

В.Г. Терешин, Г.А. Иванова
ФГБОУ ВПО Уфимский
государственный авиационный
технический университет

V.G. Tereshin, G.A. Ivanova
FSBEI Ufa state aviation technical
university

Рассмотрены перспективы внедрения гироскопических устройств в инклинометрическую технику. Предложен подход, позволяющий осуществить выбор датчика угловой скорости (ДУС) в измерительном модуле инклинометрической системы (ИС), используя следующие критерии: Парето и обобщенный (интегральный).

This article covers material on features and prospects for the use of gyroscopic device in the inclinometer. Furnishes the way to carry out a choice of the angular-rate sensor in the measuring module of the deviation survey using Pareto and integral criterions.

Ключевые слова: динамически настраиваемые, волоконно-оптические и волновые твердотельные гироскопы; системы подземной навигации; гироскопический инклинометр.

Keywords: dynamically tuned, fiber-optic and gyroscope based on elastic waves in solids; underground navigation system; gyroscopic inclinometer.

Состояние вопроса

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. Необходимость определения параметров ориентации скважин, пробуренных в средах с аномальными магнитными свойствами, а также обсаженных стальными трубами, приводит к целесообразности применения гироскопических инклинометров. В работе рассматриваются особенности и перспективы использования в ИС инерциальных датчиков на базе динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ), волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и волновых твердотельных гироскопов (ВТГ).

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 (рисунок 1), причем \vec{e}_i, \vec{b}_j ($i, j = 1, 2, 3$) – орты неподвижного R_b 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 забою [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_b записываются следующим образом:

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

$$\vec{\omega}^o = (\cos \varphi_{ш}, 0, -\sin \varphi_{ш}), \quad (1)$$

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

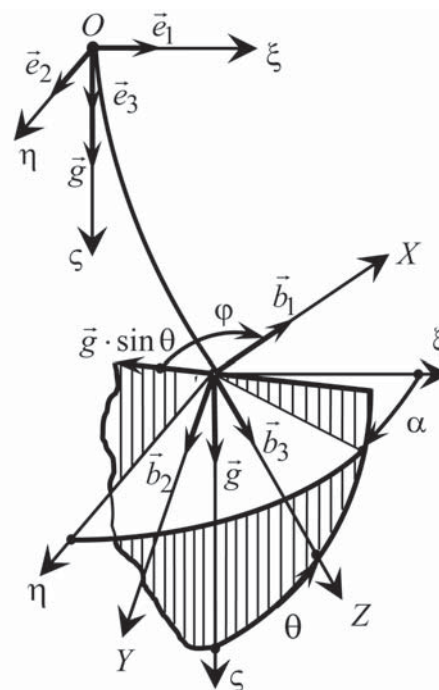


Рисунок 1. К определению пространственной ориентации инклинометра

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

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

$$\vec{\omega}^o = (\cos \varphi_{ин}, 0, -\sin \varphi_{ин}), \quad (2)$$

где A_i, D_j ($i, j = 1, 2, 3$) – 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.

Математическое моделирование инклинометрической системы и приложение результатов

С целью оценки погрешности измерений инклинометра, в состав которого входит гироскопический

ДУС, и выявления влияния погрешностей последнего на точность ИС выполнено математическое моделирование. Исследуется схема гироскопического инклинометра содержащего триаду одноосных ДУС жестко укрепленных на корпусе инклинометра. В работе [1] показано, что формулу для нахождения азимута можно представить в следующем виде:

$$\alpha = \arctg \left[\frac{(D_1 \cdot \sin \varphi + D_2 \cdot \cos \varphi)}{(D_2 \cdot \sin \varphi - D_1 \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta - D_3 \cdot \sin \theta} \right], \quad (3)$$

причем

$$D_i = k_D \cdot \omega_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (4)$$

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

В работе [7, 8] рассматривалось влияние погрешности масштабного коэффициента ДУС на точность определения азимута. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования в изме-

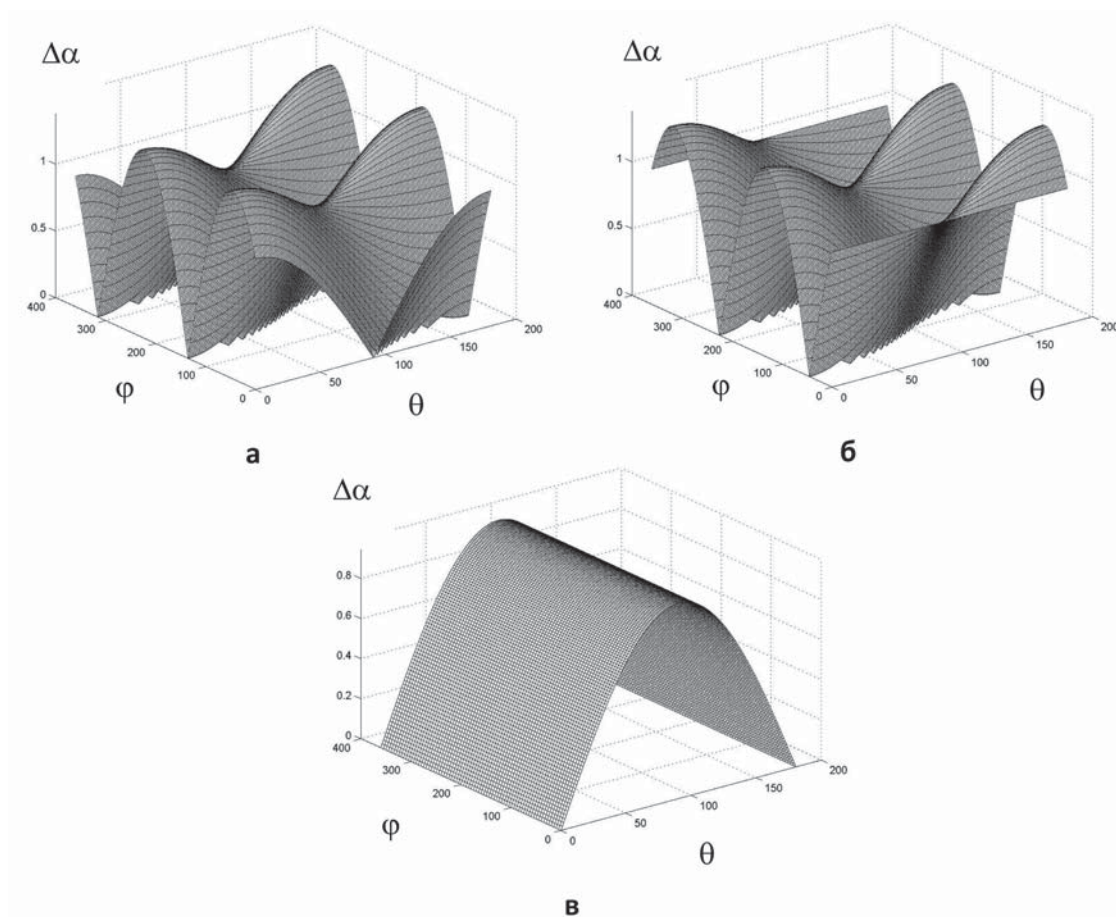


Рисунок 2. Зависимости погрешности определения азимута от дрейфа гироскопа при различных способах установки ДУС:

- 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; $d_1 = d_2 = 0$;

рительном модуле приборов на базе ДНГ, ВОГ и ВТГ, относительная погрешность масштабного коэффициента ϵ которых не превышает 5% (заметим, что для большинства типов рассматриваемых моделей ϵ не превышает десятые и сотые доли процента). Наиболее существенное влияние на точность определения азимута оказывает дрейф гироскопа. С учетом его случайной составляющей d_i ($i = 1, 2, 3$) выходной сигнал с i -го ДУС имеет вид

$$D'_i = D_i + D_o = D_i \cdot \left(1 + \frac{d_i}{\omega_i}\right). \quad (5)$$

Подставляя соответствующие значения выходных сигналов (5) в формулу (3), можно определить зависимость абсолютной погрешности азимута от величины случайного дрейфа ДУС.

На рисунке 2 представлены результаты компьютерного моделирования в среде Matlab 6.5 для следующих значений: $\varphi_{\text{ш}} = 57^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 0-180^\circ$, $\varphi = 0-360^\circ$. 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 при различных комбинациях визирных и зенитных углов.

Приведенные на рисунке 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 ($\varphi_{\text{ш}} = 57^\circ$), Нижневартовске ($\varphi_{\text{ш}} = 60^\circ$), Ноябрьске ($\varphi_{\text{ш}} = 63^\circ$) и Ямало-Ненецком автономном округе ($\varphi_{\text{ш}} = 73^\circ$).

Полученные результаты свидетельствуют:

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

На рисунке 3 представлена перспектива использования современных ДНГ, ВОГ и ВТГ, в зависимости от относительной погрешности масштабного коэффициента (выраженной в %) и величины случайного дрейфа ДУС. Ограничивающие прямые, полученные в результате компьютерного моделиро-

вания, свидетельствуют о возможности использования гироскопов этих типов в составе ИС.

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

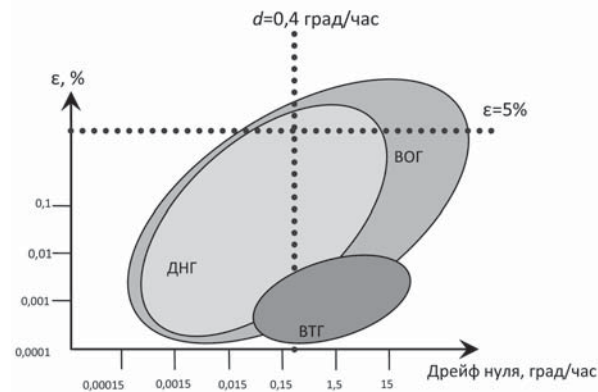


Рисунок 3. К оценке перспективы использования гироскопических датчиков в ИС

Сравнительный анализ ДНГ, ВОГ и ВТГ, предназначенных для инклинометрической системы

К подземным навигационным системам предъявляются жесткие эксплуатационные и конструктивные требования. Так современные инклинометры должны сохранять свои рабочие параметры в условиях высоких температур, давления, вибраций и ударов. При этом размеры самого скважного прибора ограничены размерами исследуемой скважины.

Сравнение датчиков проведем, используя два критерия: Парето и обобщенный (интегральный). Перечисленные методы позволяют осуществить выбор из исходного множества альтернатив по набору показателей качества. Применительно к решаемой нами задаче, множество альтернатив образуют все рассматриваемые модели ДНГ, ВОГ и ВТГ (А). В качестве показателей качества приняты такие характеристики как: ударопрочность, допустимые вибрации, максимальная рабочая температура (ПК_ж). При необходимости список показателей может быть дополнен другими техническими характеристиками.

Согласно векторному критерию Парето, задача выбора сводится к построению оптимального множества решений из множества всех предложенных альтернатив:

$$OPT A \subset A.$$

Для этого все альтернативы сравниваются попарно по всей совокупности ПК и далее из множества удаляются доминируемые решения. При этом решение считалось доминируемым при выполнении условия:

$$PK_j(A_i) \geq PK_j(A_{i+1}); i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

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.

Далее все датчики проходили процедуру попарного сравнения внутри каждого показателя качества, результаты сравнения представлены в таблицах 1-3.

Из таблиц видно, что к доминируемым решениям относятся модели: МГ-4 и КИНД 05-081. Остальные ДУС несравнимы по всем показателям качества (недоминируемые) и представляют собой множество Парето-оптимальных решений.

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

Модель	ПК1 (ударопрочность)	ПК2 (допустимые вибрации)	ПК3 (максимальная рабочая температура)
КИНД 05-081			
ДНГ-15			
ДНГ-5			
МГ-4			

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

Модель	ПК1 (ударопрочность)	ПК2 (допустимые вибрации)	ПК3 (максимальная рабочая температура)
FOG52			
КИНД 05-081			
ДНГ-15			
ДНГ-5			
ГВК-6			
ГВК-18			
МГ-4			
медикон			
ТВГ-3			
ТВГ-4			

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

Модель	ПК ₁ (ударопрочность)	ПК ₂ (допустимые вибрации)	ПК ₃ (максимальная рабочая температура)
FOG53			
FOG52			
КИНД 05-081			
ДНГ-15			
ДНГ-5			
ГВК-6			
ГВК-18			
МГ-4			
медикон			
ТВГ-3			
ТВГ-4			

Примечание: заштрихованная ячейка соответствует оптимальной альтернативе по рассматриваемому показателю качества.

Получить количественную оценку предпочтения одного ДУС над другим можно воспользовавшись обобщенным (интегральным) критерием. Для этого

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 A_1, A_2, \dots, 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:

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

Сужение исходного множества альтернатив осуществляется по принципу, описанному выше на основе точностного показателя. Дальнейшее сравнение датчиков проводится 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 таблицах 4 – 6. В результате ограничения множества альтернатив в сравнении участвовали: пять моделей ДНГ, две модели ВОГ и три модели ВТГ.

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 самих ДУС 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 таблицах 4 – 6, при этом все модели расположены в порядке убывания приоритета.

Безусловно, ДНГ лидируют в группе датчиков, удовлетворяющих конструктивным требованиям малогабаритных ИС. К тому же рассматриваемые ДНГ имеют две или три измерительные оси, в то время как все участвующие в сравнении ВОГ и ВТГ одноосные. Однако, ДНГ проигрывают по эксплуатационным показателям, в таблицах интегральная оценка ВОГ и ВТГ гораздо выше. При учете экономического показателя модели ВОГ спускаются в конец списка приоритетов. Это связано с тем, что стоимость современных ВОГ достаточно высока по сравнению с ДНГ и ВТГ.

Таблица 4. Результаты сравнительного анализа ДУС ($D_m \leq 40$ мм)

Модель	Тип датчика	Интегральная оценка	Экономический показатель
ДНГ-15	ДНГ	0,361	1,128
КИНД 05-081	ДНГ	0,333	0,954
ДНГ-5	ДНГ	0,305	0,925

Таблица 5. Результаты сравнительного анализа ДУС ($D_m \leq 70$ мм)

Модель	Тип датчика	Интегральная оценка	Экономический показатель
ВТГ «Медикон»	ВТГ	0,129	1,871
ТВГ-3	ВТГ	0,129	1,871
ДНГ-15	ДНГ	0,104	1,141
ТВГ-4	ВТГ	0,129	1,123
КИНД 05-081	ДНГ	0,085	0,934
ДНГ-5	ДНГ	0,095	0,922
ГВК-6	ДНГ	0,093	0,809
ГВК-18	ДНГ	0,093	0,809
FOG52	ВОГ	0,140	0,610

Таблица 6. Результаты сравнительного анализа ДУС ($D_m \leq 90$ мм)

Модель	Тип датчика	Интегральная оценка	Экономический показатель
ВТГ «Медикон»	ВТГ	0,114	2,224
ТВГ-3	ВТГ	0,114	2,224
ДНГ-15	ДНГ	0,093	1,363
ТВГ-4	ВТГ	0,114	1,334
КИНД 05-081	ДНГ	0,075	1,110
ДНГ-5	ДНГ	0,084	1,099

ГВК-6	ДНГ	0,082	0,964
ГВК-18	ДНГ	0,082	0,964
FOG52	ВОГ	0,122	0,716
FOG53	ВОГ	0,116	0,454

Результаты сравнительного анализа демонстрируют хорошую перспективу измерительного модуля на базе ВТГ. Эти ДУС обладают хорошими точностными, эксплуатационными, стоимостными показателями.

Что касается примеров использования перечисленных ДУС, то 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 [2]. 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 Железногорска.

ЦНИИ «Электроприбор» занимается проектированием и разработкой малогабаритного универсального гироскопического инклинометра (УГИ) диаметром 42 мм [5]. 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).

Вместе с тем, используемые в инклинометрах ДНГ чувствительны к вибрациям и имеют недостаточную ударную прочность. Последнее вызывает необходимость их виброударной защиты с применением амортизаторов. Для обеспечения точности ДНГ в широком диапазоне температур необходимо термостатирование прибора. Эти особенности суще-

ственно усложняют измерительную систему, а порой делают невозможным использование ДНГ при совмещении инклинометра и бурового устройства в едином комплексе.

Решение проблемы повышения точности ВОГ неразрывно связано с изучением влияния на прибор среды его функционирования и в особенности внутренних и внешних температурных воздействий. Основным подходом 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 [6, 9]. 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 [9]. Отметим, что известны предложения по совместному применению в измерительном модуле инклинометра ВОГ и ДНГ [4]. При этом ось чувствительности ВОГ должна быть ориентирована параллельно продольной оси корпуса инклинометра и ортогонально осям чувствительности ДНГ. ООО «Тренд» (г. Миасс, Челябинская область) 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 . В состав измерительного модуля входят ВОГ, ДНГ и кремниевые акселерометры. Технические решения на разработанные измерительно-вычислительные комплексы ИС защищены патентами [2, 3, 10].

Американская корпорация Northrop Grumman (NG) разрабатывает линейку гироскопов HRG (hemispherical resonator gyro, ВТГ) с высокими техническими характеристиками. Модели HRG нашли широкое применение в космосе. На сегодняшний день гироскопы NG находят применение в системах

навигации различных классов объектов (в том числе и подземной навигации). Модель HRG 130R предназначена для работы в режиме высоких температур до 155 °С. По мнению разработчиков эта модель может быть использована в качестве первичного датчика в ИС, поскольку помимо расширенного диапазона рабочих температур, обладает хорошей вибрационной и ударной прочностью [11].

Научно-производственное предприятие «Медикон» занимается конструированием и производством ВТГ для решения задач инклинометрии. Прибор имеет следующие технические характеристики: случайная составляющая дрейфа – 0,1 град/ч; максимальная измеряемая скорость – 0,5 град/с; потребляемая мощность – 1,5 Вт; вес механической части датчика – 97 г; габариты – Ø40x41 мм; максимальная рабочая температура – +80 °С; вибрационная прочность – 60 g; время готовности – 5 с; время наработки на отказ – не менее 10 000 ч [12].

Заключение

Предложенный подход и полученные результаты позволяют говорить о перспективности использования гироскопических датчиков на базе ДНГ, ВОГ и ВТГ в измерительном модуле ИС. Для малогабаритных инклинометров более предпочтительны модели ДНГ и ВТГ, которые при требуемой точности имеют меньшие размеры, чем ВОГ. Следует отметить, что в настоящее время ведутся работы по выработке решений для одноосных и трехосных приборов на основе ВОГ, с целью оптимизации стоимостных, точностных, энергетических и габаритно-массовых характеристик. Ожидаемое уменьшение стоимости таких ДУС связано со снижением цен на волоконно-оптические компоненты вследствие массового производства средств связи. Интересны предложения по совместному применению гироскопических датчиков различных типов, что позволяет уменьшить габаритные размеры измерительного модуля и повысить точность ИС [1, 4, 13]. Необходимо стимулировать фирмы-производители перечисленных инерциальных датчиков к разработке новых малогабаритных конструкций с необходимыми техническими характеристиками для использования в системах подземной навигации.

ЛИТЕРАТУРА

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. Пат. РФ № 2178523 Малогабаритный гироскопический инклинометр / Белов Р.А., Колесников А.А., Котов А.Н., Мезенцев А.П. // Бюл. 2002. № 2.
3. Пат. РФ № 2282717 Гироскопический инклинометр и способ определения угловой ориентации скважин / Белов Е.Ф. и др. // Бюл. 2006. № 24.
4. Св-во РФ на полезную модель №33974. Малогабаритный инерциальный измерительный модуль для скважин малого диаметра / Биндер Я.И., Падерина Т.В. - 20.11.2003.
5. Малогабаритные гироскопические инклинометры: проблемы, концепции развития, результаты разработок и внедрения / Биндер Я.И. и др. // Гироскопия и навигация. 2006. №3. С. 19–29.
6. 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.
7. 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.
8. Терешин В.Г., Иванова Г.А. Перспективы использования волоконно-оптических гироскопов в инклинометрической технике // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15. № 1 (41). С.148–152.
9. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб.: ГНЦРФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2001. 150 с.
10. Пат. РФ № 2104490 Гироскопический инклинометр и способ определения угловой ориентации скважин / Белов Е. Ф. и др. // Бюл. 1998. № 4.
11. URL: <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/hrg/assets/hrg.pdf>
12. URL: <http://www.medicon-miass.ru/giroscozia>
13. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Розенцвейн В.Г. Высокопроизводительная прецизионная инклинометрическая съемка скважин малого диаметра. Результаты практического внедрения // Гироскопия и навигация. 2009. №1. С. 52–63.

Терешин В.Г., д.т.н., профессор кафедры «Теоретическая механика», ФГБОУ ВПО УГАТУ

Tereshin V.G., dr. tech.sci, professor of chair «Theoretical mechanics», FSBEI USATU

Иванова Г.А., старший преподаватель кафедры «Теоретическая механика», ФГБОУ ВПО УГАТУ

Ivanova G.A., senior lecturer of chair «Theoretical mechanics», FSBEI USATU

e-mail: ivanova_ga@inbox.ru