omega_Y = \Omega \sin \varphi \sin \theta \sin \psi - \Omega \cos \varphi (\sin A \cos \psi - \cos A \cos \theta \sin \psi) + \tau_Y - \\ - \rho_Y \sin \theta \sin \psi - \varepsilon_Y (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi), \end{aligned} \quad (2)$$

здесь Ω — угловая скорость суточного вращения Земли; ω_X, ω_Y — выходные сигналы измерительных каналов ДУС; A, θ — азимут и зенитный угол скважины; ψ — угол разворота корпуса СП вокруг его продольной оси; χ — угол разворота вектора кинетического момента гироскопа в диаметральной плоскости относительно поперечной оси СП; τ_X, τ_Y — составляющие ухода ДУС, не зависящие от ускорения (корпусной уход); ρ_X, ρ_Y — составляющие ухода ДУС, пропорциональные проекциям ускорения на оси чувствительности ДУС (дебаланс); $\varepsilon_X, \varepsilon_Y$ — составляющие ухода ДУС, пропорциональные проекциям ускорения на оси, ортогональные к осям чувствительности (квадратурные составляющие).

Определитель Δ системы уравнений имеет следующий вид:

$$\Delta = -\cos \theta \cos \chi + \sin \theta \sin \chi \cos \psi, \quad (3)$$

его обнуления можно избежать, если соблюдать условие $\operatorname{tg} \chi \neq \operatorname{ctg} \theta / \cos \psi$.

Адаптивность системы к траектории скважины, т.е. определение азимута при любом его значении с одинаковой точностью, можно обеспечить при достижении максимального значения Δ , когда выполняется условие

$$\operatorname{tg} \chi = -\operatorname{tg} \theta \cos \psi. \quad (4)$$

Подставляя значение $\cos \psi$ из формулы (4) в уравнение (3), имеем

$$\Delta_{\max} = -\cos \theta / \cos \chi, \quad (5)$$

после чего из выражений (5) и (4) получаем значения углов для проведения инвариантного компасирования: $\chi = \pm \theta, \psi = 0, 180^\circ$. При этом в первом положении ($\chi = \theta, \psi = 0$) имеем

$$\omega_{X_1} = \Omega \cos \varphi \cos A + \tau_X, \quad \omega_{Y_1} = -\Omega \cos \varphi \sin A + \tau_Y, \quad (6)$$

во втором положении ($\chi = -\theta, \psi = 180^\circ$) —

$$\omega_{X_2} = -\Omega \cos \varphi \cos A + \tau_X, \quad \omega_{Y_2} = \Omega \cos \varphi \sin A + \tau_Y. \quad (7)$$

При этих положениях составляющие ухода ДУС, пропорциональные проекциям ускорения, не оказывают влияния на точность режима компасирования. Влияние же корпусного ухода ДУС исключается при вычислении тригонометрических функций азимута:

$$\cos A = \frac{\omega_{X_1} - \omega_{X_2}}{2\Omega \cos \varphi}, \quad \sin A = \frac{\omega_{Y_2} - \omega_{Y_1}}{2\Omega \cos \varphi}.$$

При уменьшении диапазона разворота по углу χ , например, до χ_0 также возможно обеспечение режима инвариантного компасирования [3]. Используя два положения: $\chi = \chi_0, \psi = \arccos(-\operatorname{tg} \chi_0 \operatorname{ctg} \theta)$ и $\chi = -\chi_0, \psi = \pi + \arccos(\operatorname{tg} \chi_0 \operatorname{ctg} \theta)$, по аналогии с выражениями (6), (7) имеем:

$$\cos A = \frac{\omega_{X_1} - \omega_{X_2}}{2\Omega \cos \varphi} \frac{\sin \theta}{\sin \chi_0}, \quad \sin A = \frac{\omega_{Y_2} - \omega_{Y_1}}{2\Omega \cos \varphi} \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \chi_0}.$$

Схемно-конструктивные решения диаметральной схемы гироинклинометра. В работе [4] были приведены результаты прочностного и температурного расчетов конструкции скважинного модуля ориентации (СМО) ГИ, реализующего диаметральную схему, а также результаты расчета собственных частот механических колебаний данной конструкции. В продолжение этой работы в настоящей статье рассматриваются схемно-конструктивные решения, полученные при разработке вариантов компоновок СМО для высокоширотных систем подземной навигации.

Прежде всего, рассмотрим конструктивное исполнение скважинного модуля ориентации для схемы, в которой управление разворотом по углам χ и ψ осуществляется без ограничений. Данный вариант модуля может быть использован в промерочном гириноклинометре, предназначенном для съемки уже пробуренных участков скважины.

Для того чтобы совместить возможность реализации разворота блока чувствительных элементов (БЧЭ) СМО вокруг продольной оси и полные диапазоны разворотов по углам χ и ψ с требованиями по наружному диаметру скважинного прибора (42 мм), предлагается применить следующее решение: БЧЭ выполняется в отдельном корпусе, соединенном с основной частью СП при помощи вращающегося полого вала, по которому проложены линии для подачи питания и осуществления обмена информацией между частями прибора (рис. 2). При такой реализации возникает проблема уплотнения вращающегося вала, так как СП во время эксплуатации может находиться в жидкости под давлением до 80 МПа. Решением этой проблемы является использование специальных узлов уплотнения (производства компании “Trelleborg”, Германия), которые удовлетворяют требованиям по давлению и условиям эксплуатации в агрессивной среде.

Кинематическая схема скважинного модуля ориентации с отдельным корпусом БЧЭ представлены на рис. 2, где 1 — плата электроники СМО; 2 — привод разворота БЧЭ вокруг продольной оси; 3 — датчик угла разворота БЧЭ; 4 — арретир БЧЭ; 5 — узел уплотнения вращающегося вала; 6 — плата электроники БЧЭ; 7 — привод разворота корпуса ДУС на угол χ ; 8 — ДУС.

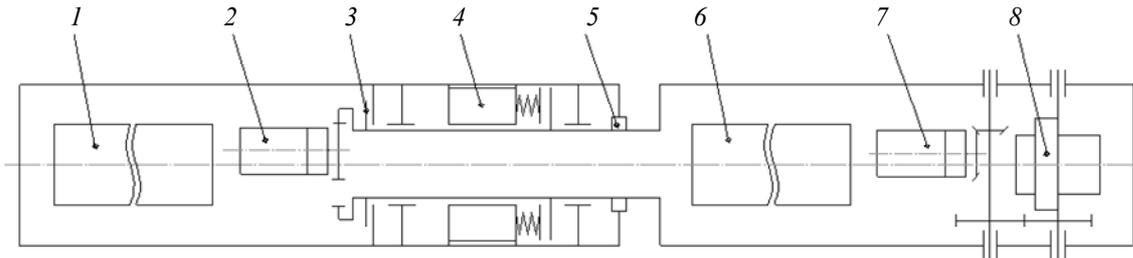


Рис. 2

Рассмотрим далее вариант конструктивного исполнения диаметральной схемы гириноклинометра, позволяющий существенно упростить конструкцию СМО благодаря размещению БЧЭ внутри прочного корпуса скважинного прибора. Такое конструктивное решение схематично показано на рис. 3, где 1 — плата электроники СМО; 2 — привод разворота БЧЭ вокруг продольной оси; 3 — арретир БЧЭ; 4 — плата электроники БЧЭ; 5 — привод разворота корпуса ДУС на угол χ ; 6 — ДУС; 7 — датчик угла разворота БЧЭ.

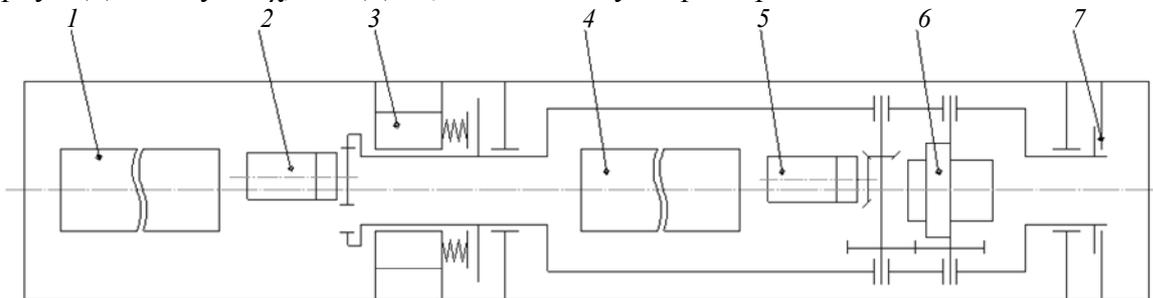


Рис. 3

Данная компоновка не позволяет осуществлять разворот корпуса ДУС в полном диапазоне по углу χ . С учетом габаритных размеров применяемого ДУС для обеспечения требуемого диаметра корпуса прибора (не более 42 мм) необходимо сократить диапазон разворота по углу χ до $\pm 45^\circ$.

Данное конструктивное исполнение СМО может применяться как для кабельного, так и забойного варианта гириноклинометра.

В ряде случаев при разработке забойного ГИ, исключив устройство разворота БЧЭ, можно максимально упростить компоновку. Такая модификация становится возможной благодаря тому, что в определенных пределах управление продольным разворотом осуществляется с помощью вращения буровой колонны. Кроме того, данная конструкция позволяет применить более прочный несущий корпус СП, наружный диаметр которого соответствует принятому на практике стандартному диаметру для забойных геофизических приборов (44,5 или 48 мм).

Для представленных конструктивных решений (см. рис. 2 и 3) необходимо привести данные о применяемых чувствительных элементах.

Центральным функциональным элементом СМО ГИ является малогабаритный двухосный ДУС. Характеристики применяемого гироскопа непосредственно влияют как на точность измерения траекторий скважин, так и на один из главных эксплуатационных параметров ГИ — наружный диаметр скважинного прибора.

Выбор базового гироскопического элемента для построения ГИ обусловлен выполнением следующих требований:

- габаритные размеры гироскопа должны обеспечивать требуемый диаметр СП;
- случайная составляющая дрейфа гироскопа — не более $0,2 \dots 0,3$ °/ч;
- гироскоп должен иметь высокую ударную прочность;
- ресурс гироскопа — не менее 5000 ч;
- гироскоп должен быть доступен для приобретения и иметь приемлемую стоимость.

С учетом перечисленных требований для построения универсального гироскопа предлагается применить динамически настраиваемый гироскоп с внутренним упругим подвесом ротора, в частности, из серии ГВК, производимый ОАО „Раменское приборостроительное конструкторское бюро“ (Московская обл.).

Для измерения проекций кажущегося ускорения в гироскопе целесообразно использовать одноосные микромеханические акселерометры ADXL 103 фирмы “Analog Devices” (США). В качестве датчика углового положения гироскопа предусмотрена установка на его корпус двухосного микромеханического акселерометра ADXL 203 фирмы “Analog Devices”. Такое решение позволяет получать информацию об угле χ непосредственно на оси вращения гироскопа в диаметральной плоскости.

В соответствии с предложенными кинематическими схемами СМО (см. рис. 2 и 3) были обоснованы конструктивные решения наиболее сложных узлов компоновки модуля с использованием современных систем автоматизированного проектирования.

Рассмотрим вариант компоновки, реализующий диаметральную схему с ограничением диапазона разворота по углу χ (см. рис. 3). На рис. 4 показана модель сборки блока чувствительных элементов и узлов его разворотов.

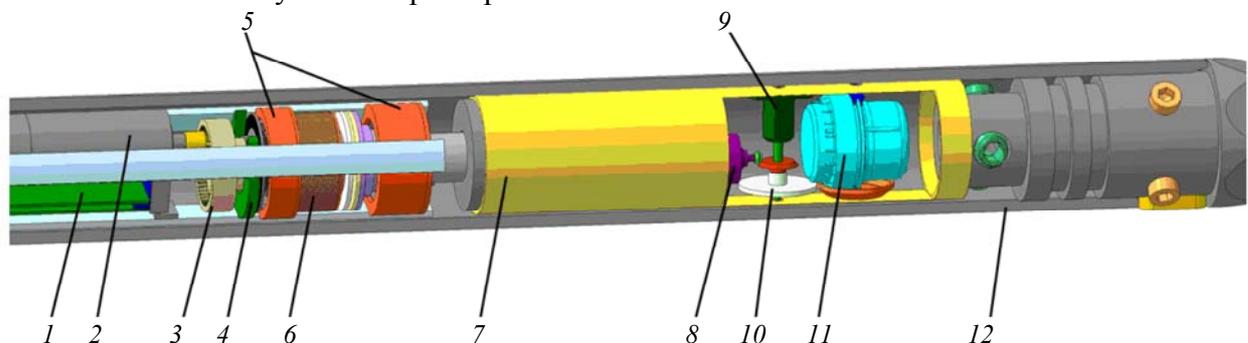


Рис. 4

Приведение в движение установленного на подшипниках качения 5 вращающегося вала с БЧЭ 7 осуществляется с помощью электромотора с редуктором 2 (производства компании “Faulhaber”, Германия) и зубчатого колеса 3 внутреннего зацепления, установленного

непосредственно на вращающемся валу. Фиксация блока производится с помощью арретирующего устройства 6 на основе электромагнита. Угол продольного разворота БЧЭ считывается с кодового диска с помощью блока фототранзисторов датчика углового положения 4. Для обеспечения вращения гироскопа 11, находящегося в БЧЭ, применяется малогабаритный электромотор с редуктором 8. Для передачи вращающего момента на корпус гироскопа используются коническая и цилиндрическая пары зубчатых колес 10. Непосредственно на корпусе ДУС установлено колесо специальной формы для того, чтобы вписать гироскоп в цилиндрический корпус 12. В качестве датчика углового положения ДУС используется абсолютный оптический энкодер 9. Управление работой элементов БЧЭ и приводами разворотов на углы ψ и χ осуществляется контроллером, установленным на плате блока управления 1.

Заключение. Изложен современный подход к разработке конструкций модуля ориентации гироинклинометра для высокоширотных систем подземной навигации. Модуль реализует диаметральною схему построения ГИ, обеспечивающую требуемую точность ориентации скважин на арктическом шельфе.

Анализ приведенных конструктивных решений подтверждает вывод о том, что наиболее простым и надежным является вариант диаметральной схемы с ограничением диапазона разворота по углу χ .

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 11-08-00476-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биндер Я. И. Универсальный гироинклинометр с ориентацией главной оси двухосного датчика угловой скорости в диаметральной плоскости скважины // Гироскопия и навигация. 2005. № 4.
2. Биндер Я. И., Соколов Д. А. Управление разворотом корпуса скважинного прибора в инклинометрах с ориентацией главной оси гироскопа в диаметральной плоскости скважины // Там же. 2008. № 2.
3. Биндер Я. И., Падерина Т. В., Соколов Д. А. Подземная навигация на высокоширотном шельфе. Актуальные проблемы и новые технические решения // Тр. VII Российской науч.-техн. конф. „Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности“ („НГО-2011“). СПб: ГНИНГИ, 2011.
4. Гордеев Ю. М., Падерина Т. В., Соколов Д. А. Прецизионная гироскопическая система подземной навигации для работы в высоких широтах. Основные схемно-конструктивные решения // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 5(75).

Сведения об авторах

- Татьяна Владимировна Падерина** — канд. техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: paderinata@rambler.ru
- Дмитрий Александрович Соколов** — ЗАО „СКБ приборов подземной навигации“, Санкт-Петербург; инженер-конструктор; E-mail: d.a.sokolov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию
14.12.12 г.