

ФИЗОПТИКА

ВОЛОКОННО ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ

ВГ_{ххх} является оптическим интерферометрическим датчиком вращения. Это датчик, в котором разность фаз интерферирующих волн определяется внешним физическим эффектом. Хотя волоконно-оптические датчики вращения часто называют гироскопами, принцип их функционирования не имеет ничего общего с классическим гироскопическим эффектом, обусловленным силой Кориолиса. Принцип работы волоконно-оптического датчика вращения основан на релятивистском эффекте Саньяка. Его корректная модель может быть построена только в рамках Общей Теории Относительности. На сегодняшний день оптические датчики вращения – это единственные исключительно релятивистские измерительные устройства. Если сравнивать движение фотонов в волноводе с движением электронов по проводам, то первые отличаются нечувствительностью к электромагнитным полям, что обуславливает значительно лучшую помехоустойчивость оптических измерительных устройств. Более того, используемое в датчике оптическое волокно, сохраняющее поляризацию излучения, устраняет эффекты вращения поля и обеспечивает исключительную стабильность и точность измерения угловой скорости.

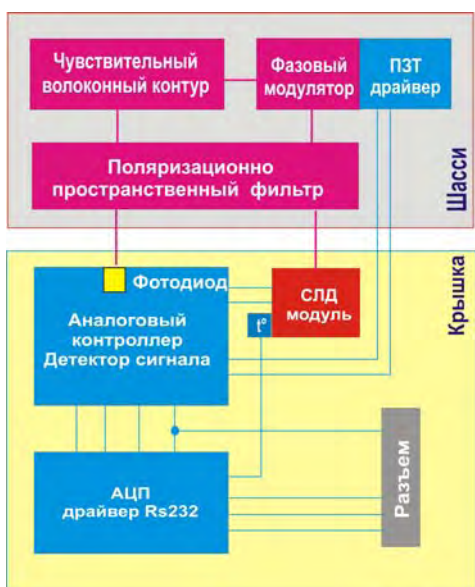
ВГ – семейство датчиков вращения прямого преобразования («open-loop» fiber optic gyro), выполненных по волоконно-оптической технологии. Каждый датчик содержит волоконно-оптический преобразователь «минимальной конфигурации» и электронный блок, обрабатывающий аналоговые сигналы и управляющий активными компонентами преобразователя.

ВГ – это надежный и прочный прибор, не требующий обслуживания в течение всего срока эксплуатации и хранения. Он обладает основным достоинством оптических измерительных технологий – высокой точностью, сопровождаемой высокой устойчивостью к электромагнитным помехам, механическим и температурным возмущениям.

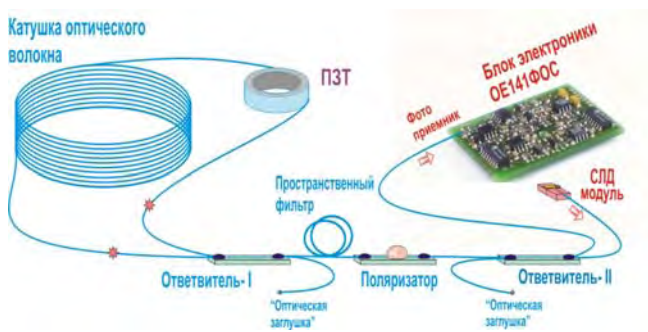
Напряжение питания датчика +5В при потреблении примерно 1Вт. Время включения не более 0.1 с. Производится по специализированной патентованной технологии, в которой все компоненты преобразователя изготавливаются на цельном отрезке оптического волокна. Блок электроники выполнен в технологии поверхностного монтажа. Датчики выпускаются в аналоговой и цифровой (Д) версии. Д-версия это аналоговый датчик, дополненный АЦП и драйвером порта RS232.

Основные конструктивные решения и технологические приемы, используемые при изготовлении ВГ_{ххх}, защищены патентами РФ.

УСТРОЙСТВО ВГ И ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ



Блок схема ВГ_{хх}



«Минимальная конфигурация»
волоконно-оптического датчика вращения.

ВГ содержит следующие основные узлы:

- **Волоконно-оптический преобразователь вращения «минимальной конфигурации»** - кольцевой интерферометр, содержащий волоконный контур (катушка), сварные волоконно-оптические ответвители, волоконно-кристаллический поляризатор, пьезокерамический модулятор (ПЗТ) и п/п излучательный СЛД модуль. Бобина катушки изготавливается из пластика, алюминиевого сплава или кварцевого стекла. Пропускание преобразователя (от излучателя до фотоприемника) зависит от скорости вращения.
- **Аналоговый контроллер-детектор сигнала – электронный блок OE141ФОС** (OE141-5 в зависимости от модели) – плата с интегрированным фотоприемным усилителем (ФПУ). Она управляет модулятором, светодиодом, принимает, обрабатывает оптический сигнал интерферометра и формирует выходное напряжение датчика.

- Плата АЦП с драйвером последовательного порта (для цифровых моделей) преобразует выходное напряжение датчика в 24-разрядный код и передает вместе с данными температуры через последовательный порт RS232 .



Принцип действия датчика основан на зависимости времени распространения света по замкнутому вращающемуся контуру от скорости и направления вращения. В кольцевом интерферометре излучение делится на два луча, которые распространяются в контуре в противоположных направлениях. Вращение со скоростью Ω создает разность фаз (F_S) между ними

$$F_S = K \Omega$$

где $K = \pi DL/\lambda c$ – ОМК (оптический масштабный коэффициент) контура , а D и L - диаметр намотки и длина волокна.

Оптические масштабные коэффициенты контуров ВГ

Модель	ОМК (мрад/ град/с)	Модель	ОМК(мрад / град/с)
910	3.2	991	4.6
949	2.3	941-3AS	1.1
035	8.7	941-3AM	1.4
951	8.7	071	1.3
091	0.95	095	1.4

Сигнал вращения получают из сигнала интерференции встречных волн, пропущенных через [пространственно-поляризационный фильтр](#). Фильтр применяется для подавления «ложных» оптических волн. Переменное напряжение модулирует диаметр пьезокерамического кольца ПЗТ и длина волокна на его поверхности модулируется. Это создает дополнительный гармонический сдвиг фаз. Если контур не вращается, то сигнал интерференции состоит только из четных гармонических составляющих разной амплитуды. При вращении появляются первая и другие нечетные гармоники. Амплитуда первой гармоники пропорциональна скорости вращения и является (после демодуляции) выходным сигналом ВГ.

- Выходное напряжение ФПУ: $U(t,F,m) \approx J_1(m)\sin(F_S)\sin(\omega_m t) + J_2(m)\cos(F_S)\cos(2\omega_m t) + (1+J_0(m)\cos(F_S)) + QB\cos(\omega_m t)$, где ω_m – круговая частота модуляции $\omega_m=2\pi f_0$.
- Амплитуда первой гармоники частоты модуляции $J_1(m)\sin(F_S)$. При малых F_S эта функция линейна, поэтому датчик используется в диапазоне $|F_S| < 1$. Последнее неравенство определяет рабочий диапазон. Множитель - $J_1(m)$ – функция Бесселя первого порядка – показывает зависимость от амплитуды модуляции.
- Последняя компонента сигнала ФПУ $QB\cos(\omega_m t)$ – сигнал на частоте модуляции, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ относительно сигнала вращения. Он возникает при амплитудной модуляции волн на фазовом модуляторе из-за дефектов волокна и называется «квадратурным». Из-за фиксированной задержки «квадратурный» сигнал может подавляться при синхронном детектировании.

ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ

Некоторые характеристики ВОГ прямого преобразования («open-loop») следуют непосредственно из физических принципов функционирования и не связаны с особенностями конструкции. Такие характеристики являются общими для всех датчиков «минимальной конфигурации» без обратной связи и отличают их от датчиков вращения, основанных на других физических принципах (например, механических).

- **Симметрия выходной характеристики, отсутствие зоны нечувствительности и гистерезиса.**

Сигнал интерференции пропорционален фазе Саньяка, которая, в свою очередь, пропорциональна угловой скорости. При малых скоростях вращения преобразование является линейным, что и обеспечивает отсутствие упомянутых нелинейных эффектов.

- **«Мгновенный» отклик на вращение**

В кольцевом интерферометре выходные волны задержаны по отношению к входным волнам на время распространения света в контуре (0.8 μ s). Таким образом, интерферометр реагирует на вращение за время порядка микросекунды, что для механических систем можно определить как «мгновенную» реакцию. Практически время реакции (полоса рабочих частот) определяется выходным фильтром низких частот и жесткостью корпуса датчика.

- **Нечувствительность к постоянному ускорению**

В соответствии с общим принципом симметрии при стационарных условиях к сдвигу фаз встречных волн могут приводить только вращение или внешнее магнитное поле. Физического механизма, через который ускорение влияет на сдвиг фаз, не существует.

Выходное напряжение датчика – это разность потенциалов между контактами **OUT** и **AGND**. Конструктивно выходной контакт **OUT** через сопротивление 1 кОм подсоединен к выходу операционного усилителя, контакт «сигнальная земля» (**AGND**) – к его «земле». Датчик функционирует через 0.1 с после подачи питания. Температурный режим устанавливается примерно за 1 мин «самопрогрева». При этом изменение выходного напряжения менее 20 мкВ, масштабного коэффициента – 0.2%. При быстром вращении (вне рабочего диапазона) датчик не функционирует, его показания можно считать случайными. Нормальная работа восстанавливается в течение 0.1с после возврата в рабочий диапазон.

Выходное напряжение является воспроизводимой функцией (нелинейной) угловой скорости (Ω) и *установившейся* температуры датчика (t°). Ее примерный вид:

$$U = SF \cdot \Omega + U_0 \quad SF(t^\circ, \Omega) = SF_0 \cdot k_t \cdot k_\Omega \quad U_0 = U_0(t^\circ)$$

$$k_\Omega = 1 + K_2 \cdot (\Omega / \Omega_{max})^2 + K_4 \cdot (\Omega / \Omega_{max})^4 \quad k_t = 1 + T_1 \cdot t^\circ + T_2 \cdot (t^\circ)^2$$

где k_Ω - нелинейность масштабного коэффициента характерная для интерферометрических преобразователей, она максимальна на границе рабочего диапазона ($K_2 \approx -0.1...-0.2$). k_t - температурная составляющая масштабного коэффициента, определяемая, в основном, изменением спектральных характеристик СЛД. Это почти линейная воспроизводимая функция ($T_1 \approx -0.0005 / ^\circ C$, $T_1 \gg T_2, T_3, \dots$).

Сдвиг нуля U_0 имеет несколько составляющих:

- «Электронный сдвиг» - смещение операционных усилителей, динамические ошибки детектирования, взаимовлияния аналоговых цепей. Отличается плавной зависимостью от температуры и слабой чувствительностью к напряжению питания (≈ 0.5 мкВ/В).

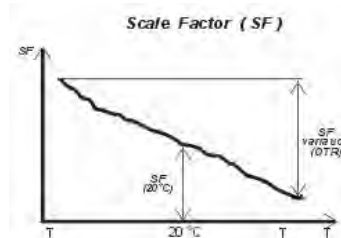
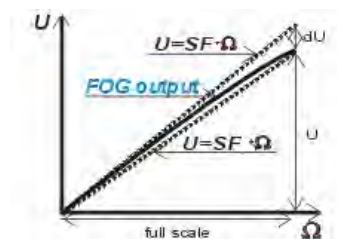
- «Квадратурный сдвиг» - вследствие неполного подавления квадратурного сигнала. Отличается мелким температурным масштабом (квазисинус с периодом от долей до единиц градусов).

- «Оптический сдвиг» - ложный сигнал интерферометра, возникающий из-за несовершенства поляризационно- пространственного фильтра и невзаимных эффектов (Фарадея, Шупе)

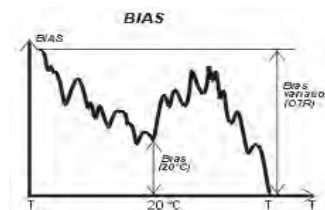
Шум датчика является следствием квантовых шумов светового потока и тепловых шумов ФПУ. Он вызывает разброс показаний, зависящий от времени усреднения как у«белого» шума. При такте 1с СКО показаний составляет ~ 5 мкВ. Переменное ускорение (вибрация, удар) за счет динамической деформации бобины может привести к шумовому переменному сигналу на частоте вибрации с амплитудой до 1 мкВ на 1 м/с³. Постоянное ускорение влияния на выходной сигнал не оказывает.

Датчик имеет равномерную частотную характеристику, формируемую выходным ФНЧ Бесселя третьего порядка. В таблице приведены его основные параметры при частоте отсечки 450Гц (1 кГц для ОЕ141-5) . Характерное время отклика датчика, определяемое фильтром, составляет 0.35 мс.

Частота (кГц)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
Пропускание	0.99	0.99	0.95	0.9	0.8
Задержка (град)	10	20	40	60	80



зависимость масштабного коэффициента от температуры.



зависимость сдвига от температуры

ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И КОМПОНЕНТЫ

Преобразователь вращения ВГ включает:

Волоконно-оптический контур, который изготовлен из специального особо тонкого анизотропного оптического волокна. Длина волокна около 100 м, диаметр катушки от 20-100 мм. Квадрупольная намотка волокна производится с контролируемым натяжением во избежание деградации оптических характеристик.

Фазовый модулятор (ПЗТ) представляет собой отрезок волокна, намотанный на боковую поверхность пьезоэлектрического цилиндра. Рабочая частота (резонансная) ≈ 75 кГц.

Волоконный биконический ответвитель используется для смешивания/деления световых потоков, распространяющихся в волокнах. Ответвители изготавливаются по сварной технологии, фиксируются на кварцевых подложках и заливаются защитным силиконовым гелем.

Волоконно-кристаллический поляризатор выполнен в виде биконического перехода (утончения) на участке волокна, зарощенного двулучепреломляющим монокристаллом. Ось двулучепреломления волокна и ось пропускания поляризатора развернуты примерно на 45 град для уменьшения магнитной чувствительности.

Излучательный модуль - это кристалл п/п светодиода (СЛД), оптически согласованный с волокном. СЛД обладает высокой яркостью в диапазоне 0.85 мкм при низкой когерентности. Это приводит к подавлению избыточного шума в интерферометре.

«**Оптическая заглушка**» - специально обработанный торец волокна для подавления обратного отражения.

Блок электронный ОЕ141ФОС содержит следующие функциональные узлы:

- фотоприемный модуль (ФПУ);
- контроллер СЛД;
- управляемый генератор сигнала ПЗТ;
- пиковый детектор;
- контроллер амплитуды;
- синхронный детектор;
- ГУН опорных импульсов;
- импульсный инвертор напряжения;
- выходной ФНЧ

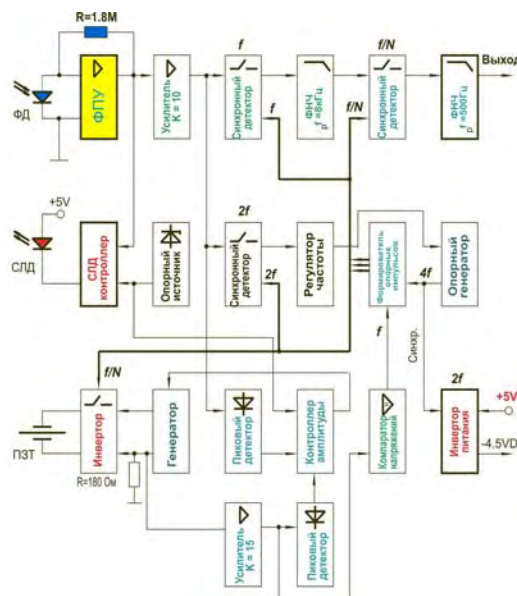
ПЗТ модулятор является электромеханическим осциллятором. Он работает на частоте главного (радиального) резонанса. Колебательные моды высокого порядка подавляются фильтром. Контроллер колебаний стабилизирует переменную составляющую сигнала ФПУ (измеряется пиковым детектором) на заданном уровне, управляя петлевым усилением. Контроллер СЛД стабилизирует постоянную составляющую сигнала и задает температурно-зависимое ограничение тока СЛД. Для подавления квадратурного сигнала фаза управляющих импульсов регулируется. Для этого управляемый опорный генератор синхронного детектора работает на

четырежды частоте основного резонанса ПЗТ, а управляющие импульсы формируются делителем, обеспечивающим необходимую скважность. Для уменьшения электронной компоненты сдвига сигнал ПЗТ периодически инвертируется.

Внутренние частоты (калибровки, инвертора питания) синхронизованы с частотой ПЗТ для подавления интерференционных биений. Электронный блок ОЕ141ФОС реализован на четырехслойной печатной плате, собираемой в технологии поверхностного монтажа. Используемые активные и пассивные компоненты соответствуют промышленному стандарту.

ЦИФРОВОЙ ВЫХОД

В цифровой версии датчика ВГxxxD дополнительно устанавливается плата АЦП для преобразования сигналов аналогового датчика. Питание платы АЦП (+5В, 35 мА) адаптировано к питанию аналогового датчика. Выходные данные (скорость вращения Rate и другие Xdata) передаются через последовательный интерфейс RS232. Плата



Блок-схема и внешний вид ОЕ141ФОС



Плата АЦП

АЦП готова к работе через 1 с после подачи питания. Датчик (Д-версия) может быть подключен непосредственно к персональному компьютеру (в т.ч. портативному). Его питание (+5В, 300 мА max) и передача данных может осуществляться через USB порт (при наличии адаптера RS232 ↔ USB).

Электрический интерфейс

Назначение	Название контакта	Краткие сведения
Питание	Питание 5В (+5V) Общ. питания (GND)	Стабилизированное напряжение в диапазоне 4.90 В... 5.25 В (0.3А max). Пульсации (0...1 МГц) < 10 мВ
Цифровой выход	Цифровой выход (Tx RS232) Общ. цифровой (DGND)	Асинхронный порт, 8 бит данных, 1 стоп бит, без контроля четности. В некоторых моделях контакт "Общ.цифровой" совмещен с «Общ.питания»

Скорость порта по умолчанию - 38 кБод (частота обновления 300.0Гц ± 100ppm). Эффективная полоса сигнала 100 Гц.

Изготовителем могут быть установлены «быстрый» или «медленный» режимы.

В «быстром» режиме: скорость порта – 115 кБод, частота обновления - 1200 Гц ± 100 ppm, эффективная полоса – 300 Гц.

В «медленном» режиме: скорость порта 9.6 кБод, частота обновления – 75.00 Гц ± 100 ppm, эффективная полоса - 30 Гц.

Содержание цифровых данных

RATE Данные скорости вращения	Выходное напряжение аналогового датчика = $2.5 \cdot \text{RATE} / 2^{23}$ В, где RATE – 24-разрядное число в двоичном дополнительном коде
Xdata Дополнительные данные	температура (напряжение на выходе TMP36), ток потребления, сервисные сигналы. Набор 16-разрядных данных передается последовательно в серии из 16 посылок в соответствие с состоянием счетчика COUNTER

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

ВГххх изготавливается по специализированной конвейерной (in-line) технологии. В основе технологии - тонкое волокно с особым набором оптических и механических параметров. Волокно сохраняет световодные свойства даже при значительных упругих и пластических деформациях, что позволяет формировать различные оптические компоненты непосредственно на волокне путем изменения формы при высокой температуре. Последовательное изготовление компонентов интерферометра (после намотки основного контура) вдоль одного отрезка волокна делает их естественно соединенными между собой и исключает операции стыкового соединения. Специализированное технологическое оборудование использует процесс «сплавления» волокон при изготовлении первого и второго ответвителей интерферометра, аналогичный процесс утончения участка волокна является стадией изготовления поляризатора. Излучательный модуль – это соединение п/п кристалла светодиода с торцом волокна, выполненное в виде паяного соединения двух медных блоков, на одном из которых установлен кристалл, на другом - закреплено волокно. Пайка осуществляется низкотемпературным припоем после юстировки взаимного расположения блоков. Произведенные в «сплавной» технологии компоненты отличаются долговечностью и высокой устойчивостью к механическим и тепловым воздействиям. Их установка в корпус датчика и покрытие защитным силиконовым гелем завершает изготовление преобразователя. Полностью датчик собирается после установки и настройки электронного блока. Особенностью технологии являются минимальное количество операций (намотка, термообработка) и малое количество первичных компонентов (волокно, СЛД). Эти факторы сокращают время изготовления датчика и позволяют поддерживать современные стандарты качества ИСО9000-9003.

ПРИЕМО-СДАТОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Точностные и эксплуатационные характеристики датчика определяются его конструкцией и используемыми комплектующими и материалами. Покупные материалы и компоненты проходят входной контроль на соответствие основным параметрам. При изготовлении компонентов их характеристики автоматически регистрируются и контролируются на соответствие функциональным критериям. Сборочно-установочные операции контролируются визуально. Соответствие полностью изготовленного датчика спецификации подтверждается проверкой функционирования в нормальных условиях и измерением паспортных параметров (ток потребления и масштабный коэффициент). Стабильность датчика дополнительно проверяется 24-часовой наработкой. В некоторых случаях проводится проверка функционирования в рабочем диапазоне температур.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО О ДАТЧИКАХ ВРАЩЕНИЯ ФИЗОПТИКА

1. V. LOGOZINSKI, N. GLAVATSKIH. "Fiber Optic Gyro In-Line Technology". Symposium on Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 1992.
2. V. LISTVIN, V. LOGOZINSKI, V. SOLOMATIN. "Miniature Fiber Optic Gyros. Fizoptika Implementation". Optical Gyros and Their Application, RTO-AJ-339, AC/323(SCE)TP/9, NATO, 1999.
3. V. LOGOZINSKI, I. SAFOUTINE, V. SOLOMATIN. "Fiber Optic Gyro with Digitally Corrected Output", The 8th St.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Russia, St.-Petersburg, 2001.
4. V. LOGOZINSKI, V. SOLOMATIN. "Development of Fiber Optic Rate Sensor for Large Scale Application", The 1st St.-Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology. Russia, St.-Petersburg, 1994.
5. V. LOGOZINSKI, I. SAFOUTINE, V. SOLOMATIN. "A Miniature FOG with Built-in Diagnostics and Instant Start-up". The 9th St.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Russia, St.-Petersburg, 2002.
6. V. LOGOZINSKI, V. SOLOMATIN. "Fiber Optic Gyro Performance Improvement by Optical Compensation Method". The 5th St.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Russia, St.-Petersburg, 1998.
7. V. LOGOZINSKI, V. SOLOMATIN. "Built-in Drift Compensation of Open Loop FOG". The 4th St.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Russia, St.-Petersburg, 1997.
8. V. LOGOZINSKI, V. LISTVIN, V. SOLOMATIN. "Taper Twisting for Higher FOGs Production Yield". The 13th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-13). Seoul, 2000.
9. V. LOGOZINSKI, A. SEMENOV. "Small Size Simple Configuration Fiber Optic Gyro", "FIBER'91", SPIE, Vol. 1585. Boston, 1991.