

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ ВГ_{xxx}

Волоконно-оптический датчик вращения серии ВГ_{xxx} (далее ВГ или датчик) является оптическим датчиком, в котором разность фаз интерферирующих волн определяется внешним физическим эффектом. Принцип работы волоконно-оптического датчика вращения основан на релятивистском эффекте Саньяка.

ВГ — датчик вращения прямого преобразования («open-loop» fiber optic gyro), выполненный по специализированной патентованной технологии, когда все оптические компоненты изготавливаются вдоль одного отрезка волокна без точек стыковки/сварки. Каждый датчик содержит волоконно-оптический преобразователь «минимальной конфигурации» и электронный блок, выполненный в технологии поверхностного монтажа, который обрабатывает аналоговые сигналы и управляет активными компонентами преобразователя.

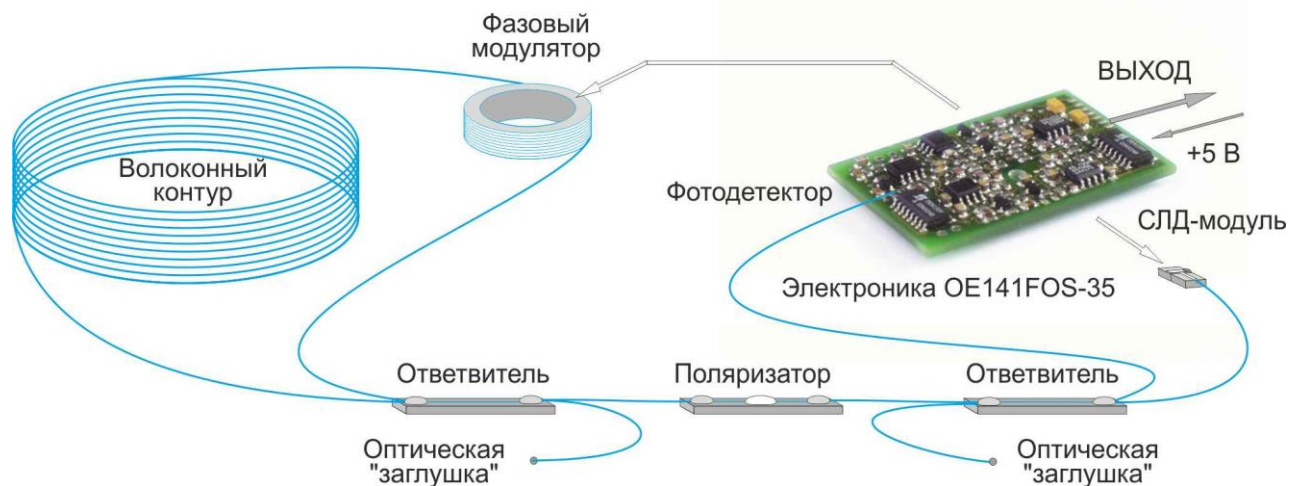
ВГ — это надежный и прочный прибор, не требующий обслуживания в течение всего срока эксплуатации и хранения. Он обладает основным достоинством оптических измерительных технологий — высокой точностью, сопровождаемой высокой устойчивостью к электромагнитным помехам, механическим и температурным возмущениям.

Корпус ВГ изготавливается из твердого пластика или алюминиевого сплава для обеспечения работоспособности в широком температурном диапазоне и в условиях жестких механических воздействий. Использование пластиковых корпусных деталей позволяет существенно снизить вес и размер датчиков.

Датчики выпускаются в аналоговой и цифровой (Д) версиях. Д-версия это аналоговый датчик, дополненный АЦП и драйвером порта RS232.

Основные конструктивные решения и технологические приемы, используемые при изготовлении ВГ, защищены патентами РФ.

УСТРОЙСТВО ВГ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ



ВГ содержит следующие основные компоненты, представленные на рисунке:

- Волоконно-оптический преобразователь вращения «минимальной конфигурации» (кольцевой интерферометр), пропускание которого (от излучателя до фотодетектора) зависит от скорости его вращения, содержащий:
 - волоконный контур (катушку);
 - сварные волоконно-оптические ответвители;
 - волоконно-кристаллический поляризатор;
 - пьезокерамический фазовый модулятор (ПЗТ);
 - полупроводниковый супер-люминесцентный модуль (СЛД-модуль);
 - оптические «заглушки»;
- Аналоговый контроллер-детектор сигнала - электронный блок OE141FOS-35 (OE141-55 в зависимости от модели) - плата с интегрированным фото-приемным усилителем (ФПУ). Она управляет модулятором и СЛД, принимает и обрабатывает оптический сигнал интерферометра и формирует выходное напряжение датчика.
- Дополнительно (для цифровых моделей) может устанавливаться плата АЦП с драйвером последовательного порта, которая преобразует выходное напряжение датчика в 24-разрядный код и передает его вместе с данными температуры, тока потребления и т.п. через последовательный порт RS232.

Принцип действия датчика основан на зависимости времени распространения излучения по замкнутому вращающемуся контуру от скорости и направления вращения.

Излучение широкополосного источника (СЛД), оптически согласованного с волокном, проходит через ответвитель “ввода/вывода” (# 1) и пространственно-поляризационный фильтр (ППФ), состоящий из поляризатора и одномодового участка волокна. Затем излучение делится ответвителем “волоконного контура” (# 2) на два луча, которые проходят фазовый модулятор и волоконный контур в противоположных направлениях.

Вращение со скоростью Ω создает между встречными волнами разность фаз $F_S = K \cdot \Omega$, где $K = 2\pi \cdot D \cdot L / (\lambda \cdot c)$ — ОМК (оптический масштабный коэффициент) контура, λ — длина волны излучения, c — скорость света, а D и L — диаметр намотки и длина волоконного контура, соответственно. После обхода контура встречные волны рекомбинируют на 2-м ответвителе и через ППФ и 1-й ответвитель поступают на фотодетектор. ППФ обеспечивает идентичность оптических путей встречных волн в отсутствие вращения, что позволяет уменьшить погрешности измерения за счет подавления «ложных» волн, искажающих сигнал интерференции. Сигнал вращения формируется путем обработки сигнала интерференции встречных волн.

Фазовый модулятор осуществляет периодическое изменение длины небольшого участка волоконного контура на частоте f_m . Размещение этого модулятора вблизи 2-го ответвителя (несимметрично относительно центра контура) позволяет обеспечить гармоническую модуляцию разности фаз встречных волн с частотой f_m .

Нормированное (в т.ч. на мощность излучения в волокне) выходное напряжение фотодетектора можно записать в виде разложения по функциям Бесселя:

$$U(t, F_S, m) = \frac{1}{2} [1 + \cos(F_S + m \cdot \sin(\omega_m \cdot t))] = \frac{1}{2} [1 + J_0(m) \cdot \cos(F_S)] - J_1(m) \cdot \sin(F_S) \cdot \sin(\omega_m \cdot t) + J_2(m) \cdot \cos(F_S) \cdot \cos(2\omega_m \cdot t) - \dots,$$

где ω_m — круговая частота фазовой модуляции, $\omega_m = 2\pi \cdot f_m$, m — амплитуда (индекс) фазовой модуляции.

Если контур не вращается ($F_S = 0$), то сигнал интерференции состоит только из четных гармоник. При вращении появляются первая и другие нечетные гармоники.

Амплитуда первой гармоники частоты модуляции $J_1(m) \cdot \sin(F_S)$ при малых F_S представляет собой линейную функцию, поэтому датчик используется в диапазоне $|F_S| < 1$. Последнее неравенство определяет рабочий диапазон угловых скоростей, в котором амплитуда первой гармоники пропорциональна скорости вращения и является (после демодуляции) выходным сигналом ВГ. Множитель - $J_1(m)$ — показывает зависимость выходного сигнала от амплитуды модуляции. При больших скоростях вращения, существенно выходящих за пределы диапазона измерений, выходной сигнал престаёт быть однозначной функцией входной угловой скорости.

ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ

Нижеприведенные 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 гироскопов).

- Симметрия выходной характеристики, отсутствие зоны нечувствительности и гистерезиса

Сигнал интерференции пропорционален фазе Саньяка (F_S), 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 запаздывают по отношению к входным волнам на время распространения света в контуре ($\sim 0.8 \mu s$). 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.

В рамках “упрощенной” модели выходное напряжение (U) датчика — это воспроизводимая нелинейная функция угловой скорости (Ω) и установившейся температуры датчика (t°), которая имеет вид:

$$U = MK \cdot \Omega + U_0 + N, \quad MK(t^\circ, \Omega) = SF_0 \cdot k(t^\circ) \cdot k(\Omega), \quad U_0 = U_0(t^\circ),$$

где $k(t^\circ)$ — близкая к линейной воспроизводимая функция температуры с наклоном **3 – 5 % на 100 ° С**, определяемая, в основном, изменением спектральных характеристик СЛД (длины волны излучения);

$k(\Omega)$ — воспроизводимая функция, характеризующая уменьшение величины МК по мере приближения к границе диапазона измерений.

Сдвиг нуля U_0 имеет несколько составляющих:

- “электронный” сдвиг – смещение операционных усилителей, динамические ошибки детектирования, взаимовлияние аналоговых цепей. Отличается плавной зависимостью от температуры и слабой чувствительностью к напряжению питания;

- “оптический” сдвиг - ложный сигнал интерферометра, возникающий из-за несовершенства поляризационно-пространственного фильтра и невзаимных эффектов, вызванных температурными градиентами;

- “магнитный” сдвиг – смещение, возникающее в результате магнитооптических явлений.

Шумовая составляющая N возникает вследствие квантовых шумов светового потока и тепловых шумов ФПУ. Переменное ускорение (вибрация, удар) за счет динамической деформации каркаса датчика может приводить к дополнительному переменному сигналу на частоте вибрации.

ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И КОМПОНЕНТЫ

Волоконный контур (катушка) - изготовлен из специального особо тонкого оптического волокна (диаметр кварцевой части ~ 40 мкм), сохраняющего поляризацию излучения. Длина волокна - 100 – 200 м (в зависимости от типа датчика). Каркас катушки изготавливается из пластика, алюминиевого сплава или кварцевого стекла. Для уменьшения влияния температурных градиентов используется квадрупольная намотка волокна, которая производится с контролируемым натяжением во избежание деградации оптических характеристик.

Фазовый модулятор (ПЗТ) представляет собой отрезок волокна, намотанный на боковую поверхность пьезокерамического цилиндра, который зафиксирован мягким силиконовым компаундом на держателе (подвесе). Рабочая частота (резонансная) модулятора ~ 75 кГц. Подвес служит для уменьшения механической связи пьезокерамического цилиндра с корпусом датчика.

Волоконный биконический ответвитель используется для смешивания/деления световых потоков, распространяющихся в волокне. Ответвитель изготавливается путем сплавления и вытяжки двух соприкасающихся волокон до достижения требуемого коэффициента связи между ними (~ 3 дБ). Ответвитель фиксируется на кварцевой подложке и покрывается силиконовым компаундом для обеспечения стабильности его параметров в условиях механических и температурных воздействий.

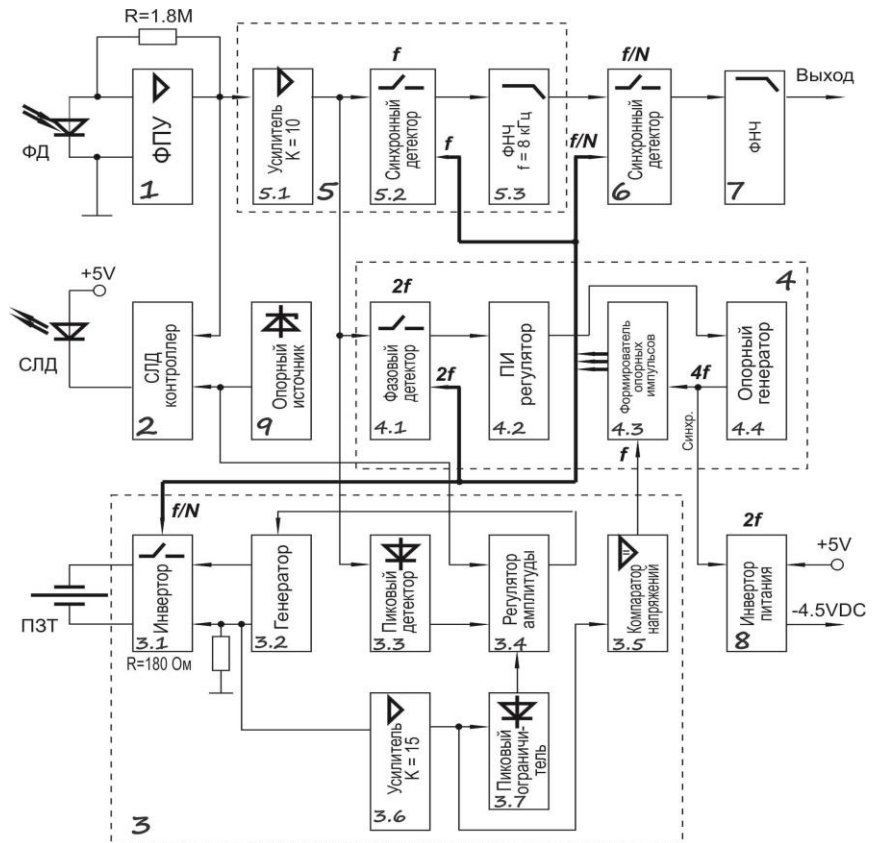
Волоконно-кристаллический поляризатор выполнен в виде биконического перехода (утончение до 5 мкм) волокна, вокруг которого выращен из расплава (на слюдяной подложке) двулучепреломляющий монокристалл нитрата натрия. Ось двулучепреломления волокна и ось пропускания поляризатора развернуты примерно на 45 градусов для уменьшения магнитной чувствительности датчика. Поляризатор фиксируется на кварцевой подложке и покрывается силиконовым компаундом для обеспечения стабильности его параметров в условиях механических и температурных воздействий.

Излучательный модуль - кристалл полупроводникового суперлюминесцентного диода (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 OE141FOS-35 содержит следующие функциональные узлы (см. рисунок):

- 1 - широкополосный малозумящий фотоприемный усилитель (ФПУ);
- 2 - контроллер СЛД;
- 3 - генератор ПЗТ с управляемой амплитудой;
- 4 - синтезатор опорных сигналов;
- 5 - синхронный детектор;
- 6 - синхронный детектор калибратора;
- 7 - выходной фильтр;
- 8 - преобразователь питания;
- 9 - источник опорного напряжения.



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 четырехкратной 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 OE141FOS-35 реализован на четырехслойной печатной плате, собираемой в технологии поверхностного монтажа. Используемые активные и пассивные компоненты соответствуют промышленному стандарту.

ЦИФРОВОЙ ВЫХОД

В цифровой версии датчика плата АЦП с драйвером последовательного порта преобразует выходной аналоговый сигнал в 24-разрядный код и передает его через последовательный порт RS232 вместе с данными тока потребления, температуры и т.п. Питание платы АЦП (+5В, 35 мА) адаптировано к питанию аналогового датчика. Плата 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).

ПАРАМЕТРЫ ЦИФРОВОГО ВЫХОДА

1. Асинхронный порт RS232, 8 бит данных, 1 стоп бит, без контроля четности.
2. Выходное напряжение датчика = $2.5 \text{ RATE} / 2^{23} \text{ В}$, RATE - 24-разрядное число в двоичном дополнительном коде.
3. Дополнительные данные: температура (выход AD TMP36), напряжение питания, ток потребления, сигнал диагностики (Vd). Эти данные (16 бит каждое) передаются последовательно в 16 посылках в соответствии с состоянием счетчика COUNTER, значение которого увеличивается на 1 в каждой следующей посылке.
4. Структура и содержание блока данных (одна посылка 8 байтов):

№ байта	0	1	2	3	4	5	6	7
Данные	Начало данных (0xDD)	младший	старший	средний	Состояние счетчика	Дополнительные данные	Младшие 2 байта суммы байтов 1...5 в блоке данных	
	Выходное напряжение датчика							

5. Содержание дополнительных данных:

counter	00	01	02	03	04	05	06	07	08...0F
Параметр дополнит. данных	старший	младший	старший	младший	старший	младший	старший	младший	Передаются, но не используются
	Температура $T \cdot (250/2^{15}) - 50 \text{ [}^\circ\text{C]}$		Напряжение питания $U \cdot (10/2^{15}) \text{ [V]}$		Ток потребления $I \cdot (0.25/2^{15}) \text{ [A]}$		Сигнал диагностики $Vd \cdot (2.5/2^{15}) \text{ [V]}$		

6. Скорость порта (по умолчанию) - **115 кБод** (частота обновления ~ 1.2 кГц); опция: скорость порта - **38 кБод** (частота обновления ~ 0.3 кГц).
7. Если сигнал диагностики (Vd) находится в диапазоне $0.9 \text{ В} < Vd < 1.1 \text{ В}$, то датчик исправен, если нет, то датчик отказал.

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

ВГ изготавливается по специализированной конвейерной (in-line) технологии. В основе технологии - тонкое волокно с особым набором оптических и механических параметров. Волокно сохраняет свои свойства даже при значительных упругих и пластических деформациях, что позволяет формировать различные оптические компоненты непосредственно на волокне путем изменения его формы при высокой температуре. Последовательное изготовление компонентов интерферометра (после намотки основного контура) вдоль одного отрезка волокна делает их естественно соединенными между собой и исключает необходимость стыковых соединений. Специализированное технологическое оборудование позволяет использовать процесс теплового размягчения в дуговом разряде, сплавления и вытяжки двух соприкасающихся 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 защита силиконовым гелем завершает изготовление преобразователя вращения «минимальной конфигурации». 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.

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 (тока потребления и масштабного коэффициента). В ряде случаев проводится проверка функционирования в рабочем диапазоне температур.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО О ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ ВРАЩЕНИЯ ЗАО “ФИЗОПТИКА”

1. V. LOGOZINSKI, N. GLAVATSKIИ. “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.