

В. Г. ТЕРЕШИН, Г. А. ИВАНОВА

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМЫХ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ ДЛЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрены особенности и перспективы внедрения современных динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ) и волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в инклинометрическую технику. Предложен подход, позволяющий осуществить выбор датчика угловой скорости (ДУС) в измерительном модуле инклинометрической системы (ИС), используя два критерия: «стоимость-эффективность» и обобщенный (интегральный). *Динамически настраиваемые и волоконно-оптические гироскопы; системы подземной навигации; гироскопический инклинометр*

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день нефте- и газодобыча являются одной из главных и доходных частей бюджета в экономике нашей страны. Учитывая большую потребность в аттестации вновь бурящихся скважин и скважин старого фонда, проблема эффективного контроля пространственного положения ствола скважины в современной нефтегазодобывающей промышленности относится к числу наиболее важных и актуальных.

Решение проблемы непосредственно связано с разработкой измерительно-вычислительной аппаратуры, позволяющей достаточно точно и оперативно получать необходимую информацию и обладающей при этом высокой надежностью.

В настоящее время существует широкий спектр датчиков информации, применение которых в ИС позволяет решать задачи подземной навигации. Необходимость определения параметров ориентации скважин, пробуренных в средах с аномальными магнитными свойствами, а также обсаженных стальными трубами, приводит к целесообразности применения гироскопических инклинометров. Такие гироскопические инклинометры могут быть востребованы для измерения пространственного положения трубопроводов, проложенных в труднодоступных местах (например, по дну рек или под водохранилищем), а также при строительстве различных объектов для определения вертикальности металлоконструкций и азимута их наклона. В работе рассматриваются особенности и перспективы использования ДНГ и ВОГ в гироскопиче-

ских ИС, дается сравнительный анализ этих двух типов гироскопов.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Задача ориентации объекта решается с использованием согласованных измерений, как минимум, двух неколлинеарных векторов в системах координат, взаимная ориентация которых осуществляется при помощи азимута α , зенитного угла θ и визирного угла φ (рис. 1), причем \vec{e}_i, \vec{b}_j ($i, j = 1, 2, 3$) – орты неподвижного R_e и подвижного R_b базисов, соответствующих правым прямоугольным системам координат. Отметим, что вектор \vec{e}_1 направлен по касательной к географическому меридиану на север; \vec{e}_2 – по касательной к географической параллели на восток; \vec{e}_3 – по гравитационной вертикали к центру Земли. Векторы \vec{b}_1, \vec{b}_2 определяют расположение базовых поверхностей, используемых при установке измерительных модулей на шасси инклинометра; вектор \vec{b}_3 направлен по продольной оси цилиндрического корпуса инклинометра от устья скважины к забоя [1].

Принципы построения конкретных алгоритмов вычисления α, θ, φ сводятся к выявлению зависимостей \vec{e}_i ($i = 1, 2, 3$) от измеряемых физических параметров, в качестве которых для гироскопического инклинометра используются ускорение свободного падения \vec{g} и угловая скорость вращения Земли $\vec{\omega}$. Единичные векторы указанных величин в координатном базисе R_e записываются следующим образом:

$$\vec{q}^\circ = (0, 0, 1), \quad (1)$$

$$\vec{\omega}^\circ = (\cos \varphi_{ш}, 0, -\sin \varphi_{ш}),$$

где $\varphi_{ш}$ – географическая широта местности.

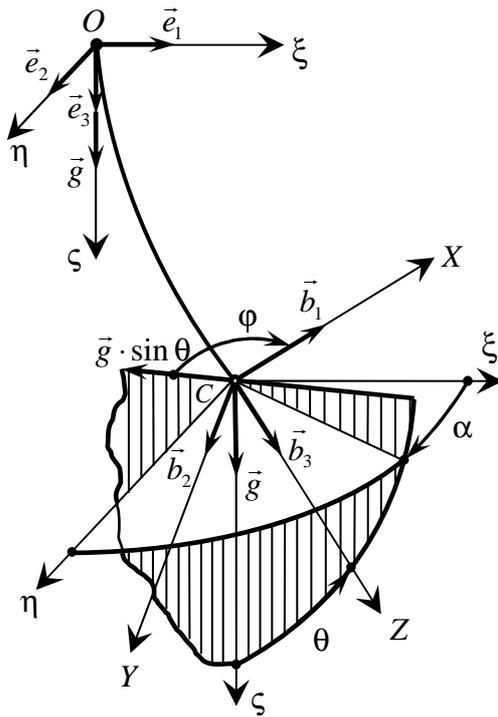


Рис. 1

В работе [1] показано, что в рассматриваемом случае значения азимута, визирного и зенитного углов определяются выражениями:

$$\alpha = \arctg \left[\frac{(A_1 D_2 - A_2 D_1) \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{(A_1^2 + A_2^2) D_3 - D_2 A_2 A_3 - D_1 A_1 A_3} \right], \quad (2)$$

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

где A_i, D_i ($i, j = 1, 2, 3$) – выходные сигналы, поступающие с акселерометров и ДУС, оси чувствительности которых взаимно ортогональны и совпадают с направлениями ортов \vec{b}_j соответственно.

Приведенные соотношения позволяют уточнить алгоритмы обработки сигналов, поступающих с триад акселерометров и ДУС, для нахождения параметров ориентации инклинометра в буровой скважине.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРИБОРОВ НА БАЗЕ ДНГ И ВОГ

Среди источников информации о векторе угловой скорости вращения Земли особый интерес, с точки зрения использования в сложных эксплуатационных условиях, представляют ДНГ и ВОГ [1–11]. К числу достоинств ДУС на базе гироскопов этого типа можно отнести: малые габаритно-массовые и энергетические характеристики, высокую точность, возможность рабо-

ты в условиях больших перегрузок, широкий диапазон измеряемых параметров, малое время готовности.

ДНГ относится к традиционным гироскопическим устройствам, в которых выполнено определенное условие между параметрами прибора (динамическая настройка) и, как правило, используется упругая связь между валом приводного двигателя и ротором. К настоящему времени выявлены основные факторы, влияющие на динамику и точность ДНГ. Изучена сущность нелинейных эффектов, возникающих в результате сложного характера деформаций элементов подвеса чувствительного элемента. Для ряда конструкций приведены рекомендации по выбору основных параметров, предложена математическая модель погрешностей.

Проблема внедрения ДНГ в ИС заключается в чувствительности ДУС этого типа к вибрационным возмущениям. Современные модели ДНГ герметичны, обладают малыми габаритно-массовыми характеристиками, имеют достаточно большой диапазон измеряемых угловых скоростей [2, 6–7]. Российские фирмы ПНППК (Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь) и ОАО «РПЗ» (Раменский приборостроительный завод, г. Раменское) производят малогабаритные ДНГ для использования в качестве чувствительных элементов в инерциальных системах средней точности и системах стабилизации различного назначения (в том числе и для решения задач подземной навигации).

Сущность эффекта, положенного в основу работы ВОГ, состоит в том, что время прохождения потока квантов по замкнутому контуру во вращающейся системе координат отличается от времени прохождения потока квантов по такому же контуру в неподвижной системе координат. Оптический контур такого гироскопа образован сверхтонким оптоволоконном, сохраняющим поляризацию излучения, намотанным на катушку. Излучение от источника (например, от люминесцентного диода) подается на светоделитель и разделяется на два потока лучей. Эти лучи, обходя замкнутый оптоволоконный контур, подаются на фотодетектор, на выходе которого появляется электрический сигнал. После соответствующей обработки сигнала с помощью блока электроники можно получить информацию о скорости поворота волоконно-оптического контура вокруг измерительной оси прибора, которая перпендикулярна плоскости витков оптоволоконна. В приборе наблюдается множество физических явлений: поляризацион-

ные эффекты, термооптический, магнитооптический, нелинейный эффект Керра и пр. Вызванный ими дрейф нуля может существенно превосходить полезный сигнал. Решение проблемы повышения точности ВОГ неразрывно связано с изучением влияния на прибор среды его функционирования и в особенности температуры [8–9].

Исследованиями и разработкой приборов на базе ВОГ заняты специалисты ведущих фирм России, США, Германии, Франции, Японии, Израиля, среди которых следует назвать следующие: ООО «Физоптика» и ООО «Оптолинк» (г. Москва), ПНППК (Пермская научно-производственная приборостроительная компания), «Honeywell», «KVN Industries», «Litton», «Rockwell International», «Northrop», Лабораторию им. Ч. Дрейпера Массачусетского технологического института, «Litet», «Sagem», «Mitsubishi Phrecision Co» и «Cielo».

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью оценки погрешности измерений инклинометра, в состав которого входит ДУС, и выявления влияния погрешностей последнего на точность ИС, выполнено математическое моделирование. В соответствии с рис. 1, сигналы с акселерометра имеют вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= -k_A \cdot g \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi, \\ A_2 &= k_A \cdot g \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \\ A_3 &= k_A \cdot g \cdot \cos \theta, \end{aligned} \quad (3)$$

где k_A – масштабный коэффициент каждого акселерометра.

Подставляя (3) в (2), преобразуем формулу для нахождения азимута следующим образом:

$$\alpha = \arctg\left\{ \frac{D_1 \cdot \sin \varphi + D_2 \cdot \cos \varphi}{[(D_2 \cdot \sin \varphi - D_1 \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta - D_3 \cdot \sin \theta]} \right\}, \quad (4)$$

причем

$$D_i = k_D \cdot \omega_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (5)$$

где k_D – масштабный коэффициент каждого ДУС; ω_i – проекции угловой скорости Земли на соответствующие оси чувствительности используемых приборов.

В работе [11] рассматривалось влияние погрешности масштабного коэффициента ДУС на точность определения азимута. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования в измерительном модуле приборов на базе ДНГ и ВОГ, относительная погрешность масштабного коэффициента ε которых не пре-

вышает 5 % (заметим, что для большинства типов ДНГ и ВОГ ε не превышает десятые и сотые доли процента). Наиболее существенное влияние на точность определения азимута оказывает дрейф ДУС, который состоит из систематической и случайной составляющих. В настоящее время известны различные алгоритмические и конструктивные методы устранения систематической составляющей дрейфа как для ДНГ, так и для ВОГ. С учетом случайной составляющей дрейфа гироскопа d_i ($i = 1, 2, 3$) выходной сигнал с i -го ДУС имеет вид

$$D'_i = D_i + D_o = D_i \cdot \left(1 + \frac{d_i}{\omega_i} \right). \quad (6)$$

Подставляя соответствующие значения выходных сигналов (6) в формулу (4), можно определить зависимость абсолютной погрешности азимута $\Delta\alpha$ от величины случайного дрейфа ДУС.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования в среде Matlab 6.5 для следующих значений: $\varphi_{ш} = 57^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 0 - 180^\circ$, $\varphi = 0 - 360^\circ$. Используемый в инклинометрической системе прибор имел случайный дрейф $d = 0,2$ град/час (при этом учтены различные способы установки ДУС в измерительном модуле). В результате расчета был получен массив значений $\Delta\alpha$ при различных комбинациях визирных и зенитных углов. Для оценки наихудшей ситуации работы ИС из массива выделяются максимальные значения $\Delta\alpha$, по которым считается среднее значение погрешности азимута $\langle \alpha \rangle$.

Приведенные на рис. 2 зависимости свидетельствуют о том, что максимальная абсолютная погрешность определения азимута не превышает $1,4^\circ$, а следовательно, вполне удовлетворяет требованиям по точности, предъявляемым к современным ИС согласно технической инструкции по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах.

Разработанная схема моделирования измерительно-вычислительного комплекса инклинометра позволила выявить зависимость усредненной погрешности определения азимута $\langle \alpha \rangle$ ИС от случайного дрейфа ДУС для месторождений, находящихся в Тюмени и республике Башкортостан ($\varphi_{ш} = 57^\circ$), Нижневартовске ($\varphi_{ш} = 60^\circ$), Ноябрьске ($\varphi_{ш} = 63^\circ$) и Ямало-Ненецком автономном округе ($\varphi_{ш} = 73^\circ$).

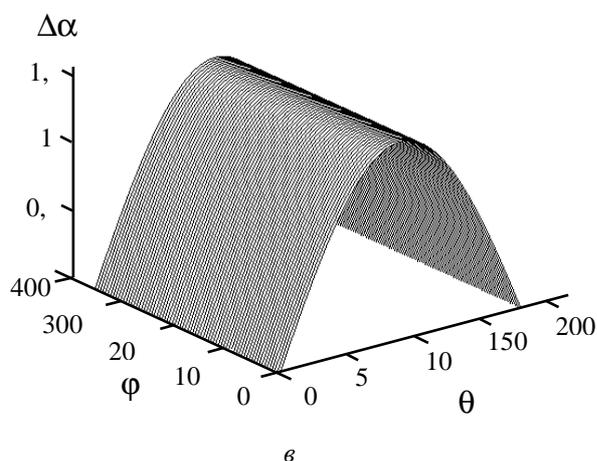
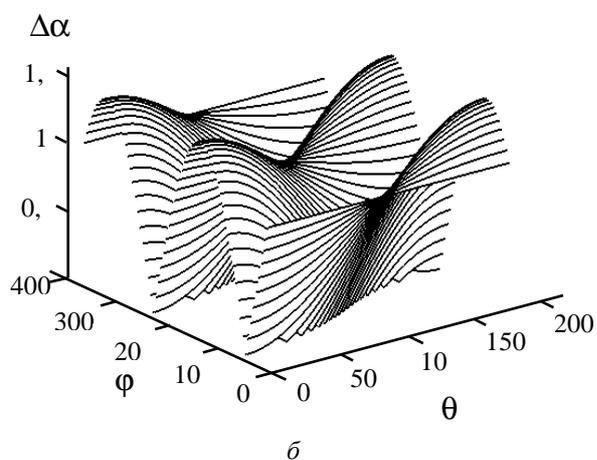
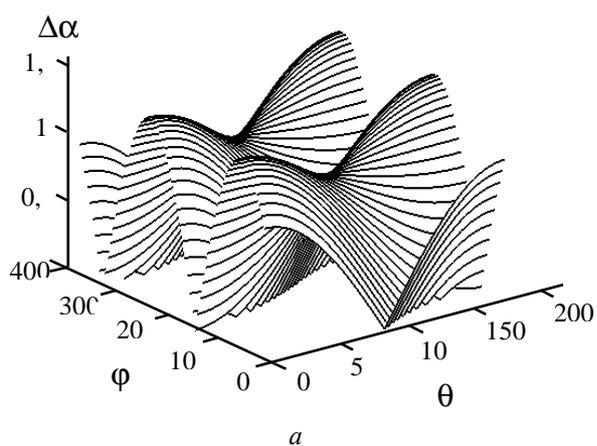


Рис. 2: а – $d_1 = 0,2$ град/час; $d_2 = d_3 = 0$;
 б – $d_2 = 0,2$ град/час; $d_1 = d_3 = 0$;
 в – $d_3 = 0,2$ град/час; $d_1 = d_2 = 0$

Представленные на рис. 3 графики свидетельствуют:

- о линейной зависимости усредненной погрешности определения азимута ИС от случайного дрейфа используемого ДУС;
- о возможности использования в измерительном модуле инклинометра ДУС, случайный дрейф которых не превышает 0,4 град/час.

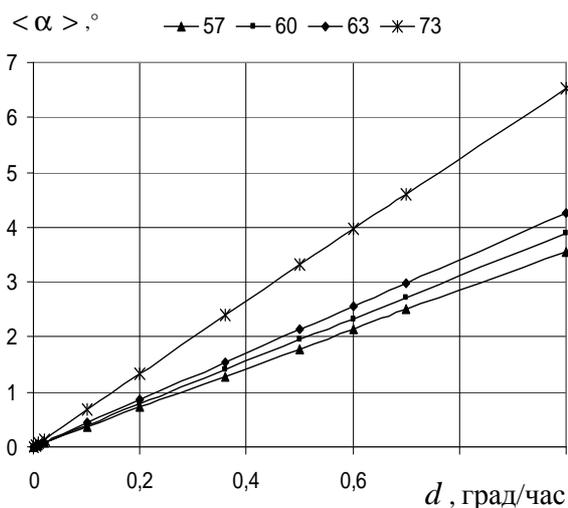


Рис. 3

На рис. 4 представлена перспектива использования современных ДНГ и ВОГ, в зависимости от относительной погрешности масштабного коэффициента (выраженной в %) и величины случайного дрейфа ДУС. Ограничивающие прямые, полученные в результате компьютерного моделирования, свидетельствуют о возможности использования гироскопов этих типов в составе ИС.

Отметим, что предельное значение дрейфа (0,4 град/час) резко ограничивает число моделей ДУС, серийно выпускаемых промышленностью, для малогабаритных инклинометров (диаметром 38–42 мм), которые в настоящее время имеют наибольший спрос.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДНГ И ВОГ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Современные инклинометры имеют диаметр от 36 до 100 мм, предназначены для работы в условиях высоких температур от 80 до 150 °С и давления от 60 до 120 МПа. Согласно технической инструкции по проведению геофизических исследований, ИС должна сохранять свои рабочие параметры в течение шести часов при воздействии вибраций частотой до 70 Гц и ускорением до 50g, и в течение 0,5 часа при воздействии ударов с ускорением до 100 g и частотой ударов до 30 ударов в минуту. Применение виброгасителей и амортизаторов позволяют снизить действие вибрационных перегрузок. Устранить влияние температуры можно с помощью систем температурной компенсации, применения охлаждающих устройств и термостойких элементов. Не менее важными параметрами, которые следует учитывать при оцен-

ке датчика информации, являются его точность и стоимость. При одинаковой точности предпочтителен тот ДУС, стоимость которого меньше.

Сравнение датчиков проведем, используя два критерия: «стоимость-эффективность» и обобщенный (интегральный). Для представления результатов сравнительного анализа по первому критерию воспользуемся пузырьковой диаграммой, откладывая по оси абсцисс стоимость датчика, а по оси ординат – значение усредненной погрешности определения азимута по данным компьютерного моделирования. Такая диаграмма позволяет увидеть, какой ценой достигается увеличение точности ИС. Размер «пузырька» при этом соответствует диаметру ДУС, что дает возможность оценить габариты измерительного модуля инклинометра.

На рис. 5 представлена «пузырьковая» диаграмма для серии ДНГ, из которой следует, что при требуемой точности определения азимута ($\approx 2^\circ \pm 10\%$) целесообразно использовать датчики: КИНД 05–081, ДНГ–15, ДНГ–5, МГ–4, ГВК–6, ГВК–18. Для наглядности на рисунке представлены «пузырьки», отражающие размер скважины (диаметр 42 и 90 мм).

На рис. 6 представлена «пузырьковая» диаграмма для серии ВОГ, из которой следует, что при требуемой точности определения азимута целесообразно использовать датчики: FOG52 и FOG53. Заметим, что при построении диаграмм на рис. 5 и рис. 6 не учитывались варианты, для которых погрешность измерения азимута превышала допустимые значения.

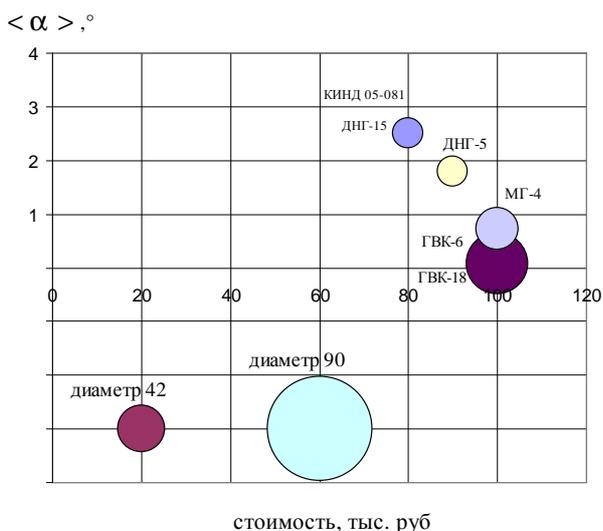


Рис. 5

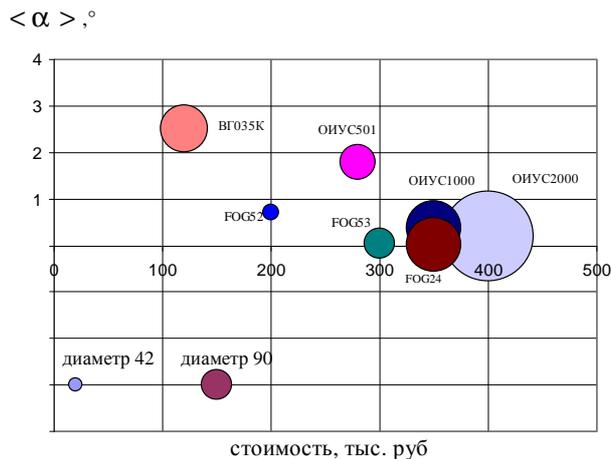


Рис. 6

Процедуру сравнения и последующего выбора ДУС можно также реализовать, используя обобщенный (интегральный) критерий. Согласно этому методу выбор происходит из исходного множества альтернатив по набору показателей качества. Применительно к решаемой нами задаче, множество альтернатив образуют все рассматриваемые модели ДНГ и ВОГ. В качестве показателей качества приняты такие характеристики как: ударопрочность, допустимые вибрации, максимальная рабочая температура. При необходимости список показателей может быть дополнен другими техническими характеристиками.

На следующем этапе исходные данные сводят в таблицу следующего вида:

	ПК ₁	ПК ₂	ПК ₃
A ₁	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃
A ₂	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃
...
A _n	a _{n1}	a _{n2}	a _{n3}

где A₁, A₂, ..., A_n – возможные варианты моделей датчиков (альтернативы) из которых нужно сделать выбор; ПК_j – показатели качества (ударопрочность, допустимые вибрации, максимальная рабочая температура), a_{ij} – оценка альтернативы A_i по показателю ПК_j.

Упорядочение альтернатив и дальнейшее принятие решения происходит при помощи линейной свертки:

$$S_i = a_{i1} \cdot k_1 + a_{i2} \cdot k_2 + a_{i3} \cdot k_3, \quad (7)$$

где k_i – весовые коэффициенты показателей качества.

Рассматриваемые нами в сравнении показатели качества имеют разные единицы измерения, по этой причине необходимо провести

нормирование показателей. Для этого подсчитывается сумма значений в столбце, и нормирование происходит путем деления каждого значения в столбце на полученную сумму. При этом сумма нормированных значений равна единице:

$$b_{im} = \frac{a_{im}}{\sum_{i=1}^n a_{im}}, \quad \sum_{i=1}^n b_{im} = 1, \quad m = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Чтобы сузить исходное множество альтернатив ДУС из рассмотрения были исключены те модели, погрешность масштабного коэффициента и величина дрейфа которых превышает допустимые значения 5 % и 0,4 град/час соответственно. Сужение также было проведено по габаритному критерию. На сегодняшний день наиболее востребованными можно считать скважные приборы с диаметром 42 мм. Однако на практике встречаются модели как с большими, так и с меньшими габаритами. По этой причине сравнение датчиков было проведено внутри трех диапазонов: $D_{in} \leq 40$, $D_{in} \leq 70$, $D_{in} \leq 90$ мм.

При сравнении было принято, что показатели качества равнозначны, и, следовательно, весовые коэффициенты равны:

$$k_1 = k_2 = k_3 = \frac{1}{3}.$$

Результаты сравнения по обобщенному критерию представлены в табл. 1 – 3. В результате ограничения множества альтернатив только две модели ВОГ участвовали в сравнении: FOG 52 и FOG 53. Представленные датчики проигрывают ДНГ по габаритному показателю, но при этом обладают большей вибро- и ударопрочностью. Соответственно лучше удовлетворяют требованиям по заявленным показателям качества.

Следует отметить, что для разработчиков ИС не менее важным является экономический показатель используемых ДУС. Средняя стоимость современных гироскопических ИС составляет 1–1,5 млн рублей. При этом стоимость датчиков угловых скоростей не должна превышать 10–15 % от общей стоимости ИС. Таким образом, при сравнении ДУС необходимо также учитывать экономический показатель, который рассчитывается следующим образом:

$$\mathcal{E}_i = \frac{S_i}{C_i}, \quad (9)$$

где C_i – нормированная стоимость i -го датчика. При этом приоритетной является та альтернатива, для которой указанное соотношение максимально. Результаты сравнения представлены

в табл. 1–3, при этом все модели расположены в порядке убывания приоритета.

Таблица 1
Результаты сравнительного анализа ДУС
($D_{in} \leq 40$ мм)

Модель	Тип датчика	Интегральная оценка	Экономический показатель
ДНГ-15	ДНГ	0,277	1,215
КИНД 05-081	ДНГ	0,233	1,02
ДНГ-5	ДНГ	0,255	0,993
МГ-4	ДНГ	0,233	0,816

Таблица 2
Результаты сравнительного анализа ДУС
($D_{in} \leq 70$ мм)

Модель	Тип датчика	Интегральная оценка	Экономический показатель
ДНГ-15	ДНГ	0,149	1,398
КИНД 05-081	ДНГ	0,123	1,158
ДНГ-5	ДНГ	0,136	1,136
ГВК-6	ДНГ	0,133	0,998
ГВК-18	ДНГ	0,133	0,998
МГ-4	ДНГ	0,123	0,926
FOG52	ВОГ	0,2	0,753

Таблица 3
Результаты сравнительного анализа ДУС
($D_{in} \leq 90$ мм)

Модель	Тип датчика	Интегральная оценка	Экономический показатель
ДНГ-15	ДНГ	0,126	1,66
КИНД 05-081	ДНГ	0,104	1,365
ДНГ-5	ДНГ	0,115	1,344
ГВК-6	ДНГ	0,112	1,18
ГВК-18	ДНГ	0,112	1,18
МГ-4	ДНГ	0,104	1,092
FOG52	ВОГ	0,166	0,874
FOG53	ВОГ	0,158	0,555

Стоимость современных ВОГ достаточно высока по сравнению с ДНГ. При учете экономического показателя модели ДНГ занимают лидирующие позиции.

ДНГ уже нашли применение в современных ИС. Например, в НИИ прикладной механики им. академика В. И. Кузнецова (г. Москва) разработали опытный образец гироскопического инклинометра ИГМ 36–80/60 с диаметром защитного корпуса 36 мм [3]. Инклинометрическая система содержит минимальное количество датчиков информации, обеспечивающих автономное определение азимута и зенитного угла.

Используемый в этой системе ДНГ имеет две оси чувствительности и установлен в механизме, который позволяет менять его ориентацию вокруг продольной оси инклинометра на 180° . В состав ИС входят два маятниковых акселерометра, охваченные (как и ДНГ) обратными связями. С помощью этого инклинометра проводят измерения на нефтяных скважинах Тюменской области, Краснодарского края, рудниках Норильска, Ямала и Железнодорожска.

ОАО «Электромеханика» совместно с ЦНИИ «Электроприбор» занимается проектированием и разработкой малогабаритного инклинометра УГИ диаметром 42 мм. Заложенные в ИС конструкторские решения позволяют использовать систему при исследовании скважин различных типов: наклонных, горизонтальных, пологих, восстающих, смешанного типа. ИС успешно функционирует на месторождениях Карелии, Магадана, Дальнего Востока, Курска и в других районах России. Проведенные натурные испытания подтвердили высокую точность и надежность такой гироскопической ИС.

Инклинометр УГИ позволяет производить непосредственное вычисление элементов матрицы ориентации ствола скважины. Различные его модификации могут работать в 3 основных режимах: в непрерывном, точечном и комбинированном.

Среди фирм производителей инклинометров на базе ДНГ следует также отметить: НПП «Азимут» (Украина), ООО «Тренд» (г. Миасс), Sperry Drilling Services (США), Gyrodata (США).

Решение проблемы повышения точности ВОГ неразрывно связано с изучением влияния на прибор среды его функционирования и в особенности – внутренних и внешних температурных воздействий. Основной подход при этом заключается в том, что на базе единой концепции исследования, методики и алгоритмов решаются задачи расчета и анализа температурных полей теплового дрейфа, синтеза систем терморегулирования, конструктивных и других средств минимизирующих температурные погрешности прибора [9, 12]. Математическое моделирование позволило получить оценки теплового дрейфа с системой терморегулирования волоконной бухты и источника оптического излучения при детерминированных и случайных температурных воздействиях. Совместно с использованием термостатирования возможно применение схемно-алгоритмической компенсации. В наземный вычислитель закладываются соответствующие формулы и алгоритмы математической модели ВОГ. Значения

температуры снимаются с термодатчиков, расположенных таким образом в приборе, чтобы измерить нестационарный радиальный температурный перепад. По полученной информации вычисляется сигнал пропорциональный угловой скорости дрейфа, который подается в систему для его компенсации [12]. Отметим, что известны предложения по совместному применению в измерительном модуле инклинометра ВОГ и ДНГ [5]. При этом ось чувствительности ВОГ должна быть ориентирована параллельно продольной оси корпуса инклинометра и ортогонально осям чувствительности ДНГ.

ООО «Тренд» (г. Миасс) выпускает малогабаритный инклинометр ИГМ 33/42 с наружным диаметром 33 или 42 мм. Этот инклинометр предназначен для определения траектории скважин и трубопроводов (измерение зенитного угла, азимута, положения апсидальной плоскости в наклонных и наклонно-горизонтальных скважинах). ИС может использоваться как в обсаженных, так и необсаженных скважинах с искаженным магнитным полем, в условиях высоких широт. Погрешность определения азимута составляет $1,5^\circ$. В состав измерительного модуля входят ВОГ, ДНГ и кремниевые акселерометры. Технические решения на разработанные измерительно-вычислительные комплексы ИС защищены патентами [3, 4, 13].

В настоящее время ведутся работы по разработке решений для одноосных и трехосных приборов на базе ВОГ, с целью оптимизации стоимостных, точностных, энергетических и габаритно-массовых характеристик. Ожидаемое уменьшение стоимости таких ДУС неразрывно связано со снижением цен на волоконно-оптические компоненты вследствие массового производства средств связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности и перспективы внедрения ДНГ и ВОГ в инклинометрическую технику. Показано, что в этом случае случайный дрейф таких ДУС не должен превышать $0,4$ град/час, а относительная погрешность масштабного коэффициента – 5% . Предложен подход, позволяющий осуществлять выбор ДУС в измерительном модуле ИС, основанный:

- на информации о требуемой точности определения азимута и стоимости применяемого при этом датчика;
- на сопоставлении альтернатив по набору таких показателей качества как ударопрочность, допустимые вибрации, максимальная рабочая температура, используя обобщенный критерий.

Многочисленные достоинства ВОГ, результаты компьютерного моделирования, а также тот факт, что многие из существующих проблем, связанных с использованием этого типа гироскопа в подземной навигации, близки к своему решению, позволяют говорить о больших перспективах внедрения ВОГ в инклинометрическую технику. Высокие метрологические характеристики ДНГ и ВОГ, позволяющие применять их в ИС, достигаются введением алгоритмической компенсации температурной зависимости, а также оптимальной фильтрацией оптических и электрических сигналов. Для устранения дрейфа ДНГ целесообразно использовать поворотный механизм, позволяющий менять положение корпуса прибора на 180° вокруг продольной оси инклинометра. Совместное применение ВОГ и ДНГ позволяет снизить стоимость инклинометра, уменьшить габаритные размеры измерительного модуля и повысить точность ИС. Необходимо стимулировать фирмы-производители ДНГ и ВОГ к разработке новых малогабаритных конструкций с необходимыми техническими характеристиками для использования в системах подземной навигации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алимбеков Р. И., Рогатых Н. П., Терешин В. Г.** Построение инклинометрических комплексов с использованием инерциальных технологий // Вестник УГАТУ. 2002. № 2. С. 145–149.
2. Современные информационно-измерительные комплексы систем подземной навигации и ориентации / Я. И. Биндер [и др.] // Гироскопия и навигация. 2003. № 1. С. 110–123.
3. Малогабаритный гироскопический инклинометр / Р. А. Белов [и др.] // Патент РФ № 2178523. 2002. Бюл. № 2.
4. Гироскопический инклинометр и способ определения угловой ориентации скважин / Е. Ф. Белов [и др.] // Патент РФ № 2282717. 2006. Бюл. № 24.
5. **Биндер Я. И., Падерина Т. В.** Малогабаритный инерциальный измерительный модуль для скважин малого диаметра // Свидетельство РФ на полезную модель № 33974. 20.11.2003.
6. Инклинометры и скважные приборы. Опыт создания и эксплуатации / В. В. Шекшня [и др.] // Гироскопия и навигация. 2006. № 1. С. 35–39.
7. Малогабаритные гироскопические инклинометры: проблемы, концепции развития, результаты разработок и внедрения / Я. И. Биндер [и др.] // Гироскопия и навигация. 2006. № 3. С. 19–29.
8. **Соколов Д. А.** Перспективы использования малогабаритных волоконно-оптических гироскопов в гироскопии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. № 44. С. 154–159.
9. **Терешин В. Г., Иванова Г. А.** Развитие теории и практики волоконно-оптических гироскопов. Уфа: УГАТУ, 2008. 42 с. Деп. в ВИНТИ 03.06.08, № 478–В2008.
10. **Терешин В. Г., Иванова Г. А.** К вопросу выбора гироскопических датчиков для инклинометрической системы. Уфа: УГАТУ, 2010. 42 с. Деп. в ВИНТИ 28.09.10, № 551–В2010.
11. **Терешин В. Г., Иванова Г. А.** Перспективы использования волоконно-оптических гироскопов в инклинометрической технике // Вестник УГАТУ. 2011. № 1. С. 70–75.
12. **Джашитов В. Э., Панкратов В. М.** Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб.: ГНЦРФ–ЦНИИ «Электроприбор», 2001. 150 с.
13. Гироскопический инклинометр и способ определения угловой ориентации скважин / Е. Ф. Белов [и др.] // Патент РФ № 2104490. 1998. Бюл. № 4.

ОБ АВТОРАХ

Терешин Валерий Глебович, проф. каф. теор. мех, действ. чл. Академии навигации и управления движением. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по гироскопии (ЮУрГУ, 1993). Иссл. в обл. механики гироскопических приборов и устройств.

Иванова Галина Алексеевна, ст. преп. той же каф. Дип. инженер по средствам связи с подвижными объектами (УГАТУ, 2006). Готовит дис. по использованию гироскопических приборов в системах ориентации и навигации подвижных объектов.