

МИНИАТЮРНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ

КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

Волоконно-оптические датчики вращения, или волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), – одни из наиболее совершенных измерителей угловой скорости. Они надежны, поскольку не имеют вращающихся частей и вакуумируемых полостей. Рассматривается конструкция, технология изготовления и характеристики миниатюрных ВОГ, которые разрабатывает и производит предприятие "Физоптика".

ВОГ обладают рядом технических преимуществ по сравнению с более "старыми" механическими и лазерными гироскопами. Перечислим их.

- Высокие эксплуатационные характеристики: надежность, долговечность и устойчивость к ударам и вибрациям, малые габариты, масса и энергопотребление, совместимость с микроэлектронными устройствами обработки информации.
- Высокие метрологические характеристики: высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, малый дрейф нуля и малое время выхода на режим.
- Высокая технологичность в серийном производстве.
- Низкая стоимость.

Методика измерения угловой скорости с помощью ВОГ основана на эффекте Саньяка. Кроме того, в ВОГ наблюдается множество других, малоисследованных физических явлений: поляризационные эффекты, термооптический, магнитооптический и нелинейный эффект Керра и т. д. Вызванный ими дрейф нуля может намного превосходить полезный сигнал. Как уменьшить дрейф нуля в условиях технических и экономических ограничений? Этот вопрос заботит разработчиков на протяжении многих лет. Высокие метрологические характеристики ВОГ достигаются путем оптимальной фильтрации оптических и электрических сигналов.

"Физоптика" разрабатывает и производит миниатюрные ВОГ среднего класса: дрейф нуля 0,1–100 град/ч, точность коэффициента преобразования 0,1–1 % [1]. Конкурентоспо-



В.Листвин, В.Логозинский

собными ВОГ среднего класса делает их стоимость, габариты и масса. Оптимизировать эти показатели можно с помощью наиболее простой схемы прямого детектирования угловой скорости (схема с разомкнутой петлей обратной связи open loop) (рис.1) и цельноволокновой технологии изготовления оптической части. Рассмотрим особенности конструкции, технологию изготовления и эксплуатационные характеристики миниатюрных ВОГ.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВОГ

ВОГ состоит из двух основных узлов (рис. 1, 2): волоконно-оптического преобразователя вращения и блока электроники. Преобразователь вращения представляет собой волоконный кольцевой интерферометр с интегрированным в него излучательным модулем на основе суперлюминесцентного диода (СЛД), работающего на длине волны 0,83 мкм. СЛД обладает большой яркостью и низкой когерентностью. Это позволяет уменьшить сдвиг нуля, который возникает из-за нелинейного эффекта Керра, обратного релеевского рассеяния света в волокне и поляризационной компоненты.

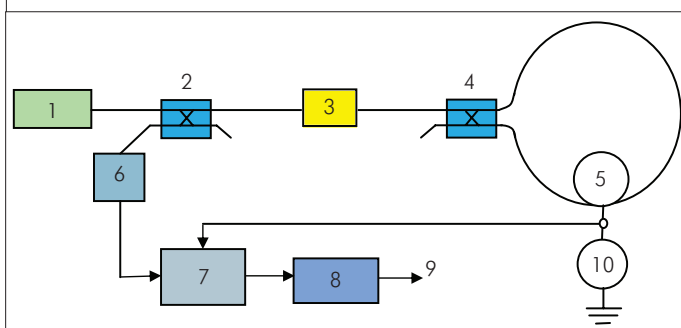


Рис.1. Схема ВОГ с гармонической фазовой модуляцией (open loop): 1 – источник, 2 – второй ответвитель, 3 – поляризатор, 4 – первый ответвитель, 5 – фазовый модулятор, 6 – фотоприемный модуль, 7 – синхронный детектор, 8 – процессор, 9 – выход, 10 – генератор



Блок электроники содержит синхронный детектор с периодической калибровкой нуля и контролем фазы опорных импульсов [2]. В блок интегрирован фотоприемный модуль (ФПМ) на основе кремниевого *p-i-n*-диода. Блок также управляет фазовым модулятором и источником излучения. Элементы в преобразователе вращения расположены в соответствии с минимальной конфигурацией ВОГ: поляризатор и отрезок волокна между поляризатором и первым ответвителем производят пространственную и поляризационную фильтрацию излучения. Требования к качеству поляризатора очень высоки. Поэтому для эффективной поляризационной фильтрации излучения в ВОГ нужны поляризаторы с экстинкцией до 60 дБ. Кроме того, поляризатор должен быть компактным и обязательно волоконным.

Для детектирования сигнала вращения используют фазовую модуляцию с последующим синхронным детектированием. При фазовой модуляции отклик интерферометра на первой гармонике частоты модуляции пропорционален $\sin \delta$ (δ – сдвиг фаз при вращении интерферометра) и сигнал на выходе ВОГ при малых угловых скоростях линеен ($\sin \delta \sim \delta$). Фазовая модуляция производится за счет периодического растяжения участка волокна, намотанного на пьезокерамическое кольцо фазового модулятора.

К синхронному детектору предъявляют высокие требования, поскольку на частоте модуляции, кроме полезного сигнала, присутствует также и сигнал помехи, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ (квадратурный сигнал). Он возникает из-за амплитудной модуляции излучения (в основном из-за модуляции состояния поляризации). Квадратурный сигнал может превосходить полезный сигнал в сотни раз [3].

Схема с прямым детектированием чувствительна к изменению длины волны, мощности источника излучения, индексу модуляции, потерям света в волокне и электронным дрейфам. Блок электроники проектируется так, чтобы снизить влияние этих факторов. Он реализован в виде четырехслойной печатной платы 40 · 50 мм, которую собирают по технологии поверхностного монтажа.

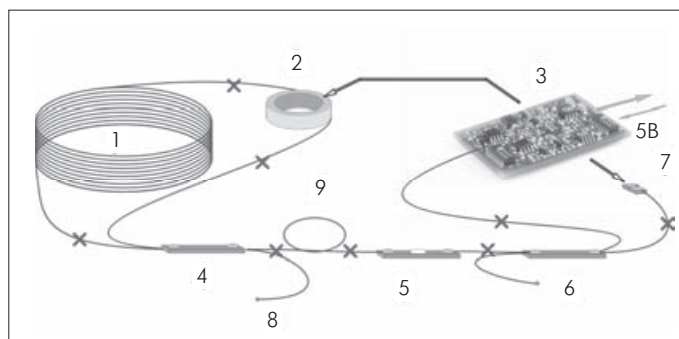


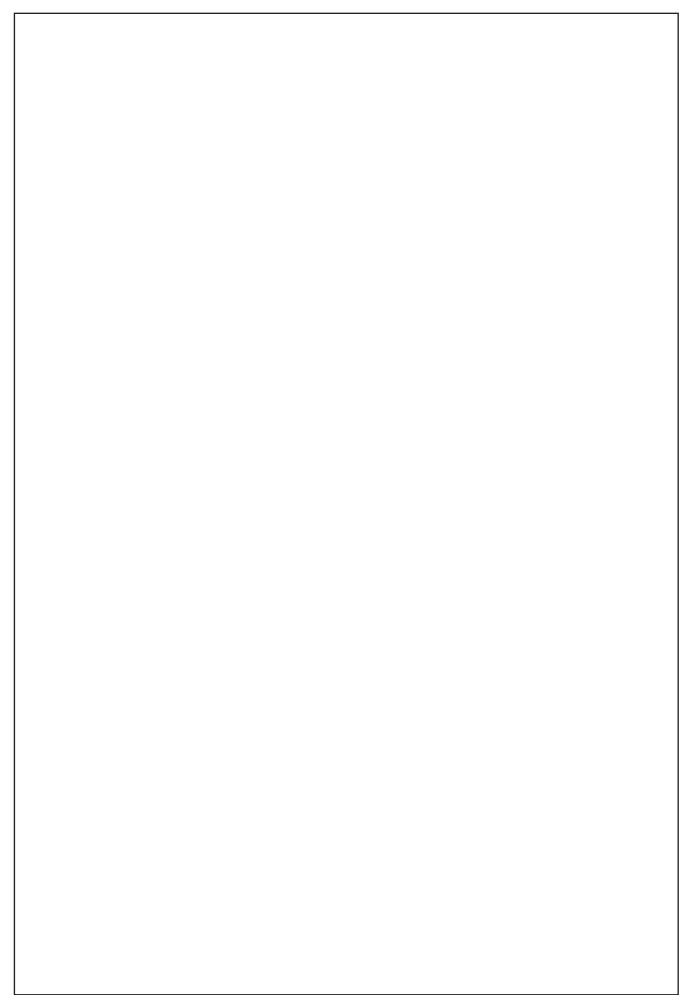
Рис.2. Преобразователь вращения (до укладки в корпус). Крестиками указаны места сварных соединений волокон (виртуальных): 1 – оптический контур, 2 – фазовый модулятор, 3 – блок электроники, 4 – первый ответвитель, 5 – поляризатор, 6 – второй ответвитель, 7 – СЛД, 8 – оптическая заглушка, 9 – пространственный (модовый) фильтр

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВОГ

В схеме с прямым детектированием стоимость ВОГ минимальна. Оптическая часть схемы целиком состоит из волоконных элементов (без использования интегральной оптики). Обычно применяют готовые волоконные элементы, которые соединяются с помощью сварки. Сварка волокон усложняет и удорожает производство. Изготовить миниатюрный прибор трудно, так как соединений волокон получается много (рис. 2), и волокна нужно укладывать специальным образом в корпусе датчика.

В "Физоптике" разработана уникальная технология, позволяющая получать оптические компоненты (контур, модулятор, ответвители и поляризатор) из одного отрезка волокна без сварных соединений [1, 4, 5, 6]. Для того, чтобы создать оптическую часть ВОГ, необходимо минимальное количество исходных компонентов: пьезокерамическое кольцо и чип СЛД. Особенность технологии – специальное тонкое волокно (диаметр кварцевой оболочки ~ 40 мкм). Длина оптических компонентов (ответвителя и поляризатора) не превышает 15 мм, что позволяет собирать миниатюрные датчики. Например, датчик ВГ941-3AS помещается в корпусе с размерами ~ 25 · 55 мм.

Последовательность операций производства ответвителей и поляризатора схематически изображена на рис. 3, 4, 5.



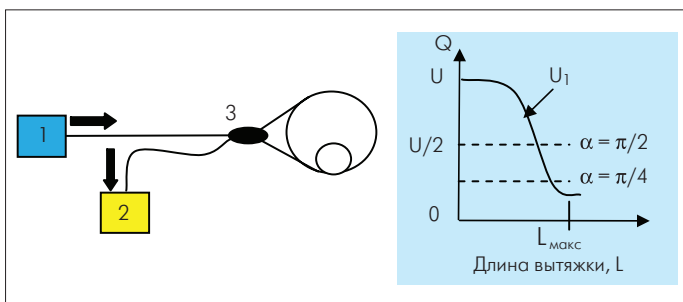


Рис.3. Изготовление первого ответвителя: 1 – СЛД, 2 – ФПМ, 3 – первый ответвитель

Первый ответвитель изготавливается после намотки волокна на катушку и на модулятор (рис. 3). С концов волокна удаляется полимерное покрытие. Очищенные участки волокон фиксируются. Затем начинается их вытяжка в дуге ВЧ-разряда. При этом волокна утончаются и сплавляются так, что мощность излучения начинает перекачиваться из одного волокна в другое. Процесс контролируется по сигналу фотоприемника, установленного на выходе волокна (U_1). Вытяжка прекращается, когда сигнал на фотоприемнике достигает минимума. При этом ответвитель делит мощность пополам (3-дБ ответвитель). Величина минимального сигнала зависит от угла разворота осей двулучепреломления волокон в первом ответвителе (α). При $\alpha = 0$ сигнал в минимуме равен нулю – вся мощность излучения отражается от контура. При $\alpha = \pi/2$ сигнал в минимуме равен $U/2$ – половине напряжения в начале вытяжки. Процесс завершается припайкой ответвителя к кварцевой подложке и заливкой гелем.

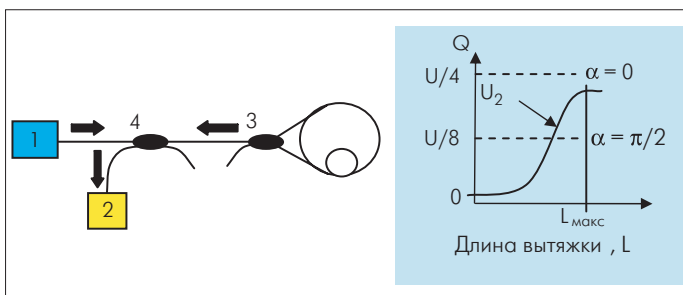


Рис.4. Изготовление второго ответвителя: 1 – СЛД, 2 – ФПМ, 3 – первый ответвитель, 4 – второй ответвитель

Второй ответвитель формируется по той же технологии. В минимальной конфигурации ВОГ он служит для передачи излучения, отраженного от оптического контура, на фотоприемник. Свободный конец волокна укладывают параллельно концу волокна, к которому подключен СЛД, а затем отрезают. Соединенные между собой участки волокон вытягиваются и сплавляются так, чтобы получить 3-дБ ответвитель. Вытяжка волокон прекращается, когда сигнал на фотоприемнике (U_2) достигает максимума (рис.4).

После изготовления ответвителей формируется поляризатор. Это важнейший компонент датчика, так как его качество (потери и коэффициент экстинкции) в значительной степени определяют величину дрейфа нуля. Сначала на участке волокна, расположенного между ответвителями, вытягивается би-

конический переход. Затем перетяжка биконического перехода заравнивается кристаллом натровой селитры так, что оптическая ось кристалла перпендикулярна волокну. Поляризующая способность поляризатора обусловлена двулучепреломлением кристалла. Показатель преломления для обыкновенной волны больше, а показатель преломления необыкновенной волны меньше показателя преломления перетяжки из кварцевого стекла. Такой поляризатор пропускает волну только одной поляризации, а его коэффициент экстинкции находится в диапазоне 40–60 дБ [4].

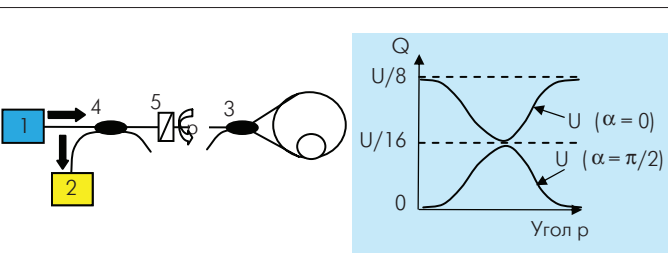


Рис.5. Юстировка поляризатора: 1 – СЛД, 2 – ФПМ, 3 – первый ответвитель, 4 – второй ответвитель, 5 – поляризатор

Важный элемент технологии – возможность юстировки разрешенного направления поляризатора относительно оси двулучепреломления волокна, которое находится между поляризатором и первым ответвителем. Разрешенное направление поляризатора должно быть развернуто под углом $\rho = 45^\circ$ к осям двулучепреломления волокна. При этом сигнал на выходе не зависит от разворота осей двулучепреломления волокон в первом ответвителе (рис. 5). Юстировка поляризатора производится путем поворота конического перехода со стороны контура. После юстировки поляризатор закрепляют на кварцевой подложке и заливают гелем. Ориентация разрешенного направления поляризатора к оси двулучепреломления волокна позволяет уменьшить чувствительность датчика к магнитному полю. Поэтому, когда к чувствительности датчика к магнитному полю предъявляются высокие требования, юстировка должна быть максимально точной.

Завершающий этап производства оптической части датчика – подсоединение волокон к излучателю и фотоприемнику. И здесь важно согласовать волокно с излучателем. Для этого используется специальный технологический прием: кристалл СЛД и волокно припаиваются к двум медным блокам, которые юстируются на максимум сигнала и спаиваются между собой низкотемпературным припоем. Изготовленные по "сплавной" технологии компоненты долговечны и очень устойчивы к механическим и тепловым воздействиям. В конце сборки ВОГ устанавливают оптические компоненты в корпус датчика и заливают защитным силиконовым гелем.

Таким образом, для технологии "Физоптики" характерны минимальное количество операций (намотка и термообработка) и малое количество первичных компонентов (волокно и



чип СЛД). Эти факторы сокращают время изготовления и, соответственно, себестоимость датчика.

ПОГРЕШНОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОГ

Выходной сигнал ВОГ выражается через величину измеряемой угловой скорости \dot{w} с помощью масштабного коэффициента (МК):

$$U_{\text{вых}} = \text{МК} \cdot \dot{w} + U_{\text{д}} + U_{\text{ш}},$$

где $U_{\text{д}}$ – медленно меняющееся напряжение (сдвиг нуля), $U_{\text{ш}}$ – шумы. Величина МК определяется параметрами преобразователя вращения и блока электроники. Значения МК приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения МК и $\dot{w}_{\text{макс}}$ для основных типов датчиков

Параметр	Тип датчика				
	910Ф	941-3AS	951	035	949П
МК, мВ/град/с	10	5	25	20	7
$\dot{w}_{\text{макс}}$, град/с	300	500	80	100	400

Кроме полезного сигнала, выходной сигнал ВОГ содержит также мультипликативную и аддитивную погрешность. Мультипликативная погрешность вызвана искажениями МК, а аддитивная погрешность представляет собой сумму медленно меняющегося напряжения (сдвиг нуля) $U_{\text{д}}$ и "белого" шума $U_{\text{ш}}$ (рис.6). В зависимости от механизмов, приводящих к сдвигу нуля, его подразделяют на электронный, квадратурный и оптический [7, 8, 9].

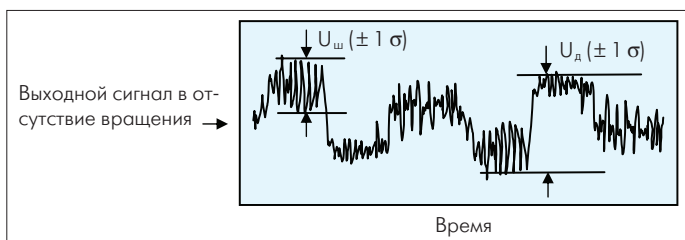


Рис.6. Выходной сигнал ВОГ в отсутствие вращения

Электронный сдвиг нуля вызван смещением операционных усилителей, динамической ошибкой детектирования и взаимовлиянием аналоговых цепей. Для него характерны плавная температурная зависимость и хорошая воспроизводимость.

Квадратурный сдвиг нуля возникает из-за модуляции двулучепреломления в фазовом модуляторе. В результате появляется паразитный квадратурный сигнал (сдвинутый на $\pi/2$ относительно полезного сигнала). Этот сигнал не подавляется полностью синхронным детектором. Он характеризуется квазисинусной зависимостью от температуры с периодом от долей до единиц градуса. Оптический сдвиг нуля появляется в магнитном поле из-за эффекта Фарадея и при тепловых ударах из-за эффекта Шупа и из-за поляризационной анизотропии контура (при малых значениях коэффициента экстинкции поляризатора). Этот паразитный сигнал находится в фазе с полезным сигналом и в отличие от квадратурного

Таблица 2. Требования к величине шумов, дрейфу нуля и стабильности МК в различных системах

Класс датчика	Параметр		
	Шум, град/ час	Дрейф нуля, град/час	Стабильность МК, ppm
Инерциальный класс	< 0,001	< 0,01	< 5
Средний класс	от 0,5 до 0,05	от 0,1 до 10	от 10 до 1000
Измеритель скорости	> 0,5	от 10 до 1000	от 1000 до 10000

сигнала не может быть уменьшен с помощью синхронного детектора.

Шумы зависят от мощности излучения на входе в фотоприемник. Минимальное значение угловой скорости, которое можно обнаружить, ограничивается как шумами датчика, так и дрейфом нуля – в зависимости от времени усреднения сигнала. В системах стабилизации и контроля, где время измерения мало, чувствительность датчика ограничена шумами. В навигационных системах, где величину угла поворота находят путем интегрирования угловой скорости, ограничивающим фактором является дрейф нуля [10].

При малых угловых скоростях точность измерения угла ограничивается аддитивными погрешностями – дрейфом нуля и шумами, а при больших скоростях мультипликативной погрешностью – стабильностью МК. Требования к величине шумов, дрейфу нуля и стабильности МК для навигационных систем различного уровня приведены в табл. 2.

Таким образом, в навигационных системах наряду с шумами и дрейфом нуля ограничителем выступает стабильность МК. В схеме прямого преобразования стабильность МК обычно не выше 0,1 %, поэтому такие датчики относят к среднему классу точности. Температурные и нелинейные искажения МК датчика, построенного по схеме прямого преобразования, можно представить в виде

$$\text{МК}(t^\circ, \dot{w}) = \text{МК}_0 \cdot k_t \cdot k_w,$$

где $k_t = 1 - T_1 \cdot t^\circ + T_2 (t^\circ)^2$ и $k_w = 1 - K_2 (\dot{w} / \dot{w}_{\text{макс}})^2 - K_4 (\dot{w} / \dot{w}_{\text{макс}})^4$ – квазилинейные функции температуры t° и угловой скорости (рис.7), МК_0 – значение МК при нормальных условиях, а K_2, K_4, T_1, T_2 – корректирующие коэффициенты. Нелинейность МК обусловлена выходным сигналом, пропорциональным $\sin \dot{\varphi}$. А нелинейность (до 15–20%) – максимальным сдвигом фаз, возникающим в интерферометре ($\dot{\varphi} @ 1$ радиан при $\dot{w} = \dot{w}_{\text{макс}}$). Как правило, $K_2 @ 0,1$, а $K_4 \ll K_2$. Зависимость

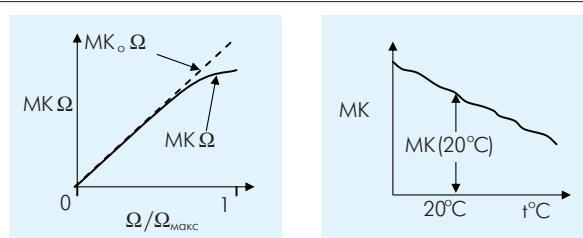


Рис.7. Зависимости МК от угловой скорости и температуры

Таблица 3. Основные параметры базовых моделей ВОГ

Характеристика	Модель				
	ВГ910Ф	ВГ941-3AS	ВГ949П	ВГ951	ВГ035К
Макс. измеряемая скорость, град/с	300	500	400	80	150
Точность преобразования, %	0,1	1	1	0,1	0,1
Чувствительность (1 Гц, 1 с), град/с	0,002	0,003	0,005	0,0003	0,001
Дрейф (после коррекции, 1 с), град/с	0,005	0,01	0,005	0,0003	0,00003
Полоса частот выходного сигнала, Гц	450	1000	1000	450	450
Габариты (диаметр/высота), мм	80/20	25/60	60/20	150/30	120/25
Вес, г	110	40	50	700	300

МК от температуры – квазилинейная функция, которая определяется в основном зависимостью от температуры длины волны излучения СЛД. Это соответствует $T_1 @ 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$, а $T_1 \gg T_2$.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОГ

"Физоптика" производит несколько моделей ВОГ (табл.3). Перечислим их преимущества:

- бесшумная работа;
- мгновенный запуск (0,01– 0,1 с);
- мгновенная реакция на вращение (полоса частот до 1000 Гц);
- низкое энергопотребление (менее 2 Вт);
- низковольтное однополярное питание (+ 5 В);

- высокая надежность (наработка на отказ в нормальных условиях до 50 000 ч);
- срок службы – до 15 лет (количество запусков не ограничено).

Так, ВГ910 оптимально сочетает в себе точность, габариты и стоимость. Применяется в навигационных системах подвижных наземных объектов, для стабилизации ТВ-камер, в системах контроля, в GPS интегрированных системах. ВГ941-3AS – самый миниатюрный (~ 25 · 60 мм) и легкий (40 г) датчик с прочной конструкцией. ВГ035К – точный датчик (0,1 град/ч). Он предназначен для прецизионного тестирования и навигационных систем. ВГ949П – первый прибор в пластиковом исполнении для широкого коммерческого использования.

Все приборы могут эксплуатироваться:

- при температуре окружающей среды -30...70°C ;
- при вибрациях с амплитудой до 6 г с частотой от 20 Гц до 2 кГц;
- после ударов до 90 г.

Области применения ВОГ постоянно расширяются. Конструкции и технологии непрерывно модернизируются. Кроме того, благодаря использованию пластиковых узлов приборы в скором времени станут дешевле, а также сократится время их производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Logozinski V., Semenov A. Proc., Fib. Opt. Las. Sen. 23–26 May, 1994, Boston: Boston, Univ., SPIE vol. 1585. 1994, p.284–285.
2. Logozinski V., Safoutine I., Solomatin V. Proc. 8-th. Int. Conf. Navig. Syst. 28–30 May 2001. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 2001, p.49.
3. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 5-th. Int. Conf. Navig. Syst. 25–27 May, 1998. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1998, p.233–238.
4. Logozinski V., Glavatskih N. Proc. Symp. Gyr. Techn. 21–23 September, 1992. Stuttgart: Stuttgart Univ. 1992, p. 3–11.
5. Listvin V., Logozinski V., Solomatin V. Opt. Gyr. Appl. RTO-AG-339. 1999, p.9–18.
6. Logozinski V., Listvin V., Solomatin V. Proc. 13-th Int. Conf. Opt. Fib. Sen. (OFS-13) 22–25 July 2000, Seoul: Seoul KIST, SPIE v. 3746, 2000, p.113–115.
7. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 1-th. Int. Conf. Navig. Syst. 25–26 July 1994. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1994, p.153.
8. Logozinski V., Safoutine I., Solomatin V. Proc. 9-th. Int. Conf. Navig. Syst. 27–29 May, 2002. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 2002, p.327.
9. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 4-th. Int. Conf. Navig. Syst. 26–28 May, 1997. St.-Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1997, p.19–22.
10. Logozinski V., Solomatin V. Proc. 2-th. Int. Conf. Navig. Syst. 24–25 May, 1995, St.Petersburg: St.-Petersburg St. Res. Cent. "Electropribor", 1995, p.57–59.