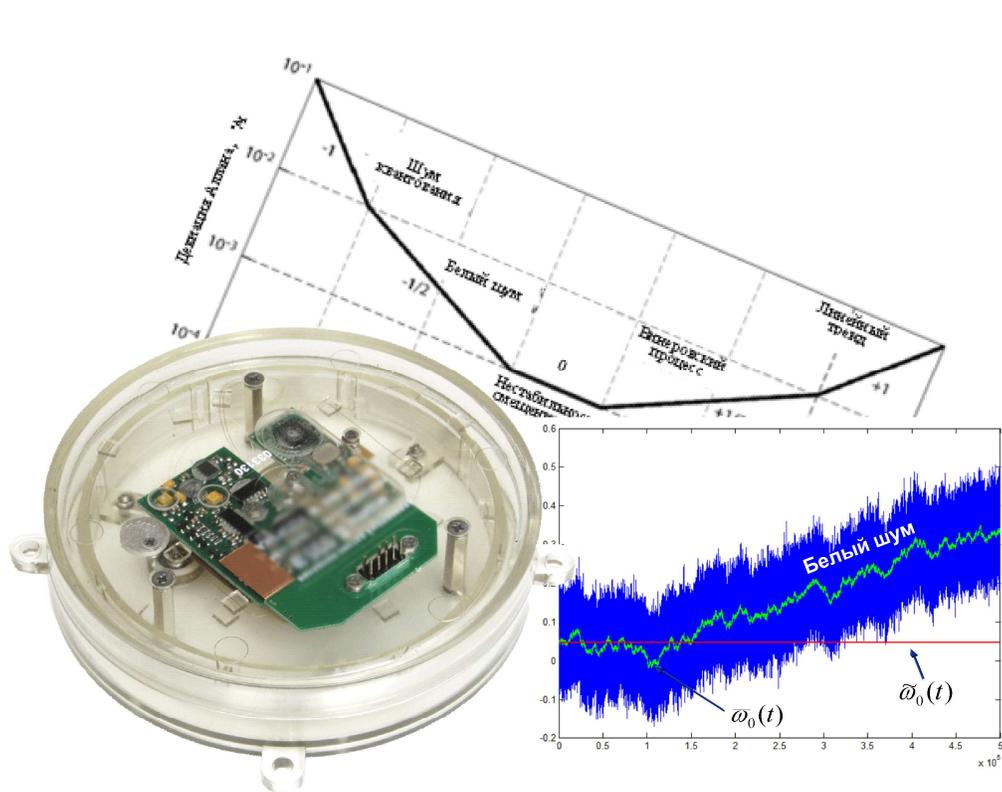


Е.В. Драницына, А.В. Моторин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ "ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ"



Санкт-Петербург
2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.В. Драницына, А.В. Моторин
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО
ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
"ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ"

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 24.03.02 Системы управления движением и
навигация

в качестве Учебно-методическое пособие для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2021

Драницына Е.В., Моторин А.В., Методические указания по выполнению лабораторных работ "Исследование выходных сигналов волоконно-оптических гироскопов" – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 53 с.

Рецензент(ы):

Новиков Роман Леонидович, кандидат технических наук, научный сотрудник, АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор";

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения в смешанном формате обучения лабораторных работ студентами 4 курса направления подготовки бакалавров 24.03.02 «Системы управления движением и навигации» в рамках дисциплины «Оптические гироскопы».

Приводятся теоретические сведения о принципах действия волоконно-оптических гироскопов, их отличительных особенностях, схемах построения, моделях погрешностей выходных сигналов и методах идентификации их составляющих. Содержание работ направлено на усвоение лекционного материала, а также получение навыков обработки реальных выходных данных волоконно-оптических гироскопов в среде MATLAB.



Университет ИТМО – национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию – ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). С 2013 по 2020 гг. – лидер Проекта 5–100.

© Университет ИТМО, 2021

© Драницына Е.В., 2021

© Моторин А.В., 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Теоретические сведения	6
1. Принцип действия волоконно-оптического гироскопа.....	10
2. Модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа	24
Практика обработки выходных сигналов волоконно-оптических гироскопов	
Лабораторная работа № 1.....	37
Лабораторная работа № 2.....	43
Контрольные вопросы	47
Литература.....	48

В предлагаемом пособии представлен адаптированный авторами для выполнения в смешанном (очный/дистанционный) формате обучения цикл лабораторных работ по теме «Исследование выходных сигналов волоконно-оптических гироскопов», выполняемых в рамках дисциплины «Оптические гироскопы» для основных профессиональных образовательных программ высшего образования бакалавриата по направлению подготовки (специальности) 24.03.02 Системы управления движением и навигация.

В учебном пособии приводятся теоретические сведения о принципах действия ВОГ, их отличительных особенностях, схемах построения, моделях погрешностей выходных сигналов и методах идентификации их составляющих. Представленный материал опирается на ряд знаний, умений и навыков, полученных в ходе изучения следующих дисциплин образовательной программы: «Прикладная теория гироскопов», «Математические основы теории оценивания», «Методы и задачи обработки навигационной информации».

Содержание лабораторных работ направлено на усвоение лекционного материала, а также получение навыков обработки реальных выходных данных волоконно-оптических гироскопов в среде MATLAB. В ходе выполнения первой работы студенты познакомятся с принципом действия ВОГ и особенностями построения различных схем фазовой модуляции его выходного сигнала. Получат навыки расчета основных параметров ВОГ и оценки линейности его выходной характеристики. Вторая лабораторная работа направлена на приобретение навыков обработки реальных выходных сигналов ВОГ, идентификации составляющих их модели погрешностей с использованием современных методов, основанных на анализе спектральных плотностей и вариаций Аллана. В конце учебного пособия приведен перечень контрольных вопросов для закрепления изученного материала.

Правила проведения лабораторных работ. Лабораторные работы могут проводиться как очно, так и в дистанционном формате. В очном формате лабораторные работы выполняются группами по 1-3 человека в специально оборудованной аудитории. В дистанционном формате лабораторные работы выполняются индивидуально на личных персональных компьютерах в среде MATLAB версии не ниже 2012b. При этом к персональному компьютеру предъявляются различные требования в зависимости от выбранной версии MATLAB. Исходные данные для выполнения лабораторных работ различаются в зависимости от номера варианта, который необходимо получить у преподавателя.

Требования к оформлению отчета. Отчёт о выполнении лабораторной работы оформляется в электронном виде в любом удобном текстовом редакторе.

Отчет должен содержать титульный лист, на котором указываются номер и название лабораторной работы, номер варианта, Фамилия И.О., номер группы. Требования к содержательной части отчета приводятся в описаниях лабораторных работ. Текст отчёта приводится кратко, содержательно и аргументированно и не должен содержать фрагменты, в точности воспроизводящие текст или его части, представленные в настоящем учебно-методическом пособии. Представленный графический материал должен содержать необходимые подписи, при этом в тексте отчёта должны содержаться ссылки на рисунки с необходимыми примечаниями и расшифровкой используемых обозначений. Если рисунки содержат графики, необходимо указать величины, откладываемые по каждой из осей, с указанием единиц измерения, а также провести анализ наблюдаемых закономерностей. Студент должен соблюдать культуру речи и аккуратность оформления.

Критерии оценивания. Контроль качества выполнения лабораторных работ в очном формате проводится в форме устной защиты отчета. При этом оцениваются правильность выполнения работы, полнота анализа полученных результатов, весомость представленных выводов, своевременность предоставления и качество оформления отчета. В дистанционном формате, помимо оформления отчета, предусмотрено тестирование по каждой лабораторной работе. Для успешной защиты или прохождения тестирования необходимо ответить на контрольные вопросы, приведенные в настоящем пособии.

Первоначально понятие «гироскоп» буквально означало не больше, чем любое устройство для наблюдения абсолютного вращения основания, на котором оно установлено. В настоящее время гироскопами называют широкий класс приборов, которые чувствительны к вращению в инерциальном пространстве объекта, на котором они установлены. Условно их можно разделить на две основные группы: свободные гироскопы и датчики угловой скорости (ДУС). Свободные гироскопы хранят неизменное направление вектора кинетического момента в инерциальном пространстве, а ДУС измеряют проекцию на свою измерительную ось абсолютной угловой скорости вращения основания, на котором они установлены [1; 2]. Гироскопы используются в различных системах ориентации, навигации и стабилизации в качестве чувствительных элементов.

Гироскопы можно классифицировать по принципу действия. По этому признаку можно выделить [2]:

- роторные гироскопы (электростатические, механические, с магнитным или газовым подвесом и т.д.);
- волновые твердотельные гироскопы;
- микромеханические гироскопы;
- оптические гироскопы (лазерные и волоконно-оптические);
- атомные или квантовые гироскопы.

При выборе того или иного типа гироскопа при построении систем ориентации, навигации и стабилизации руководствуются его эксплуатационными и массогабаритными характеристиками, рабочим диапазоном угловых скоростей, стоимостью и т.д. Но определяющими параметрами являются, конечно, точностные характеристики. В качестве наиболее важных точностных характеристик ДУС, к которым относится ВОГ, можно выделить стабильность смещения нуля, стабильность масштабного коэффициента и интенсивность шумовой составляющей. Стабильность смещения нуля представляет собой оценку непостоянства во времени значения выходного сигнала датчика при отсутствии входного воздействия и определяет погрешность ДУС, не зависящую от измеряемой угловой скорости [3]. Стабильность смещения нуля обычно измеряется в °/ч. В свою очередь, стабильность масштабного коэффициента является оценкой непостоянства во времени коэффициента преобразования действующей угловой скорости в измеряемую величину и характеризует погрешность, пропорциональную действующей угловой скорости. Стабильность масштабного коэффициента – безразмерная величина и измеряется в процентах или миллионных долях, ppm (part per million, 10^{-6}).

По точности гироскопы принято делить на классы: потребительский, тактический, средний, навигационный и стратегический [6]. Примерный порядок

точностных характеристик гироскопов в зависимости от класса точности приведен в таблице 1.

Таблица 1 –

Условное деление гироскопов на классы точности [6]

Класс точности	Стабильность смещения нуля, °/ч	Стабильность масштабного коэффициента, ppm	Интенсивность белого шума, °/√ч
Потребительский	10-1000	1000 – 10 000	> 0.5
Тактический	1 – 10	100 – 1000	0,5 – 0,05
Средний	0,01 – 1	10 – 100	0,05 – 0,005
Навигационный	< 0,01	< 10	< 0,005
Стратегический	< 0,001	1 - 3	< 0,0003

По оценкам специалистов, современное состояние рынка гироскопических чувствительных элементов характеризуется доминированием оптических гироскопов, которые занимают более 60% (рис.1) [4]. Это связано с их неоспоримыми достоинствами: достаточно высокая точность, большой динамический диапазон, нечувствительность к ускорениям и перегрузкам при сравнительно низкой стоимости [5]. На базе оптических гироскопов построены бесплатформенные инерциальные навигационные системы для авиационных, морских, космических и наземных применений. В этом классе гироскопов освоен диапазон точностей $10^{-1} \dots 10^{-3}$ °/ч [10].

Значительный прогресс в технологиях изготовления оптических компонент за последние три десятилетия позволил ВОГ перейти из ниши датчиков угловой скорости низкой и средней точности к навигационному классу [2; 6–8]. Так, в конце 80-х годов XX века лучшие представители ВОГ характеризовались дрейфом на уровне 1°/ч, а в конце 90-х этот параметр вышел на уровень сотых и тысячных долей градуса в час [9]. В настоящее время завершаются работы по созданию ВОГ класса точности 10^{-4} °/ч [10], и, несмотря на то, что ВОГ по-прежнему уступают по стабильности масштабного коэффициента, они постепенно вытесняют лазерные гироскопы (ЛГ) [10]. Это обусловлено их потенциально высокой точностью [11], а также тем, что, при сравнимых с ЛГ точностях, ВОГ в большинстве случаев имеет менее сложную конструкцию. Это делает технологию ВОГ весьма привлекательной для использования в системах ориентации, навигации и стабилизации. Для сравнения на рис. 2 приведен внешний вид волоконно-оптических и лазерного гироскопов.



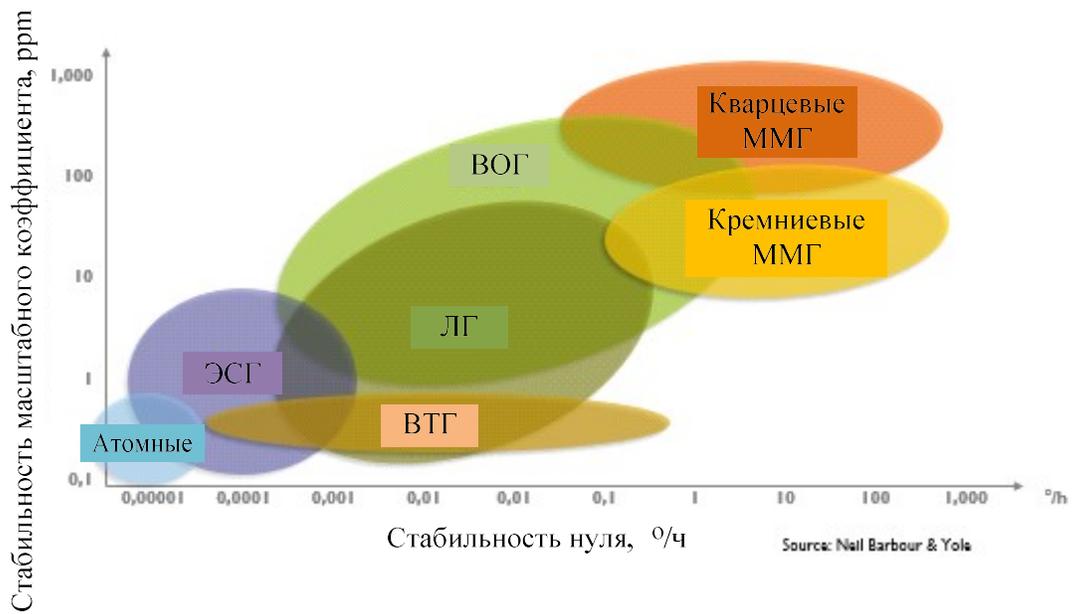
Рис. 1 Рынок гироскопических чувствительных элементов, 2016 год [4]



Рис. 2 Внешний вид оптических гироскопов: (а) волоконно-оптические гироскопы, НПО «Оптолинк»; (б) лазерный гироскоп, Litton.

ВОГ перекрывают довольно обширную область по величинам стабильности смещения нуля и масштабного коэффициента (рис. 3). Это вызвано тем, что, меняя размер волоконной катушки, можно изменять чувствительность ВОГ к действующей угловой скорости и, соответственно, потенциально достижимую точность.

На сегодняшний день можно назвать следующих производителей ВОГ: АО «Физоптика», Россия; ООО «Оптолинк», Россия; ОАО ПНППК, Россия; НИИ ПМ (ЦЭНКИ), Россия; ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия; Honeywell, США; Northrop Grumman (Litton, Litef), США; KVH, США; Emcore, США; IXBLUE, Франция; FOG Photonics, Гонконг; Al CIELO, Израиль; Hitachi Cable, Япония; Saab, Швеция [16].



ЭСГ – электростатические гироскопы; ВТГ – волновые твердотельные гироскопы; ЛГ – лазерные гироскопы; ВОГ – волоконно-оптические гироскопы; ММГ – микромеханические гироскопы.

Рис. 3 Точностные характеристики современных гироскопов [4]

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

1.1. МИНИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ВОГ

Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка. При распространении внутри замкнутого контура двух одинаковых волн в противоположных направлениях сдвиг фазы их интерференционной картины будет прямо пропорционален угловой скорости вращения вокруг нормали к плоскости интерферометра (рис.4). Это обусловлено разным временем обхода контура для встречных волн.

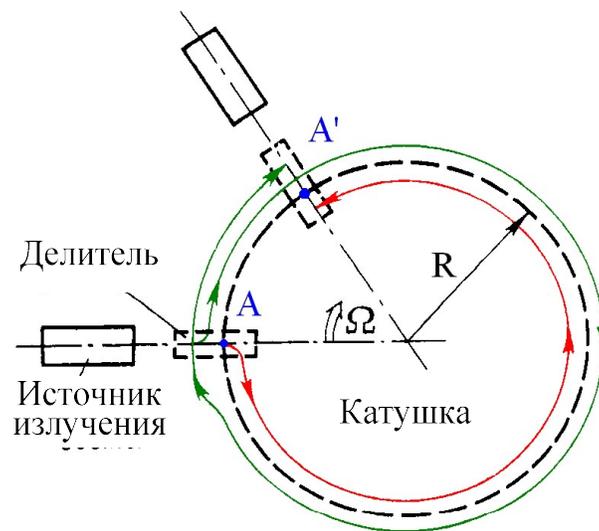


Рис. 4 Эффект Саньяка. Здесь Ω – угловая скорость вращения.

Чувствительным элементом ВОГ является интерферометр - замкнутый контур из одномодового оптического волокна. Напомним, что модой называется конфигурация электромагнитной волны, которая удовлетворяет уравнениям Максвелла и граничным условиям и может существовать в оптическом контуре. Преимуществом использования одномодовых волокон является отсутствие межмодовых биений, которые существенно снижают чувствительность волоконно-оптического интерферометра к вращению [9].

Посредством делителя свет, испускаемый (генерируемый) источником излучения, делится на две части, распространяющиеся внутри контура в противоположных направлениях: по ходу часовой стрелки sw и против хода стрелки часов $сsw$. Полученные таким образом две волны sw и $сsw$ должны удовлетворять принципу взаимности, который гласит, что при идентичности траектории распространения такие волны будут иметь одинаковые ослабление амплитуды и набег фазы [2]. Невзаимные эффекты создают различия в условиях

распространения встречных волн и приводят к сдвигу интерференционной картины на фотоприемнике сложены посредством делителя волн sw и csw . Единственный невзаимный эффект, представляющий интерес при построении ВОГ, это эффект Саньяка, который приводит к сдвигу фаз встречных волн, пропорциональному угловой скорости вращения вокруг нормали к плоскости оптического контура. Однако первые модификации ВОГ показали, что для обеспечения принципа взаимности необходимо использовать так называемую минимальную взаимную конфигурацию, схематический вид которой приведен на рис.5.

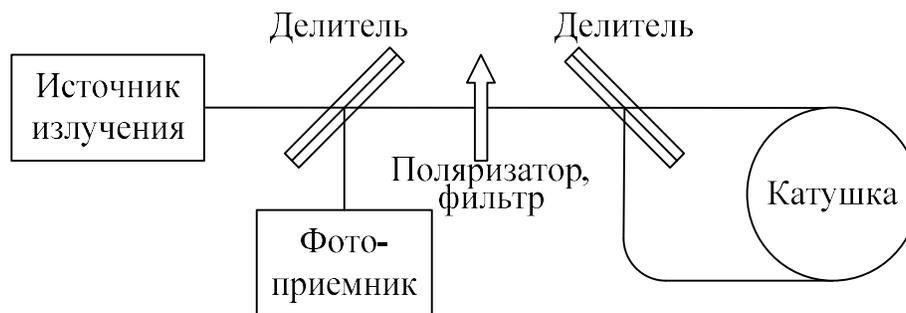


Рис. 5 Минимальная взаимная конфигурация ВОГ.

Минимальная взаимная конфигурация ВОГ включает [2; 6]:

- источник излучения;
- фотоприемник;
- катушку одномодового сохраняющего поляризацию оптического волокна, что повышает точность ВОГ;
- два светоделителя, необходимых для того, чтобы обе идущие на фотоприемник волны sw и csw дважды прошли через светоделитель и дважды отразились от него, приобретая при этом одинаковый набег фаз;
- одномодовый пространственный фильтр и поляризатор.

Если оптический контур образован многовитковой катушкой волокна, намотанной на цилиндрический каркас радиуса R , то разность фаз встречных волн φ_s , обусловленная эффектом Саньяка, вычисляется по формуле [2; 6]:

$$\varphi_s = \frac{8\pi NS}{\lambda c} \Omega = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega, \quad (1)$$

где $S = \pi R^2$ – площадь интерферометра; N – количество витков волокна; L – общая длина волокна в оптическом контуре; λ – длина волны излучения; c – скорость света. Как видно из формулы (1), чувствительность метода с использованием оптического волокна значительно возрастает, так как можно увеличить эффективную площадь контура в N раз в тех же габаритных размерах.

При сложении световых пучков на фотоприемнике на выходе ВОГ (рис. 5) получается интерференционная картина, интенсивность света которой равна

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \varphi_s), \quad (2)$$

где I_0 – входная интенсивность, генерируемого источником излучения. Интенсивность света на фотоприемнике в зависимости от фазы Саньяка и соответственно действующей угловой скорости будет меняться по закону единица плюс косинус (рис. 6).

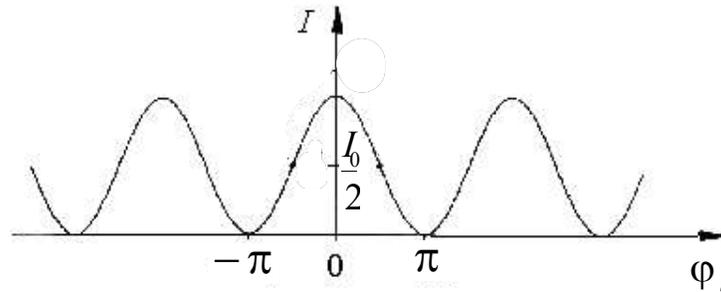


Рис. 6 Зависимость интенсивности света на выходе ВОГ от фазы Саньяка.

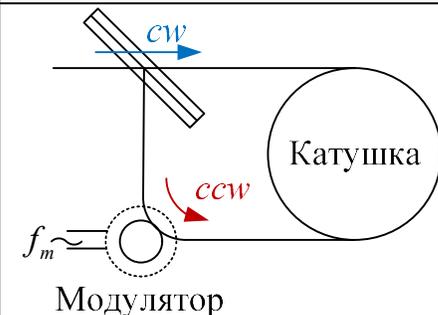
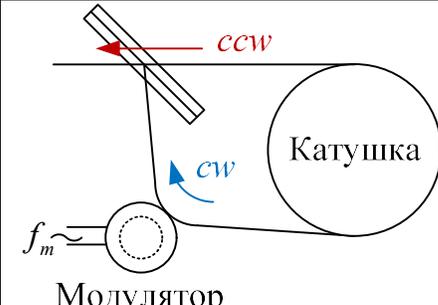
Как видно из рис. 6, зависимость интенсивности света интерференционной картины от скорости вращения обладает существенной нелинейностью. Кроме того, в области малых угловых скоростей чувствительность метода минимальна, поскольку рабочая точка в этой области находится на плоской вершине косинуса. Скорость вращения порядка $1^\circ/\text{ч}$ соответствует сдвигу фазы порядка $10^{-6} - 10^{-5}$ рад [2]. Однако в гироскопии наибольшее внимание уделяется как раз таки возможности измерения малых угловых скоростей. Поэтому наиболее оптимальной была бы выходная характеристика, сдвинутая относительно нуля на $\pi/2$, что обеспечило бы работу на наиболее крутом и линейном участке характеристики.

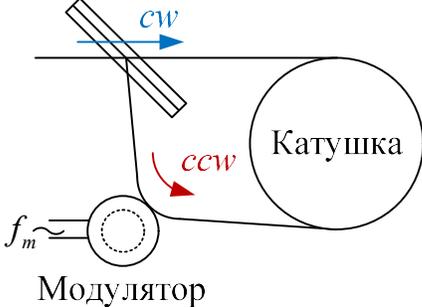
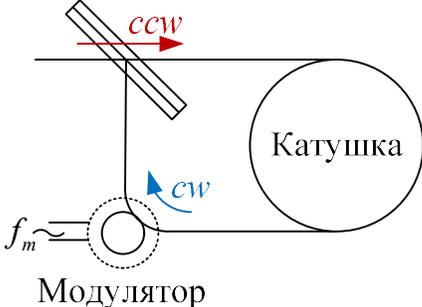
1.2. ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Сдвинуть характеристику можно, придав одной из двух встречных волн невзаимный (т.е. различный для двух встречных волн) фазовый сдвиг на $\pi/2$, при использовании, например эффекта Фарадея, являющегося эффектом невзаимным. Недостатком такой схемы является чувствительность элемента, создающего невзаимный фазовый сдвиг, к изменениям внешних факторов, таких как температура, магнитное поле и др. Изменения разности фаз, обусловленные влиянием внешних факторов на невзаимный элемент, неотличимы от разности фаз Саньяка. Поэтому схема с невзаимным фазовым элементом не используется.

Наиболее удачной оказалась схема обработки выходного сигнала с взаимным фазовым модулятором, расположенным на одном из концов волоконной катушки. В простейшем случае взаимный фазовый модулятор представляет собой пьезокерамический цилиндр с намотанным на него участком волокна. При подаче на стенки цилиндра напряжения его диаметр изменяется, вследствие обратного пьезоэффекта [12]. Фазовая модуляция осуществляется за счет растяжения или сдвливания волокна, намотанного на пьезокерамический элемент. Волоконная катушка в данном случае играет роль временной линии задержки на величину $\tau_0 = L/c$ – время обхода светом волоконного контура. В таблице 2 приведено пояснение процесса формирования сдвига фаз, вносимого модулятором, при использовании прямоугольной фазовой модуляции, т.е. в предположении, что модулятор меняет свой диаметр мгновенно на частоте $f = 1/\tau_0$.

Таблица 2 –
Принцип действия взаимного фазового модулятора на основе пьезокерамического элемента

Время	Графическое пояснение	Сдвиги фаз встречных волн	Сдвиг фаз, вносимый модулятором
$t = 0$	 <p>Катушка</p> <p>Модулятор</p>	<p>на входе в катушку:</p> $\varphi_{cw} = 0,$ $\varphi_{ccw} = -\frac{\pi}{4}$	
$t = \tau_0$	 <p>Катушка</p> <p>Модулятор</p>	<p>на выходе из катушки:</p> $\varphi_{cw} = +\frac{\pi}{4},$ $\varphi_{ccw} = 0$	$\varphi_m(\tau_0) = \frac{\pi}{2}$

$t = \tau_0$		на входе в катушку: $\varphi_{cw} = 0,$ $\varphi_{ccw} = +\frac{\pi}{4}$	
$t = 2\tau_0$		на выходе из катушки: $\varphi_{cw} = -\frac{\pi}{4},$ $\varphi_{ccw} = 0$	$\varphi_m(\tau_0) = -\frac{\pi}{2}$

Как видно из Таблицы 2, разность фаз φ модулируется от $\pi/2$ до $-\pi/2$ на частоте $f_m = 1/2\tau_0$. Выходной сигнал фотоприемника $i = \gamma(1 + \cos \varphi_s)$ при этом в зависимости от момента времени будет равен [2; 6]:

$$i = \gamma[1 + \cos(\pi/2 + \varphi_s)] = \gamma(1 - \sin \varphi_s) \quad \text{при } 2n\tau_0 \leq t \leq (2n+1)\tau_0, \quad (3)$$

$$i = \gamma[1 + \cos(-\pi/2 + \varphi_s)] = \gamma(1 + \sin \varphi_s) \quad \text{при } (2n+1)\tau_0 \leq t \leq 2(n+1)\tau_0. \quad (4)$$

При отсутствии действующей угловой скорости ($\Omega = 0$) имеем постоянный уровень интенсивности (рис. 7). При наличии угловой скорости ($\Omega \neq 0$) получаем модуляцию на частоте работы модулятора $f_m = 1/2\tau_0$ (рис. 7).

Выходным сигналом ВОГ в данном случае будет измеряемый синхронным детектором сигнал демодуляции, который представляет собой глубину модуляции, по сути равную разности интенсивностей за период модуляции

$$S = \Delta i = \gamma 2 \sin(\varphi_s). \quad (5)$$

Однако пьезокерамический элемент, обладая инерционностью, не может менять свой размер мгновенно, особенно когда требуется высокая частота фазовой модуляции. Поэтому зачастую модуляция осуществляется по гармоническому закону. В этом случае, в отличие от прямоугольного закона, не предъявляются такие жесткие требования к поддержанию определенной частоты модуляции.

При синусоидальном законе модуляции выходной сигнал фотоприемника имеет вид [2; 6]

$$\begin{aligned} i(t) &= A_0 [\cos(\varphi_s + \varphi_m \cos(2\pi f_m t))] = \\ &= A_0 [\cos \varphi_s \cos(\varphi_m \cos(2\pi f_m t)) - \sin \varphi_s \sin(\varphi_m \cos(2\pi f_m t))] \end{aligned} \quad (6)$$

где φ_m, f_m – амплитуда и частота фазовой модуляции по гармоническому закону.

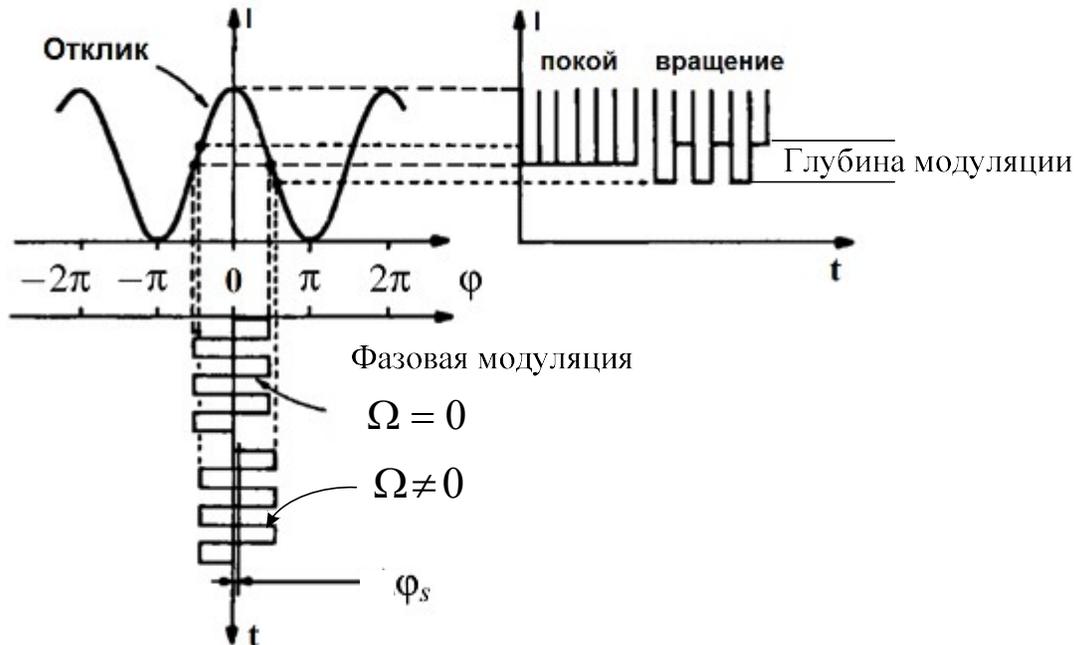


Рис. 7 Модуляция смещения нуля ВОГ по прямоугольному закону.

Используя разложение в ряд по функциям Бесселя, можно получить

$$i(t) = A_0 \cos \varphi_s [J_0(\varphi_m) + 2J_2(\varphi_m) \cos 2(2\pi f_m t) + \dots] + A_0 \sin \varphi_s [2J_1(\varphi_m) \sin(2\pi f_m t) + 2J_3(\varphi_m) \sin 3(2\pi f_m t) + \dots], \quad (7)$$

где $J_i, i=0,1,2,\dots$ – коэффициенты разложения.

Если произвести демодуляцию полученного сигнала, т.е. выделить колебательную составляющую на частоте модуляции f_m в выражении (3), то можно получить сигнал (постоянный после фильтрации и выпрямления), пропорциональный синусу сдвигу фаз Саньяка φ_s и соответственно действующей угловой скорости Ω :

$$S = CJ_1(\varphi_m) \sin \varphi_s. \quad (8)$$

Демонстрация работы фазовой модуляции по гармоническому закону представлена на рис.8. При гармонической модуляции максимальная чувствительность достигается при значении амплитуды модуляции $\varphi_m = 1,8$, когда $J_1(\varphi_m) = 0,53$ [9].

Сигнал S , полученный после демодуляции, является полезным сигналом с очень стабильным нулем, поскольку изменения интенсивности света и амплитуды модуляции не вносят сдвига нуля. Внешний вид сигнала демодуляции показан на рис.9.

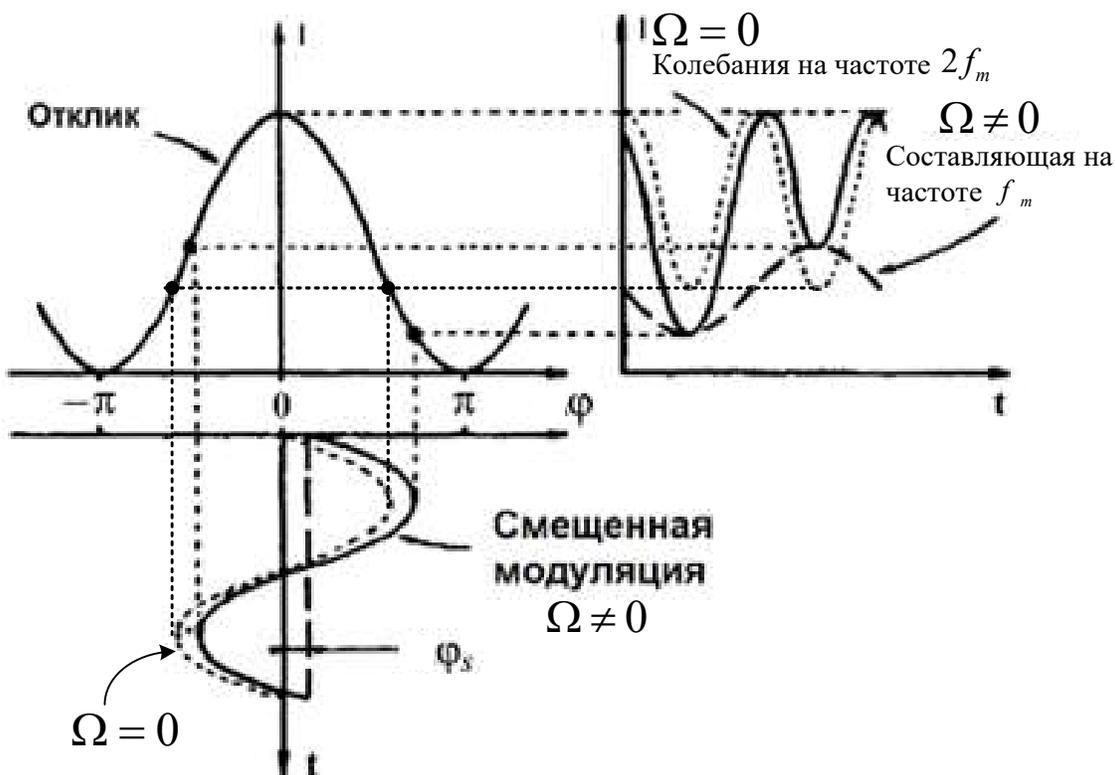


Рис. 8 Модуляция смещения нуля ВОГ по гармоническому закону.

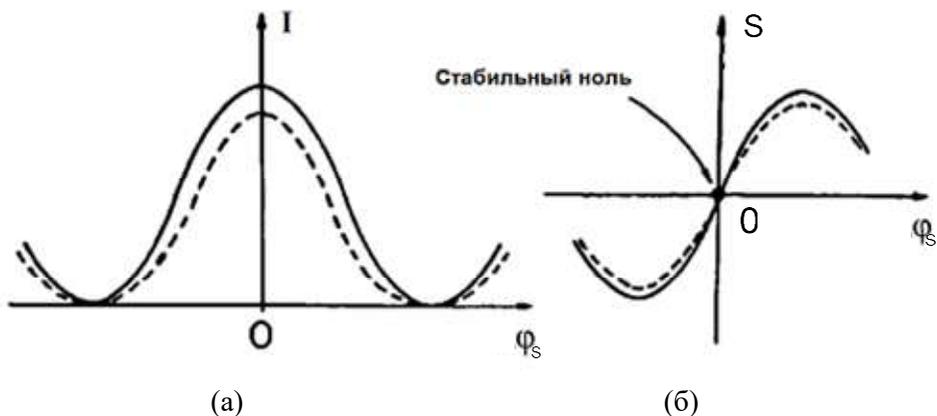


Рис. 9 Выходной сигнал ВОГ: (а) – интенсивность света, фазовая модуляция отсутствует; (б) – сигнал демодуляции, используется взаимная фазовая модуляция.

Сигнал демодуляции является синусоидальным, что влечет за собой два существенных недостатка: нелинейность выходной характеристики и ограниченность рабочего диапазона. Рабочий диапазон будет ограничен угловой скоростью $\Omega_{\pi/2}$ соответствующей сдвигу фаз интерференционной картины $\pm\pi/2$.

При выходе действующей скорости за границы диапазона $[-\Omega_{\pi/2} \quad \Omega_{\pi/2}]$ зависимость сигнала демодуляции от сдвига фаз Саньяка теряет однозначность. Границы диапазона можно получить, если в формулу (1) подставить $\varphi_s = \pi/2$ и выразить угловую скорость:

$$\Omega_{\pi/2} = \frac{\lambda c}{4\pi RL} \frac{\pi}{2}. \quad (9)$$

1.3. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Использование ВОГ в системах ориентации и навигации подвижных объектов требует высокой линейности во всем диапазоне угловых скоростей, а не только в районе нуля. Проблема обеспечения линейности выходной характеристики и работы ВОГ в широком диапазоне скоростей решается посредством создания схем с обратной связью. В этом случае сигнал демодуляции используется в качестве сигнала, подаваемого в систему для выработки сигнала обратной связи. Последняя создает сдвиг фаз $\varphi_{fb} = -\varphi_s$. Суммарный сдвиг фаз, обусловленный сдвигами фаз Саньяка и обратной связи, поддерживается равным нулю и обеспечивает работу в нулевой точке выходной характеристики (рис. 10). В такой замкнутой схеме измеряемой величиной становится сдвиг фаз φ_{fb} . Это обеспечивает линейность выходной характеристики и ее высокую стабильность, поскольку такой сигнал обратной связи не зависит от мощности света на фотодетекторе и коэффициента усиления в цепи фотоприемника, а кроме того, снимает ограничения на рабочий диапазон измеряемых угловых скоростей.

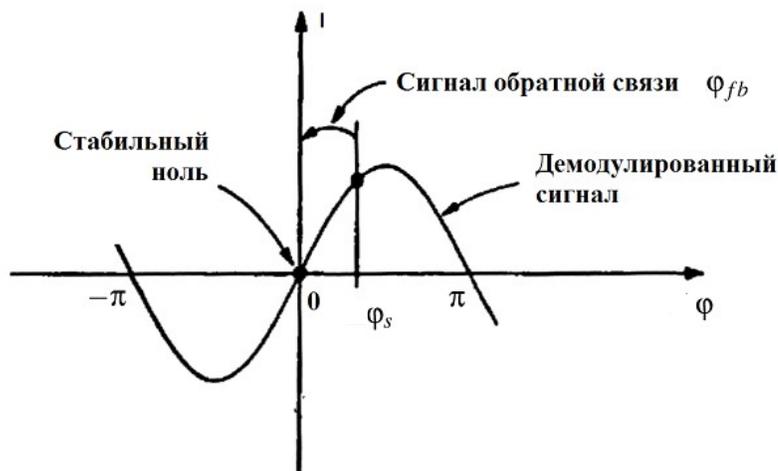


Рис. 10 Принцип действия обратной связи в ВОГ.

Наибольшее распространение получила схема, в которой сигнал обратной связи вырабатывается при пилообразной модуляции разности фаз встречных волн. В этом случае взаимный модулятор создает линейно изменяющийся во времени набег фазы φ_{fb} (рис. 11). Поскольку модулятор расположен в оптическом контуре несимметрично, возникает сдвиг фаз между встречными волнами. Этот сдвиг фаз может использоваться в качестве сигнала обратной связи.

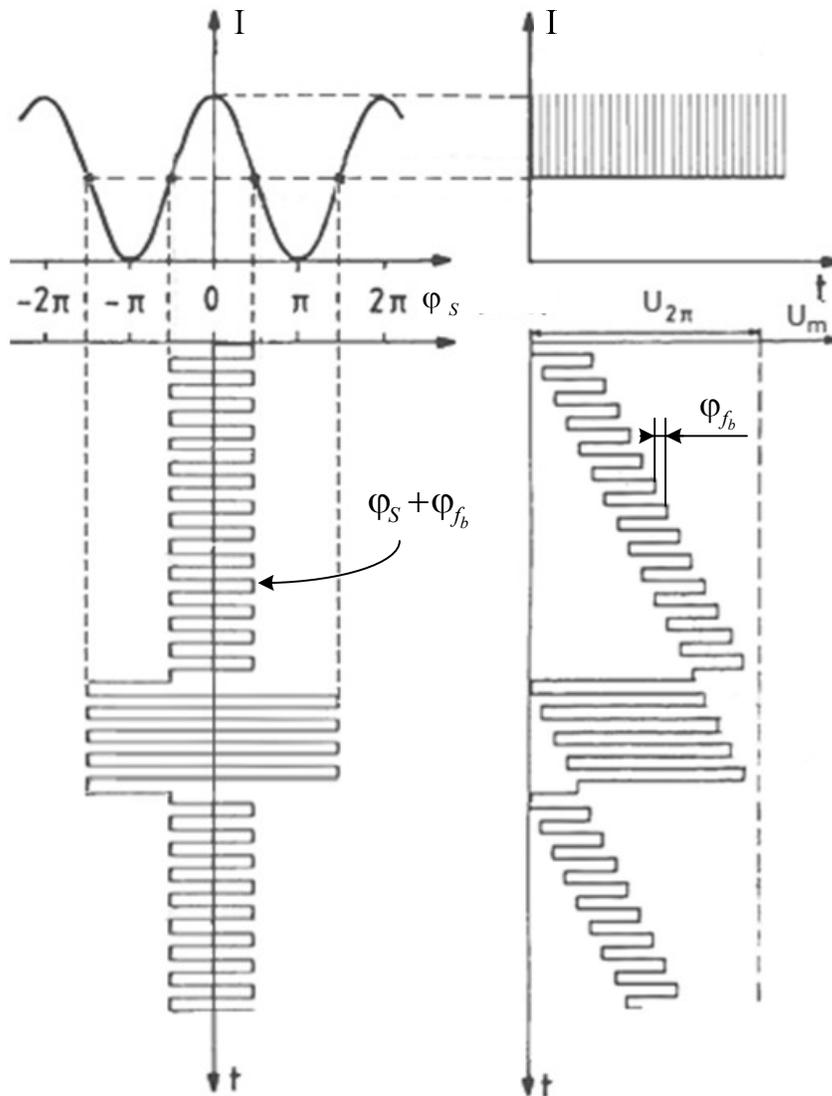


Рис. 11 Принцип действия схемы взаимной фазовой модуляции с обратной связью.

Минимальная конфигурация ВОГ, построенного по схеме с обратной связью, приведена на рис. 12. В качестве модулятора при такой схеме построения вместо пьезокерамического элемента, который не может обеспечить требуемую

частоту работы, используется интегрально-оптическая схема. Интегрально-оптическая схема представляет собой, как правило, кристалл ниобата лития (LiNbO_3), на который нанесены каналные световоды, внутри которых распространяется свет (рис. 13). Прикладывая напряжение к электродам, можно изменять скорость распространения света по световодам, тем самым обеспечивая эффективную фазовую модуляцию.

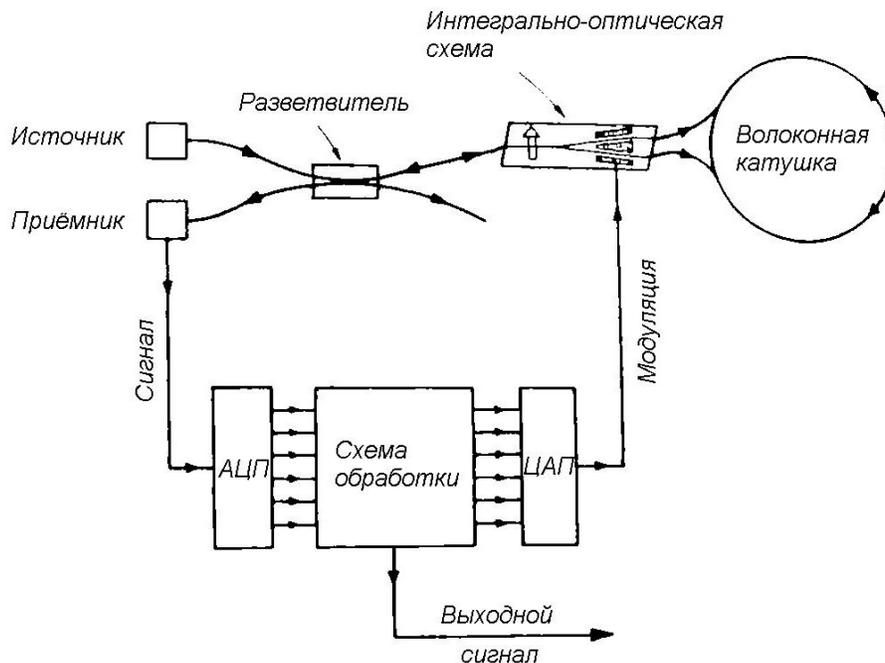


Рис. 12 Минимальная конфигурация ВОГ, построенного по схеме с обратной связью.

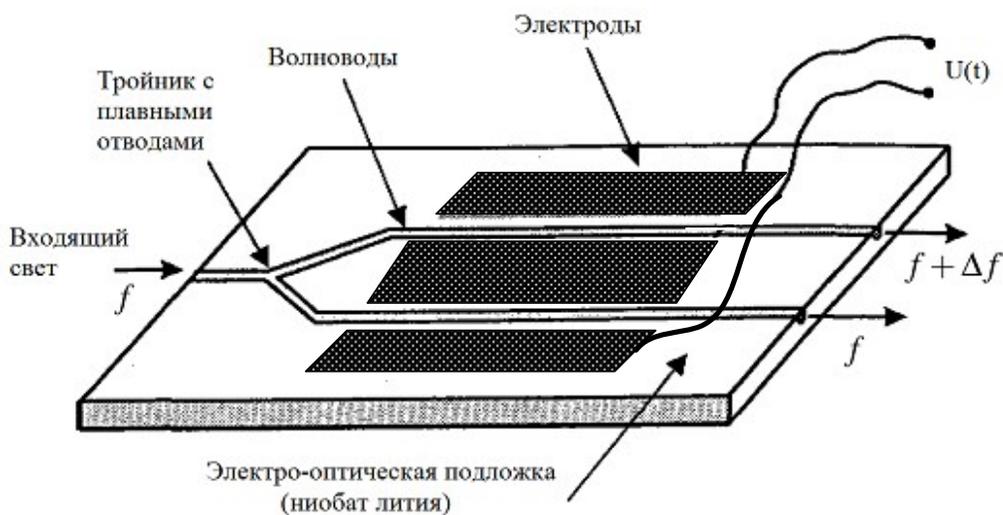


Рис. 13 Интегрально-оптическая схема [9].

1.4. СРАВНЕНИЕ ДВУХ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ ВОГ

ВОГ, построенный по открытой схеме, обычно выполнен по полностью волоконной технологии, т.е. все его элементы, за исключением источника излучения и фотоприемника, изготавливаются из непрерывной нити оптического волокна [1]. Соответственно используется пьезокерамический фазовый модулятор. В такой схеме излучение не покидает волоконный контур, что исключает из технологии изготовления трудоемкий процесс стыковки оптических компонент и снижает потери при распространении. В качестве источника излучения применяется суперлюминесцентный диод, средняя длина волны которого находится на уровне 830 нм. Чем меньше длина волны, тем больше чувствительность метода, что следует из формулы (1). Фотоприемник представляет собой фотодиод на основе *p-i-n* структуры. Катушка выполняется из одномодового сохраняющего поляризацию кварцевого волокна, длиной не более 500 м. Волокно наматывается на каркас, выполненный из материала, чей коэффициент линейного температурного расширения близок к кварцу. Для заполнения межвиткового пространства и придания катушке прочности используют различные полимеры с определенными свойствами.

Основные преимущества таких ВОГ: полностью волоконная схема; низкая скорость фазовой модуляции и простая обработка сигнала; стабильный ноль. В качестве недостатков можно отметить ограниченный диапазон угловых скоростей, нелинейность выходной характеристики и ограниченный диапазон измеряемых угловых скоростей.

Рассмотрим несколько представителей ВОГ, построенных по открытой схеме. В первую очередь стоит упомянуть компанию «Физоптика», Россия, которая является пионером массового производства недорогих малогабаритных ВОГ. Продукция компании «Физоптика» представляет собой компактные датчики угловой скорости для диагностики и испытаний, управления движением, угловой стабилизации и навигации и используется в различных областях промышленности индустриально-развитых стран [13]. Внешний вид и некоторые характеристики наиболее точных представителей приведены на рис. 14.

Стоит также отметить компанию KVH Industries, которой удалось создать наиболее точные образцы ВОГ, построенные по открытой схеме. Значительные улучшения характеристик ВОГ были получены благодаря инновациям в ключевых областях, включая разработку запатентованного сохраняющего поляризацию D-образного волокна с эллиптическим сердечником и обработку сигналов, а также постоянному улучшению производственных процессов ВОГ [14]. Внешний вид и некоторые характеристики наиболее точных представителей приведены на рис. 15.



Рис. 14. ВОГ производства компании «Физоптика», Россия [13]

Attribute	Specification		
Performance	DSP-3000	DSP-1750	DSP-1760
Input Rotation Rate	± 375°/sec	± 490°/sec (± 1000°/sec)	± 490°/sec
Angle Random Walk	≤ 0.067°/√hr	≤ 0.013°/√hr	≤ 0.012°/√hr
Bias Instability	≤ 1°/hr	≤ 0.1°/hr	≤ 0.05°/hr
Scale Factor Linearity	≤ 500 ppm	≤ 200 ppm	≤ 50 ppm
Physical			
Dimensions	3.5" x 2.3" x 1.3"	1.7" Dia x 0.9" H	3.5" Dia x 2.9" H
Weight	0.6 lbs. (0.26 kg)	0.24 lbs (0.11 kg)	1.1 lbs (0.5 kg)



Рис. 15 ВОГ производства компании KVH, США [14]

Как видно из примеров, приведенных выше, наилучшие образцы построенных по открытой схеме ВОГ достигают точности десятых градуса в час и ограничены приложениями тактического класса точности. Такие гироскопы (стабильность смещения нуля в диапазоне от 0,1°/ч до 5°/ч) с успехом используются в системах управления космическими аппаратами, в путеизмерительных системах, морских гироскопах и системах курсоуказания

гражданских самолетов [2]. Более простые представители составляют конкуренцию наиболее точным микромеханическим гироскопам, так как обладают неоспоримыми преимуществами, такими как устойчивость к вибрациям, ударам и акустическим шумам, практически неограниченная полоса пропускания. Эти преимущества обусловлены отсутствием подвижной массы. Однако ВОГ уступают микромеханическим гироскопам по стоимости, габаритным размерам и чувствительности к тепловым (эффект Шупе) и магнитным (эффект Фарадея) полям [15].

Значительно лучшую точность показывают ВОГ, построенные по схеме с обратной связью. Фазовая модуляция в таких ВОГ производится с помощью электрооптического модулятора, входящего в состав интегральной оптической схемы (рис. 13). В таких ВОГ используются широкополосные волоконные суперлюминесцентные источники оптического излучения, обеспечивающие работу на длине волны 1550 нм. При увеличении длины волны оптического излучения чувствительность метода снижается в соответствии (1), но это компенсируется значительным снижением потерь в волокне, которые сильно зависят от длины волны. В ВОГ, построенных по схеме с обратной связью, потери в волокне играют важную роль, так как длина контура достигает нескольких километров (до 5-6 км). Широкополосный волоконный суперлюминесцентный источник оптического излучения уменьшает погрешности, вносимые обратным отражением, релеевским рассеянием, поперечными поляризациями, эффектом Керра. Катушка представляет собой сохраняющее поляризацию волокно, намотанное на каркас по симметричной схеме для снижения влияния температуры. Встречаются также варианты бескаркасных катушек [2; 6; 9].

ВОГ, построенные по схеме с обратной связью, обладают высокой линейностью выходной характеристики, стабильным масштабным коэффициентом и неограниченным диапазоном измеряемых угловых скоростей. В качестве недостатков можно отметить: высокочастотную фазовую модуляцию и высокоскоростную цифровую схему обработки; использование интегрально-оптической схемы в качестве фазового модулятора, которое приводит к необходимости стыковки оптических компонент.

ВОГ, построенные по схеме с обратной связью, являются гироскопами более высокого класса точности. Оценки специалистов показывают [11], что потенциально достижимая стабильность смещения нуля находится на уровне 10^{-4} °/ч. Характеристики основных представителей представлены в Таблице 3.

Для обеспечения требуемого качества изготовления оптических компонент для обеспечения высокой точности, производители таких ВОГ зачастую сами выполняют весь технологический процесс от создания преформ и вытяжки волокна до изготовления оптоэлектроники. Такие ВОГ с успехом используются в авиационных и морских инерциальных навигационных системах, основным

назначением которых является автономное определение координат и начальной выставки объекта относительно горизонтной системы координат с географической ориентацией осей. Наиболее точные представители используются в высокоточных инерциальных навигационных системах для подводных лодок и некоторых космических аппаратов [2].

Таблица 3 –

Сравнение характеристик ВОГ различных фирм производителей [16]

	Диапазон измеряемой угловой скорости, °/с	Случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала при фиксированной температуре, °/ч	Шум выходного сигнала (°/ч)/√Гц	Погрешность масштабного коэффициента, ppm	Длина волоконного контура, м	Габаритные размеры, мм
FOG 600S, FOG Photonics, Inc, Гонконг	±500	≤ 0,005 (1σ)	≤ 0,7	≤ 20 (1σ)	1500	Ø120 x 38
ОИУС-2000/ ОИУС-1000, Оптолинк, Россия	±40/ ±100	≤ 0,005 (1σ)/ ≤ 0,01 (1σ)	≤ 0,03/ ≤ 0,07	≤ 80 (*)/ ≤ 100 (*)	2000/ 1000	Ø250 x 40 Ø150 x 40
ВОГ-120, ПНППК, Россия	±100	0,02...0,05 (1σ)	≤ 0,18	≤ 500 (*)	1000	Ø120 x 40
КИНД 11-222, НИИ ПМ (ЦЭНКИ), Россия	±60	0,002 (1σ)	нет данных	≤ 100 (*)	2000	Ø122 x 270
FOG 120, IXBLUE, Франция	±260	≤ 0,01 (1σ)	≤ 0,072	≤ 30 (*)	2000	Ø120 x 50
FOG 1000, Northrop Grumman, США	±600	0,005 (*)	≤ 0,04	≤ 100 (*)	1000	Ø94
ВОГ, ЦНИИ "Электроприбор", Россия	±450	≤ 0,01 (1σ)	≤ 0,04	≤ 50 (3σ)	2000	Ø152x46

*) Примечание: Нет данных об уровне точности.

2. МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Одним из путей повышения уровня точности систем ориентации и навигации является детальное описание модели погрешностей датчиков угловой скорости и тщательный анализ влияния составляющих этой модели на точность работы системы. Актуальными являются задачи построения математической модели погрешностей волоконно-оптического гироскопа и оценки значений ее составляющих. При этом интерес, безусловно, представляет зависимость выходного сигнала ВОГ от измеряемой величины и воздействия внешних факторов, таких как температура, давление и т.д. Но не менее ценной является информация о структуре и параметрах шумовой составляющей, необходимая для настройки фильтров при совместной обработке сигналов от нескольких датчиков или систем.

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОГ

Математическая модель погрешностей ВОГ, как и любых других датчиков угловой скорости, в общем случае включает в себя следующие величины [3; 17; 18; 38]:

- смещение нуля (bias) – выходной сигнал датчика, отличный от нуля, при входном воздействии равном нулю;
- масштабный коэффициент (scale factor) – величина отношения изменения в измеряемом сигнале к изменению входного воздействия, которая определяется как коэффициент преобразования входного сигнала;
- углы неортогональности (input-axis misalignment) – углы, образованные измерительными осями и посадочными поверхностями ВОГ (актуальны при использовании триады одноосных датчиков);
- шумовая составляющая.

С увеличением уровня требуемой точности растет и усложняется модель погрешностей ВОГ. В зависимости от требуемой точности, количества и номенклатуры физических величин, выступающих в качестве исходных данных, доступного стендового оборудования и требуемого диапазона измерения угловых скоростей модель погрешностей может значительно отличаться своей детализацией, включать в себя изменчивость перечисленных выше параметров, зависимость их от внешних воздействий [17].

Выходной сигнал одноосного ВОГ в общем случае можно описать следующей моделью [19; 20]:

$$u(\omega, T, P, \dots) = S(T, \dots) \cdot [1 + f(\omega)] \cdot \omega + u_0(T, P, \dots) + \eta_u, \quad (10)$$

где u – выходной сигнал ВОГ, который является функцией действующей угловой скорости ω , температуры T , давления P и т.д.; u_0 – смещение нулевого сигнала ВОГ, величина которого зависит от внешних факторов; S – масштабный коэффициент (МК) ВОГ, величина которого может зависеть от внешних факторов; $f(\omega)$ – функция, учитывающая нелинейность МК; η_u – белое шумная составляющая выходного сигнала ВОГ.

Определение вида зависимостей смещения нуля и масштабного коэффициента от измеряемой величины и внешних факторов, их количественных и статистических характеристик составляют суть задачи калибровки. В ходе калибровки сначала определяются детерминированные составляющие модели (10), связывающей выходной сигнал ВОГ с измеряемой угловой скоростью. Эксперимент организовывается таким образом, чтобы исключить влияние других внешних факторов на выходной сигнал. При этом определяются коэффициенты функции $f(\omega)$, аппроксимирующей нелинейность МК. Как было показано в предыдущем разделе пособия, ВОГ, построенные по открытой схеме обладают существенной нелинейностью выходной характеристики, которую необходимо учитывать в ходе работы.

Следующий этап калибровки включает в себя оценку зависимости коэффициентов модели выходного сигнала (10) от внешних факторов, таких, как температура, магнитное поле, вибрации, ориентация измерительной оси относительно вектора силы тяжести и т.д. Эту зависимость обычно аппроксимируют полиномиальными функциями [21]. Доля температурных погрешностей в суммарном дрейфе ВОГ, как показывают исследования [22], может достигать 30-40 %. Поэтому ключевым вопросом при создании ВОГ среднего класса точности и выше является компенсация зависимости коэффициентов модели выходного сигнала от температуры и скорости ее изменения. Точность калибровки коэффициентов модели ВОГ (смещения нуля и МК) не может быть лучше их стабильности. Именно величиной стабильности коэффициентов модели погрешностей и характеризуют ВОГ.

Из формулы (10) можно выразить действующую угловую скорость ω :

$$\omega = S^{-1} \cdot (u - u_0 - \eta_u). \quad (11)$$

В формуле (11) используются значения смещения нуля u_0 и МК S , вычисленные с учетом нелинейности выходной характеристики и зависимости от внешних факторов. Для удобства дальнейшего изложения величину S^{-1} , обратную МК, обозначим M .

Погрешность определения угловой скорости $\delta\omega$ может быть получена как разность действующей ω и вычисленной $\hat{\omega}$ угловой скорости:

$$\delta\omega = \omega - \hat{\omega} = M \cdot (u - u_0 - \eta_u) - \hat{M} \cdot (u - \hat{u}_0). \quad (12)$$

Здесь знак «^» обозначает, что эти величины вычислены в ходе калибровки. Учитывая, что $\delta M = (M - \hat{M})/M$, $\delta u_0 = u_0 - \hat{u}_0$, пренебрегая величинами

второго порядка малости и вводя обозначения $\delta\omega_0 = -\hat{M} \cdot \Delta u_0, \eta_\omega = -\hat{M} \cdot \eta_u$ приходим к модели, аналогичной приведенной в [23]

$$\delta\omega = \omega_0 + \delta M \cdot \hat{\omega} + \eta_\omega, \quad (13)$$

где $\Delta\omega_0$ включает в себя погрешность определения смещения нуля, изменчивость среднего значения от пуска к пуску и его стабильность в пуске; δM – погрешность определения МК и его изменчивость (стабильность) в пуске, вносит вклад, пропорциональный измеряемой угловой скорости; η_ω – бел шумная составляющая.

2.2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В рамках настоящей работы будем полагать, что для описания погрешности ВОГ, представленной скалярной функцией времени $\delta\omega(t)$, в общем случае может быть задана модель в виде суммы трех независимых составляющих:

$$\delta\omega(t) = \bar{\omega}_0(t) + \tilde{\omega}_0(t) + \eta(t), \quad (14)$$

где $\bar{\omega}_0(t)$ – систематическая составляющая смещения нуля; $\tilde{\omega}_0(t)$ – случайная составляющая смещения нуля, задаваемая случайным процессом с заданными свойствами; $\eta(t)$ – высокочастотная (бел шумная) составляющая.

Погрешность масштабного коэффициента не рассматривается, т.к. идентификация ее составляющих на фоне аддитивных (не зависящих от измеряемой величины) составляющих, представленных в (14), является нетривиальной трудоемкой задачей и в настоящем учебно-методическом пособии не рассматривается. Кроме того, в ходе предусмотренных в настоящем учебно-методическом пособии лабораторных работ предполагается использование выходных данных ВОГ, полученных на неподвижном основании, когда вклад мультипликативных составляющих (составляющих, зависящих от измеряемой величины) модели погрешностей считается пренебрежимо малым.

Систематическая или квазислучайная составляющая смещения нуля $\bar{\omega}_0(t)$ представляет собой детерминированную функцию или сумму таких функций со случайными постоянными коэффициентами. Зачастую при описании погрешностей навигационных измерителей в качестве детерминированных функций выбирают степенные (полиномиальные) функции со случайными коэффициентами. Простейшими примерами являются не изменяющаяся во времени систематическая (постоянная) составляющая и случайный наклон (тренд) [24–26]. Так как погрешность ВОГ не зависит от периода времени, протекшего с момента включения, то квазислучайная составляющая смещения нуля, при постоянных внешних условиях, представляет собой случайную

константу, которая включает в себя погрешность определения смещения нуля и изменчивость среднего значения от пуска к пуску.

Флуктуационная или случайная составляющая смещения нуля $\tilde{\omega}_0(t)$ представляет собой случайный процесс с заданными статистическими характеристиками, определяющими его свойства. Случайная составляющая смещения нуля описывает изменчивость смещения нуля в пуске и определяет его стабильность. Для описания случайной составляющей смещения нуля зачастую используются марковские процессы, такие как винеровский процесс, экспоненциально-коррелированный процесс первого порядка, либо немарковские, такие как фликкер шум [27].

На рис. 16 показан типичный внешний вид погрешности ВОГ как функции времени.

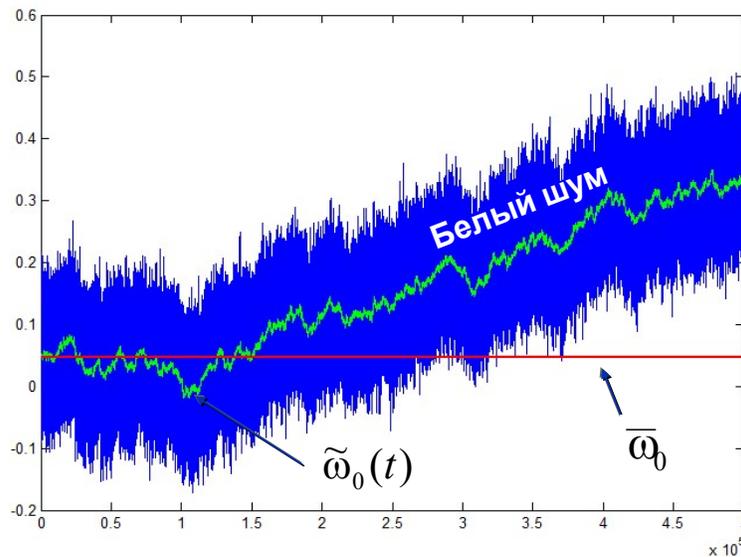


Рис. 16 Внешний вид погрешности ВОГ как функции времени

Суть рассматриваемой в работе задачи идентификации модели погрешностей ВОГ заключается в выявлении ее структуры, то есть определении ее состава в виде набора типовых процессов и оценивании неизвестных параметров, конкретизирующих соответствующие им статистические характеристики. В качестве типовых процессов будем использовать: белый шум (характеризуется интенсивностью ρ^2), случайную константу, винеровский процесс (характеризуется интенсивностью порождающего белого шума q^2), экспоненциально-коррелированный процесс первого порядка (характеризуется дисперсией и интервалом корреляции).

Стационарный белый шум – центрированная случайная последовательность, значения которой в различные моменты времени не коррелированы между собой, а дисперсии для всех моментов времени одинаковы.

Винеровский процесс – нестационарная случайная последовательность, которая представляет собой сумму некоррелированных между собой значений дискретного белого шума от первого до текущего момента времени. Дисперсия такого процесса увеличивается с течением времени.

Экспоненциально-коррелированный процесс – центрированная случайная последовательность с корреляционной функцией вида $k(i-j) = \sigma^2 e^{-\alpha|i-j|}$ (σ^2 – дисперсия процесса, α – величина, обратная интервалу корреляции). Дисперсия такого процесса может носить нестационарный характер (возрастать или убывать), но всегда выходит на установившийся режим.

Основными статистическими характеристиками случайных процессов, наиболее часто используемыми для описания их свойств, являются корреляционная функция и спектральная плотность. Для описания погрешностей навигационных датчиков в настоящее время также часто используется вариация Аллана [28].

Традиционно при решении задачи идентификации модели погрешностей сначала определяются параметры систематической составляющей смещения нуля и ее зависимости от параметров внешней среды. После ее исключения из погрешности определяют структуру и параметры случайной составляющей смещения нуля, оценивают интенсивность белого шума [24; 29].

2.2.1. Алгоритм определения зависимости смещения нуля от внешних факторов

Обычно полагают, что зависимость смещения нуля от внешних факторов представляет собой полином не выше третьего порядка. В этом случае необходимо решить линейную задачу оценивания неизвестных коэффициентов такого полинома. Алгоритм вычисления этих коэффициентов легко получить, используя метод наименьших квадратов, в предположении, что остальные составляющие модели погрешностей (10) трактуются как «погрешности измерения» значений этого полинома [24; 29].

Именно так и поступают при идентификации составляющих модели выходного сигнала ВОГ при калибровке [30]. После исключения из сигнала зависимости от внешних факторов квазислучайная составляющая может быть представлена постоянной систематической ошибкой и получена обычным осреднением значений [29; 31].

2.2.2. Идентификация случайной составляющей смещения нуля на фоне белого шума с использованием спектральной плотности

Напомним, что спектральная плотность (СП) может быть введена для стационарных случайных процессов согласно теореме Винера-Хинчина как преобразование Фурье от корреляционной функции:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} k(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (15)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, $k(\tau)$ – корреляционная функция. СП имеет размерность квадрата единиц измерения (Ед), отнесенного к частоте – [Ед²/Гц]. Для случайной погрешности гироскопа СП может быть представлена, например, как [(°/ч)²/Гц] или [(рад/с)²/Гц]. Часто вместо самой СП используют квадратный корень из нее, который имеет размерность [Ед/√Гц]. Учитывая, что [1/Гц] = [с], при исследовании выходных сигналов гироскопов размерность иногда преобразуют к [°/√ч]. Уровень СП на некоторой частоте ω и называют интенсивностью процесса. СП характеризует распределение мощности процесса по частотам, поэтому иногда ее называют спектральной плотностью мощности. Интеграл по всей частотной области от СП определяет полную энергию. В случае погрешностей гироскопа под “энергией” следует понимать дисперсию погрешности.

Для некоторых нестационарных процессов СП также может быть введена в виде степенной функции $S_y(\omega) = \omega^n$ с положительной или отрицательной целочисленной величиной n . Следует иметь в виду, что эти функции не обладают рядом свойств СП стационарных процессов, в частности, обратные преобразования Фурье от них не являются корреляционными функциями. Такие функции получили наименование условных СП.

В решении задачи идентификации составляющих модели погрешностей с использованием спектральной плотности можно выделить три этапа: получение оценки СП по реализации (массиву выходных данных), определение состава случайной составляющей погрешности с точностью до неизвестных параметров и оценивание этих параметров. Следует еще раз отметить, что по снятой реализации строится не сама СП (15), а ее оценка, которая может значительно отличаться от аналитической СП. В рамках настоящего пособия мы не будем останавливаться на методах построения оценок СП, так как, в целом, они хорошо известны и реализованы во множестве программных пакетов. Отметим лишь, что для построения такой оценки из реализации предварительно должна быть удалена постоянная составляющая.

Далее рассмотрим методы определения типовых процессов с использованием СП и оценивания их параметров. Определение структуры (т.е. типа и числа составляющих) случайных погрешностей заключается в распознавании характерных наклонов и их сочетаний на построенной по выборке СП. При этом графики СП обычно строятся в логарифмических осях, как далее на рисунках 17-18. То есть по осям откладываются логарифмы частоты и соответствующие им логарифмы значений СП. При этом проявляются характерные наклоны.

Например, белый шум по определению обладает постоянной СП на всех частотах и ему соответствуют участки графика с нулевым наклоном (рис. 17). Условная СП винеровского процесса имеет вид $q^2\omega^{-2}$ (q^2 – интенсивность порождающего белого шума), поэтому логарифмический график имеет характерный наклон, пропорциональный $1/(2\pi f)^2$. СП экспоненциально-коррелированного процесса $2\sigma^2\alpha / (\omega^2 + \alpha^2)$ (σ^2 – дисперсия процесса, α – величина, обратная интервалу корреляции), имеет наклон, пропорциональный $1/(2\pi f)^2$, в высокочастотной области и нулевой наклон в низкочастотной области. Следует помнить, что СП суммы некоррелированных процессов равна сумме СП этих процессов. А также то, что $\log(a + b) \approx \log(a)$ при $a \gg b$. Поэтому на логарифмических графиках СП характерные наклоны, соответствующие различным составляющим, появляются в различных частотных областях.

На рис. 17 (кривые 1-3) представлены корни из СП для сумм экспоненциально-коррелированных марковских процессов с белым шумом. Параметры экспоненциально-коррелированных процессов: СКО $\sigma = 1$ [°/ч]; интервалы корреляции 1, 5 и 25 мин. Корень из интенсивности белого шума: $\rho = 0,5$ [(°/ч)/√Гц]. Также на рис. 17 (кривые 4-5) для сравнения приведен пример корня из СП суммы винеровских процессов с аналогичным белым шумом. Корень из интенсивности порождающего шума винеровских процессов: $q = 0,04$ [(°/ч)*√Гц] и $0,15$ [(°/ч)*√Гц]. Обратите внимание, что СП порождающего шума винеровского процесса имеет другую размерность.

Наличие белого шума приводит к появлению участка с нулевым наклоном в высокочастотной области на всех графиках рис. 17. В этой области СП белого шума значительно превышает убывающие с частотой СП экспоненциально-коррелированного и винеровского процессов. Экспоненциально-коррелированный и винеровский процессы проявляют свои характерные наклоны в низкочастотной области. При этом экспоненциально-коррелированные процессы, в отличие от винеровских, имеют еще одну точку перегиба, которая находится на частоте, соответствующей интервалу корреляции этих процессов.

Таким образом, по графику корня из СП можно определить количество и характер составляющих случайной погрешности. Основная сложность распознавания типа процесса при использовании для этих целей выборочных СП обусловлена совпадением характерных наклонов на графике для различных процессов. Поэтому необходимо использовать длительные реализации, чтобы оценки СП в низкочастотной области обладали достаточным спектральным разрешением, что создает основу для корректного определения характерных наклонов и, соответственно, распознавания типа процесса.

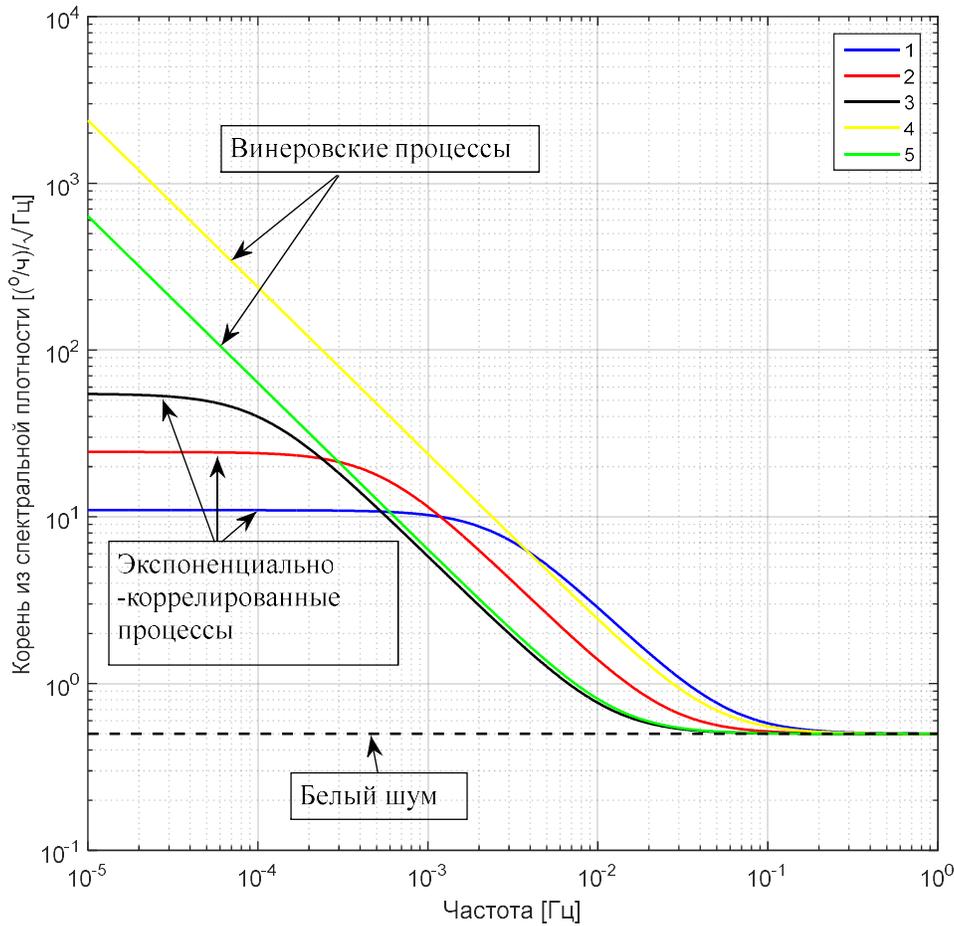


Рис.17 Корень из СП экспоненциально-коррелированного процесса с интервалами корреляции 1 мин. (1), 5 мин. (2), 25 мин. (3) и винеровских процессов с $q = 0,15 [(\text{°}/\text{ч})/\sqrt{\text{Гц}}]$ (4) и $q = 0,2 [(\text{°}/\text{ч})/\sqrt{\text{Гц}}]$ (5) в сумме с белым шумом с $\rho = 0,5 [(\text{°}/\text{ч})/\sqrt{\text{Гц}}]$.

На рис. 18 продемонстрирован алгоритм грубого определения параметров белого шума и винеровского процесса по спектральной плотности реального выходного сигнала ВОГ. Спектральная плотность белого шума постоянна, и его интенсивность определяется средним уровнем участка кривой с нулевым наклоном. Для того чтобы определить интенсивность порождающего шума винеровского процесса, необходимо участок кривой с характерным наклоном (пропорциональным $1/(2\pi f)^2$) в низкочастотной области продолжить до пересечения с линией, соответствующей значению 1 Гц. Значение по оси абсцисс точки пересечения и даст нам искомое значение интенсивности. Ввиду наличия погрешностей оценок спектральной плотности при построении по экспериментальным данным, такой метод является достаточно грубым, однако широко используется на практике ввиду своей простоты. Для преобразования величин измерения необходимо руководствоваться следующим соотношением

$$1 (\text{°}/\text{ч})/\sqrt{\text{Гц}} = 1/60 \text{ °}/\sqrt{\text{ч}}.$$

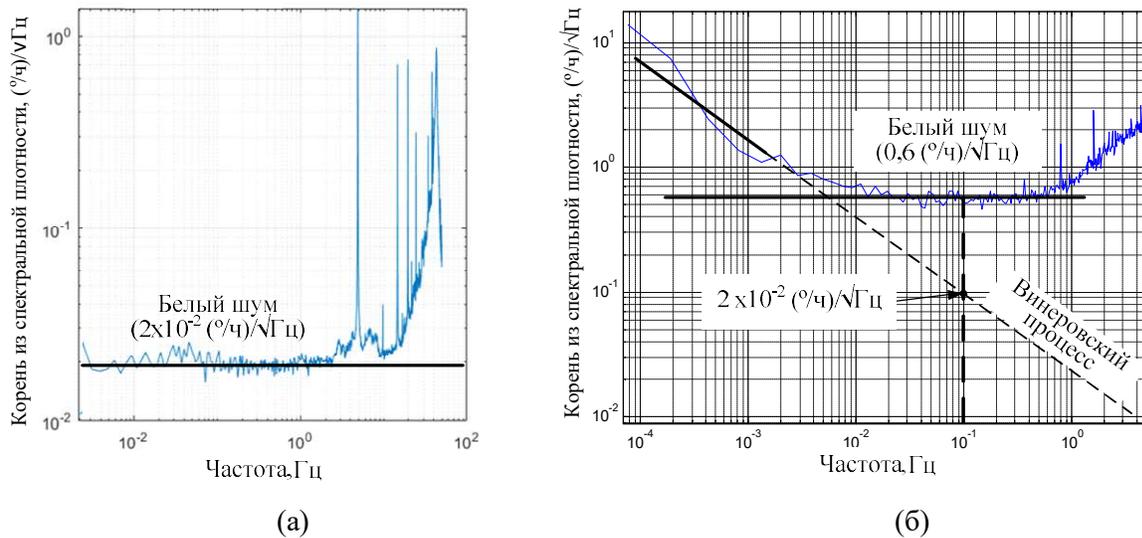


Рис. 18 Пример определения параметров различных составляющих модели погрешностей по спектральной плотности: (а) – винеровский процесс отсутствует; (б) – винеровский процесс присутствует.

2.2.3. Идентификация случайной составляющей смещения нуля на фоне белого шума с использованием вариации Аллана

Для описания погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции, наряду со СП, в настоящее время часто используется вариация Аллана (ВА). ВА в контексте решения задачи описания погрешностей навигационных датчиков определяется в виде:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle \left(\bar{y}_{i+1}(\tau) - \bar{y}_i(\tau) \right)^2 \right\rangle, \quad (16)$$

где $\langle \bullet \rangle$ – знак осреднения по бесконечному времени, то есть

$\langle f(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$, а $\bar{y}_i(\tau)$ – средние значения измеряемой погрешности

$y(t_i)$ на интервале $\tau = [i\tau, (i+1)\tau]$. Корень квадратный из ВА называют девиацией Аллана и также часто используют при описании погрешностей. ВА имеет размерность дисперсии [Ед²] [(°/ч)²], а девиация Аллана соответственно просто [Ед] [(°/ч)]. ВА стационарных процессов может быть получена из СП согласно

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{4}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_y(\omega) \frac{\sin^4(\omega\tau/2)}{\omega^2\tau^2} d\omega. \quad (17)$$

Это соотношение выполняется и для ряда условных СП нестационарных процессов, в частности рассматриваемого здесь винеровского процесса.

Располагая дискретной реализацией погрешности вида $y_i = y(t_i)$, $i = \overline{1 \dots N}$, оценку ВА можно получить, используя соотношения:

$$\tilde{y}_k(\tau) = \tilde{y}_k(m\Delta t) = \frac{1}{m} \sum_{i=(k-1)m+1}^{km} y_i, \quad (18)$$

$$\hat{\sigma}_A^2(\tau) = \hat{\sigma}_A^2(m\Delta t) = \frac{1}{2(L_m - 1)} \sum_{i=1}^{L_m-1} (\tilde{y}_{k+1}(m\Delta t) - \tilde{y}_k(m\Delta t))^2, \quad (19)$$

где $k = \overline{1 \dots L}$, $L_m = N / m$, $m = \overline{1 \dots M}$. Отметим, что соотношения (16)–(19) отличаются от тех, что используются для описания погрешностей стандартов частоты и времени, где для оценки стабильности частоты используются измерения фазы. При оценке погрешностей гироскопов используются прямые измерения этих погрешностей, поэтому используются соотношения (16)–(19). Также оценки вариации ВА в области больших интервалов осреднения имеют значительные погрешности вследствие их малого количества, поэтому при построении оценки ВА, как правило, оставляют $L_m \geq 10$. Отметим, что ВА не чувствительна к постоянной составляющей в отличие от оценки СП.

Алгоритм определения структуры шумов аналогичен алгоритму, применяемому при использовании СП, и основан на анализе характерных наклонов на графиках, построенной по реализации погрешностей оценок ВА или девиации Аллана. Однако следует отметить, что в случае ВА традиционно пользуются структурой погрешности в виде суммы пяти составляющих:

$$\sigma_A^2(\tau) = b^2 \tau^2 / 2 + q^2 \tau / 3 + B^2 2 \ln(2 / \pi) + \rho^2 / \tau + C^2 / \tau^2, \quad (20)$$

где b^2 ; q^2 ; B^2 ; ρ^2 ; C^2 – неизвестные параметры, характеризующие вклад различных составляющих погрешностей датчика, соответствующих линейному тренду, случайному блужданию (винеровскому процессу), фликкер-шуму, белому шуму и шуму квантования. Это удобно, так как составляющие порождают на графике ВА в логарифмическом масштабе пять различных характерных наклонов: +2, +1, 0, –1, –2, по наличию или отсутствию которых определяется наличие или отсутствие соответствующих составляющих. Но чаще всего для анализа используют девиации Аллана, представляющие собой квадратный корень из ВА. Как и для СП, графики девиации Аллана строятся в логарифмическом масштабе, и по тем же причинам различные характерные наклоны проявляются теперь уже на различных интервалах осреднения. В логарифмическом масштабе девиации Аллана будут иметь пять характерных наклонов: +1, +1/2, 0, –1/2, –1 (рис. 19).

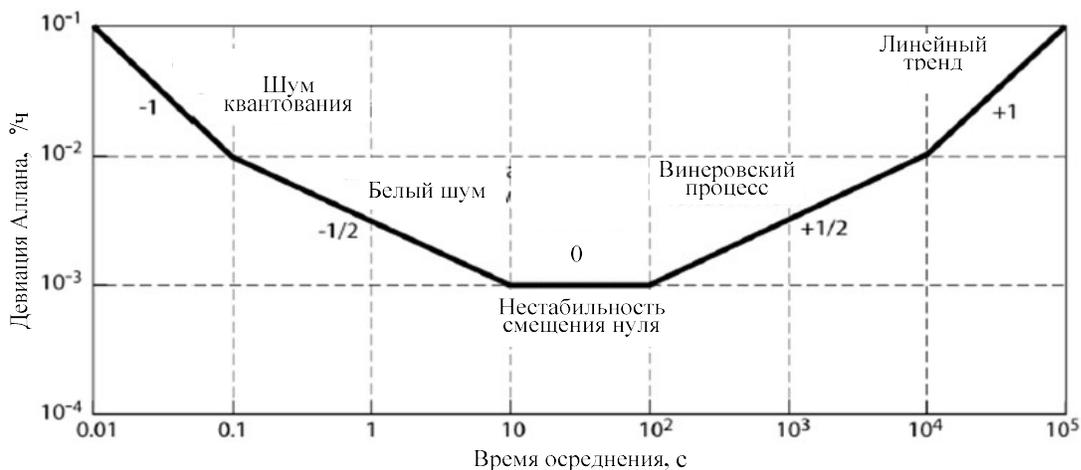


Рис. 19 Характерные наклоны Девияции Аллана

На рис. 20 приведены девиации Аллана для тех же сумм случайных процессов, для которых показаны корни из СП на рис. 17.

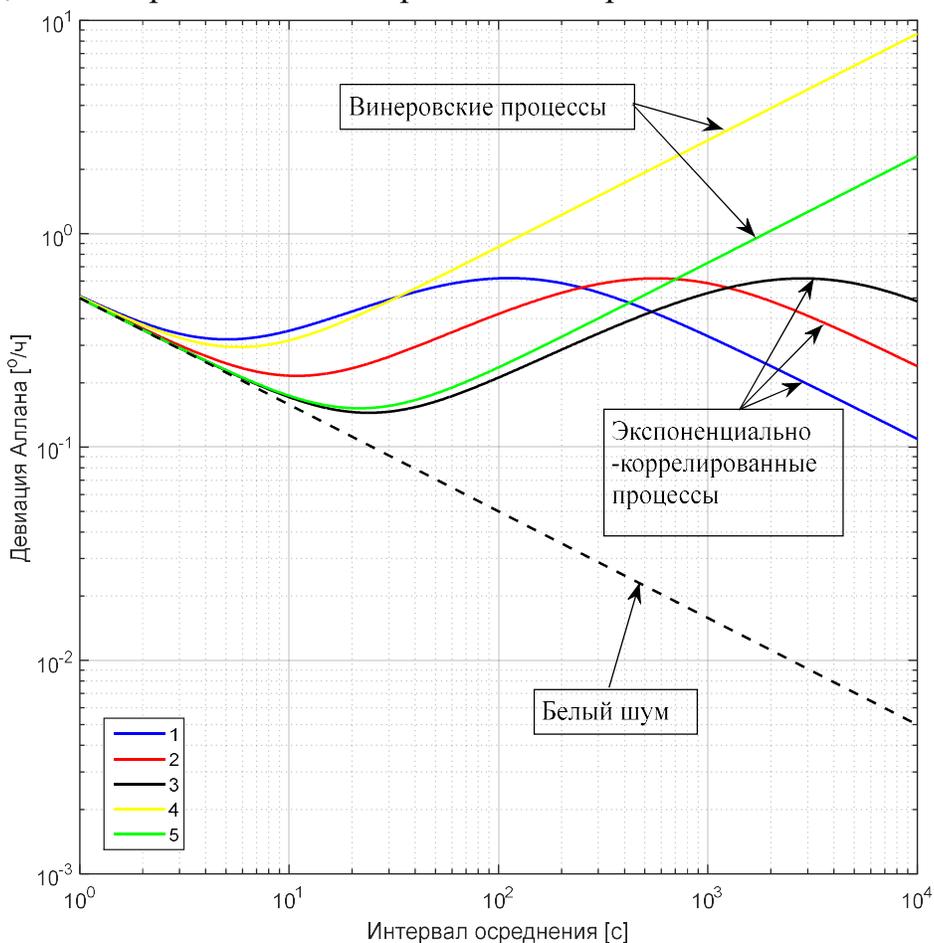


Рис. 20 Девияция Аллана экспоненциально-коррелированных процессов с интервалами корреляции 1 мин (1), 5 мин (2), 25 мин (3) и винеровских процессов $q = 0,15 [(\text{°/ч})/\sqrt{\text{Гц}}]$ (4) и $q = 0,2 [(\text{°/ч})/\sqrt{\text{Гц}}]$ (5) в сумме с белым шумом $\rho = 0,5 [(\text{°/ч})/\sqrt{\text{Гц}}]$.

Белому шуму теперь соответствует характерный наклон $-1/2$ в области малых интервалов осреднения. Винеровскому процессу соответствует характерный наклон $+1/2$. Экспоненциально-коррелированному процессу соответствуют два наклона $+1/2$ и $-1/2$, при этом они частично перекрываются с винеровским процессом. Основные различия для этих двух процессов проявляются в области значительных интервалов осреднения, то есть при построении оценок по длительным реализациям. Обратите внимание, что характерные особенности процессов на графиках СП и ВА проявляются на противоположных концах оси абсцисс. Также отметим, что для правильной и легкой визуальной интерпретации наклонов следует строить графики в логарифмических осях, при этом обязательно, чтобы масштаб по осям был одинаков.

Минимум ВА зачастую (аналогично тому, как это делают при описании стандартов частоты и времени) называют нестабильностью смещения нуля. Можно показать, что минимуму вариации Аллана будут соответствовать оптимальное время осреднения (по оси ординат) для оценки постоянного смещения нуля и дисперсия ошибки такой оценки (по оси абсцисс) [37].

Для определения параметров процессов можно заметить, что значение вариации Аллана, выраженное в $^{\circ}/ч$ (рис. 21) для времени осреднения 1 с, соответствует корню из интенсивности белого шума, выраженному в $^{\circ}/ч/\sqrt{Гц}$. По аналогии с белым шумом для других составляющих могут быть определены параметры шума квантования, значение нестабильности смещения нуля, интенсивность порождающего белого шума винеровского процесса и параметры линейного тренда. Для этого необходимо продолжить линию характерного наклона до пересечения с линией, соответствующей времени осреднения 1 с (рис. 21).

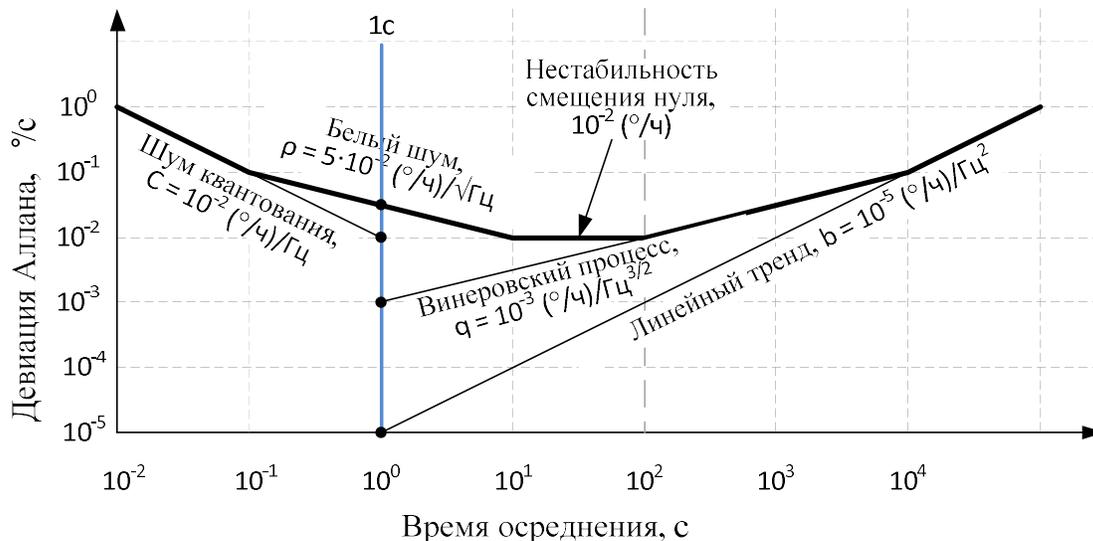


Рис. 21 Пример определения параметров различных составляющих модели погрешностей по Вариации Аллана

На рис. 22 продемонстрирован алгоритм грубого определения параметров белого шума и винеровского процесса по вариации Аллана реального выходного сигнала ВОГ.

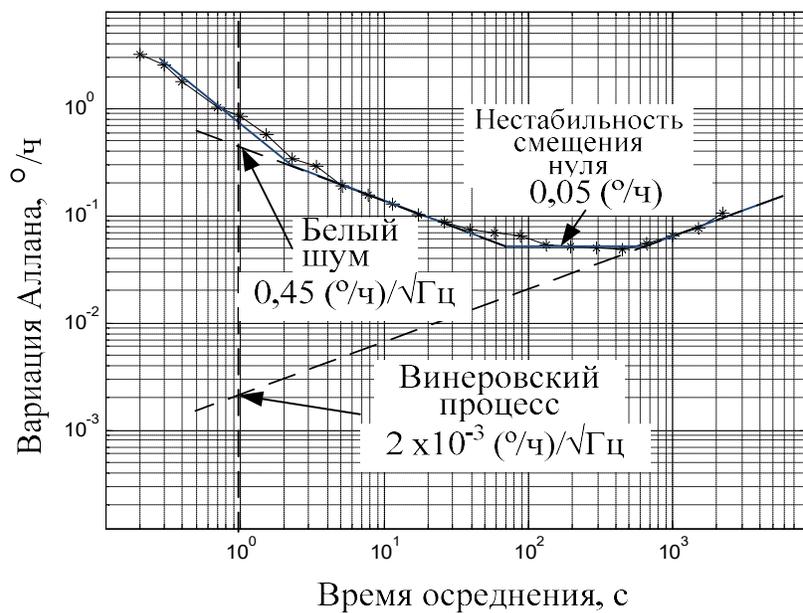


Рис. 22 Пример определения параметров различных составляющих модели погрешностей по Вариации Аллана

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

1. Цель работы

Изучение принципа построения фазовой модуляции в волоконно-оптических гироскопах, построенных по открытой схеме и с обратной связью. Исследование линейности выходной характеристики для двух схем построения с использованием моделей ВОГ, построенных в среде Simulink (MATLAB).

Таблица 4 -

Исходные данные для расчета в зависимости от номера варианта

Величина	Обозначение	Единицы измерения	Значение / номер варианта					
			1	2	3	4	5	6
Длина волокна	L	км	0.3	0.5	0.8	2	2	5
Радиус катушки	R	см	4	8	10	12	20	20
Длина волны источника излучения	λ (λ_a)	нм	830	830	830	1550	1550	1550

Примечание – При расчетах и моделировании все величины должны быть переведены в единицы СИ (м, с, рад/с).

2. Описание используемых имитационных моделей

Волоконно-оптический гироскоп, построенный по открытой схеме.

Внешний вид модели `fog_open_loop.slx`, имитирующей принцип работы построенного по открытой схеме ВОГ, представлен на рисунке 22.

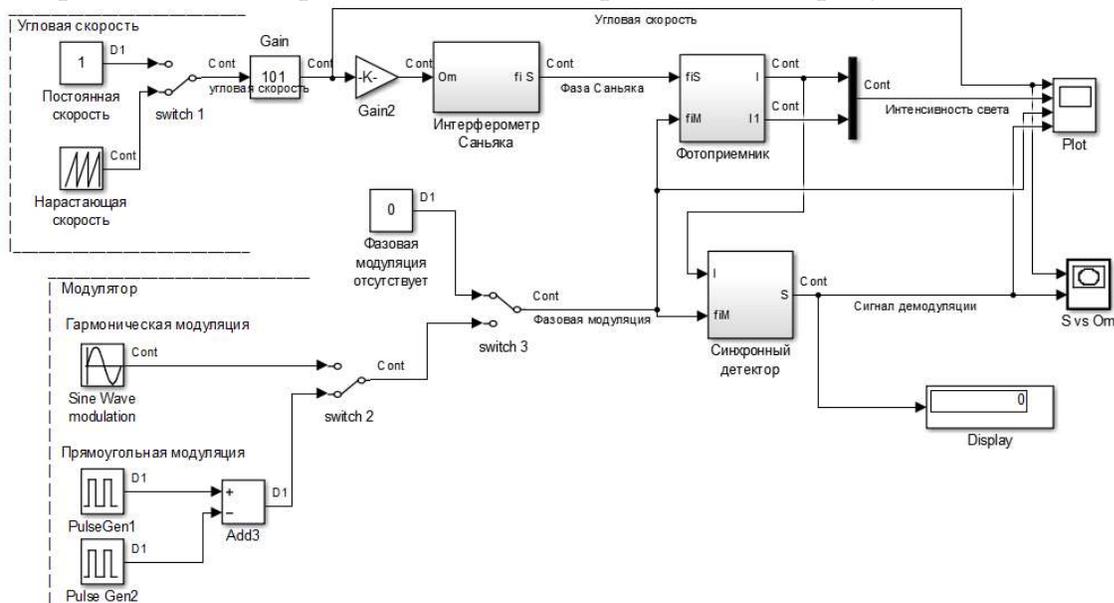


Рисунок 22. Модель волоконно-оптического гироскопа, построенного по открытой схеме.

Модель содержит 8 функциональных блоков.

1. Блок «**Угловая скорость**» задает значение действующей угловой скорости. Предусмотрено два вида воздействия: постоянная угловая скорость и нарастающая по линейному закону. Выбор вида действующей угловой скорости осуществляется переключателем «**Switch 1**» (для смены положения необходимо дважды щелкнуть по нему левой клавишей мыши).

2. Блок «**Модулятор**» формирует сигнал фазовой модуляции по гармоническому или прямоугольному закону. Смена закона фазовой модуляции осуществляется переключателем «**Switch 2**». Для отключения фазовой модуляции необходимо переключатель «**Switch 2**» перевести в верхнее положение, соответствующее выбору блока «**Фазовая модуляция отсутствует**».

3. Блок «**Интерферометр Саньяка**» формирует значение фазы Саньяка, исходя из значения действующей угловой скорости и параметров волоконно-оптической катушки, таких как длина волокна, радиус катушки, длина волны источника излучения.

4. Блок «**Фотоприемник**» формирует значение интенсивности интерференционной картины встречных волн в зависимости от сдвига фаз, вызванного действующей угловой скоростью и модулирующим сигналом.

5. Блок «**Синхронный детектор**» выделяет полезный сигнал (сигнал демодуляции), пропорциональный действующей угловой скорости, и производит сглаживание.

6. Осциллограф «**I vs f_i** » строит зависимость интенсивности интерференционной картины встречных волн на фотоприемнике от суммарного сдвига фаз, вызванного действующей угловой скоростью и фазовой модуляцией. Появляется сразу после запуска программы.

7. Осциллограф «**S vs Ω_m** » строит зависимость сигнала демодуляции от действующей угловой скорости. Появляется сразу после запуска программы.

8. Фигура «**Plot**» строит на одном графике действующую угловую скорость, интенсивность на фотоприемнике, сигнал фазовой модуляции и сигнал демодуляции, который в ВОГ, построенном по открытой схеме, является полезным выходным сигналом.

Волоконно-оптический гироскоп, построенный по схеме с обратной связью.

Внешний вид модели **fog_closed_loop.slx**, имитирующей принцип работы построенного по схеме с обратной связью ВОГ, представлен на рисунке 23.

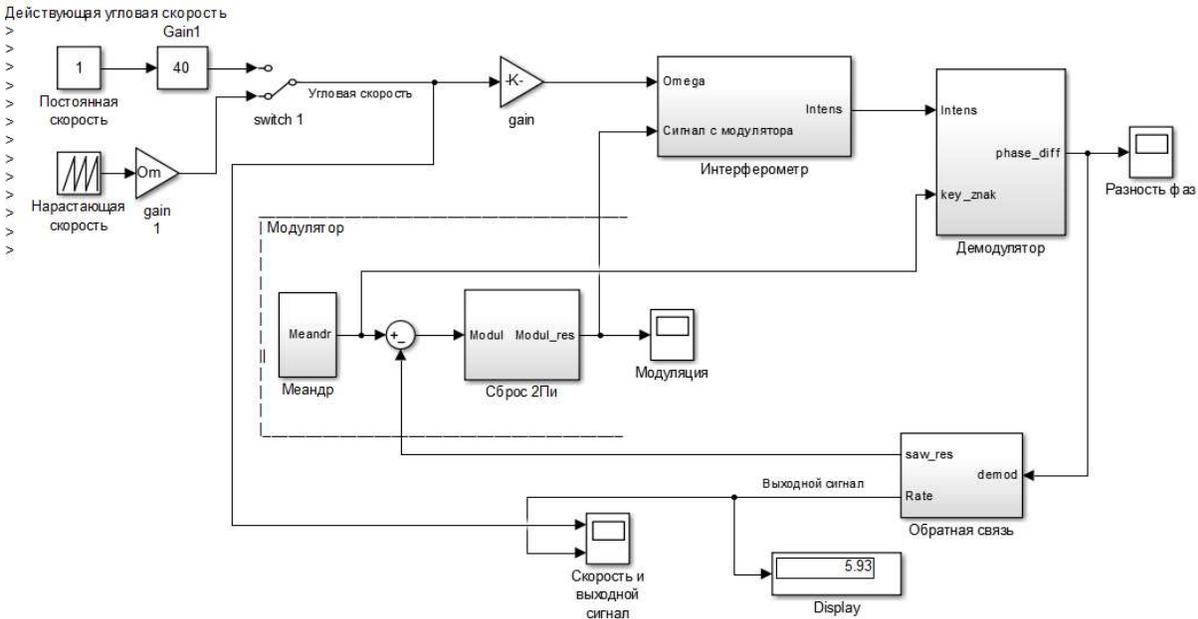


Рисунок 23. Модель волоконно-оптического гироскопа, построенного по схеме с обратной связью.

Модель содержит 6 функциональных блоков.

1. Блок «**Угловая скорость**» задает значение действующей угловой скорости. Предусмотрено два вида воздействия: постоянная угловая скорость и нарастающая по линейному закону. Выбор вида действующей угловой скорости осуществляется переключателем «**Switch 1**».

2. Блок «**Модулятор**» формирует сигнал фазовой модуляции по прямоугольному закону (меандр) с учетом сигнала обратной связи.

3. Блок «**Интерферометр**» формирует значение фазы Саньяка, исходя из значения действующей угловой скорости и параметров волоконно-оптической катушки, таких как длина волокна, радиус катушки, длина волны источника излучения. Кроме того, в этом блоке вырабатывается значение интенсивности интерференционной картины встречных волн в зависимости от суммарного сдвига фаз, вызванного угловой скоростью и фазовой модуляцией.

4. Блок «**Демодулятор**» выделяет сигнал, пропорциональный сдвигу фазы Саньяка.

5. Блок «**Обратная связь**», который формирует сигнал обратной связи, равный сдвигу фазы Саньяка с обратным знаком. Сигнал обратной связи в ВОГ, построенном по схеме с обратной связью, является полезным выходным сигналом.

6. Фигура «**Скорость и выходной сигнал**» строит на одном графике действующую угловую скорость и выходной сигнал.

Перед началом работы модель необходимо настроить, для чего необходимо открыть файл **init3.m**, заполнить в соответствии с выданным вариантом и запустить на выполнение, нажав F5.

3. Порядок выполнения работы

1. Расчет параметров ВОГ.

1.1 Рассчитайте для ВОГ, с приведенными в таблице 4 параметрами катушки и источника излучения (в зависимости от варианта), значения следующих величин:

- масштабный коэффициент (коэффициент пропорциональности между сдвигом фазы Саньяка φ_s и измеряемой угловой скоростью Ω);
- диапазон измеряемых угловых скоростей $\Omega_{\pi/2}$ в $^\circ/\text{с}$ (соответствует сдвигу фазы Саньяка $\pi/2$);
- частоту фазовой модуляции f_m .

2. Изучение принципа действия ВОГ, построенного по открытой схеме

2.1 Откройте модель **fog_open_loop.slx**.

2.2 Откройте блок «**Катушка**», заполните значения длины волокна (L), радиуса катушки (R) и длины волны источника излучения (La) в зависимости от варианта. Значения всех величин предварительно должны быть переведены в единицы СИ.

2.3 В блоках задания угловой скорости (значение усилителя «**Gain**») и построения выходной характеристики ВОГ «**S vs Om**» (значения x-min и x-max) задайте диапазон измеряемых угловых скоростей $\pm(\Omega_{\pi/2})$, используя рассчитанное в п.1 значение $\Omega_{\pi/2}$.

2.4 Убедитесь, что фазовая модуляция выключена (переключатель «**Switch 3**» находится в верхнем положении) и включен режим задания нарастающей угловой скорости (переключатель «**Switch 1**» находится в нижнем положении). Запустите моделирование, нажав F5.

2.5 Дождитесь окончания моделирования. Откройте фигуру «**I vs fi**» и наблюдайте зависимость интенсивности света на фотоприемнике от сдвига фаз, вызванного действующей угловой скоростью. Внесите график в отчет.

2.6 Включите фазовую модуляцию ВОГ по прямоугольному закону, для этого переведите переключатели «**switch 2**» и «**switch 3**» в нижнее положение. Запустите моделирование.

2.7 Дождитесь окончания моделирования. Откройте фигуры «**I vs fi**» и «**S vs Om**», наблюдайте зависимость интенсивности света на фотоприемнике от сдвига фаз, вызванного действующей угловой скоростью и модуляцией, а также зависимость сигнала демодуляции от действующей угловой скорости. Внесите второй график в отчет.

2.8 Включите фазовую модуляцию ВОГ по гармоническому закону, для этого переведите переключатели «**switch 2**» в верхнее положение, а «**switch 3**» - в нижнее. Запустите моделирование.

2.9 Дождитесь окончания моделирования. Откройте фигуры «**I vs fi**» и «**S vs Om**», наблюдайте зависимость интенсивности света на фотоприемнике от сдвига фаз, вызванного действующей угловой скоростью и модуляцией, а также зависимость сигнала демодуляции от действующей угловой скорости. Внесите второй график в отчет.

2.10 Сравните и проанализируйте зависимость выходного сигнала ВОГ (сигнала демодуляции) от действующей угловой скорости при различных видах модуляции: прямоугольной и гармонической. Опишите их преимущества и недостатки.

3. Исследование линейности выходной характеристики ВОГ, построенного по открытой схеме

3.1 Включите фазовую модуляцию ВОГ по прямоугольному закону, для этого переведите переключатели «**switch 2**» и «**switch 3**» в нижнее положение. Увеличьте время моделирования до 600 секунд.

3.2 Включите режим задания постоянной угловой скорости (переключатель «**switch 1**» находится в верхнем положении). Запустите моделирование.

3.3 Откройте слайдер «**Gain**» и установите последовательно значения угловой скорости от $-\Omega_{\pi/2}$ до $+\Omega_{\pi/2}$ с шагом $\Omega_{\pi/2}/5$ (всего должно получиться 10 значений, при скорости, равной нулю, показания снимать не нужно), при этом фиксируйте значение выходного сигнала ВОГ (сигнала демодуляции) на дисплее «**Display**». Занесите полученные значения в таблицу.

3.4 Рассчитайте для каждой угловой скорости масштабный коэффициент (МК) как отношение значений сигнала демодуляции к угловой скорости. Занесите полученные значения в таблицу.

3.5 Рассчитайте нелинейность выходной характеристики ВОГ как отношение разницы максимального и минимального МК к среднему значению, выраженное в процентах.

3.6 Найдите такое значение границ диапазона угловой скорости, при котором нелинейность выходной характеристики ВОГ не будет превышать 30 %.

4. Изучение принципа действия ВОГ, построенного по схеме с обратной связью

4.1 Откройте файл **init3.m**. Заполните значения длины волокна (L), радиуса катушки (R) и длины волны источника излучения (L_a) в зависимости от варианта, а также диапазон измеряемых угловых скоростей ($Om = \Omega_{\pi/2}$), используя рассчитанное в п.1 значение Ω_l . Загрузите значения переменных в рабочую область, нажав F5.

4.2 Откройте модель **fog_closed_loop.slx**. Включите режим задания нарастающей угловой скорости (переключатель «**switch 1**» находится в нижнем положении). Запустите моделирование. Откройте фигуру «**Скорость и выходной**

сигнал» и наблюдайте изменение угловой скорости и выходного сигнала ВОГ. Обратите внимание, что действующая скорость превышает диапазон, рассчитанный в п. 1. Проанализируйте зависимость выходного сигнала ВОГ (сигнала обратной связи) от действующей угловой скорости как внутри рабочего диапазона скоростей, так и за его пределами. Внесите график в отчет.

5. Исследование линейности выходной характеристики ВОГ, построенного по схеме с обратной связью

5.1 Включите режим задания постоянной угловой скорости (переключатель «**switch 1**» находится в верхнем положении). Запустите моделирование.

5.2 Откройте слайдер «**Gain**» и установите последовательно значения угловой скорости от $-\Omega_{\pi/2}$ до $+\Omega_{\pi/2}$ с шагом $\Omega_{\pi/2}/5$ (всего должно получиться 10 значений, при скорости, равной нулю, показания снимать не нужно), при этом фиксируйте значение выходного сигнала ВОГ (сигнала обратной связи) на дисплее «**Display**». Занесите полученные значения в таблицу. Постройте график зависимости выходного сигнала от действующей угловой скорости.

5.3 Рассчитайте для каждой угловой скорости масштабный коэффициент (МК) как отношение значений сигнала демодуляции к угловой скорости. Занесите полученные значения в таблицу.

5.4 Рассчитайте нелинейность выходной характеристики ВОГ как отношение разницы максимального и минимального МК к среднему значению, выраженное в процентах. Проанализируйте полученные результаты.

4. Содержание отчета

- Краткое описание цели и содержания лабораторной работы.
- Расчет параметров ВОГ.
- Графики зависимости выходного сигнала ВОГ при различных видах модуляции и схемах построения.
- Таблицы, составленные для разных значений угловых скоростей, и рассчитанные значения масштабных коэффициентов и нелинейности выходной характеристики.
- Анализ полученных результатов и выводы.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

1. Цель работы

Исследование выходной характеристики ВОГ, построенного по открытой схеме и с обратной связью. Идентификация составляющих модели погрешностей ВОГ. Сравнение количественных значений составляющих модели погрешностей для ВОГ различных классов точности и при разных условиях:

- Постоянная температура;
- Изменение температуры на 10°C.

Приобретение навыков обработки выходных сигналов гироскопов в среде MATLAB на примере ВОГ.

Примечание – В ходе данной работы рассматриваются показания ВОГ на неподвижном основании, и вклад мультипликативных составляющих модели погрешностей считается пренебрежимо малым.

Таблица 5 -

Используемые файлы с выходными данными ВОГ в зависимости от номера варианта

Вариант	Файл с данными для ВОГ1	Файл с данными для ВОГ2
1	FOG1_1.mat	FOG2_1.mat
2	FOG1_2.mat	FOG2_2.mat
3	FOG1_3.mat	FOG2_3.mat
4	FOG1_4.mat	FOG2_4.mat
5	FOG1_5.mat	FOG2_5.mat
6	FOG1_6.mat	FOG2_6.mat

2. Перечень используемых функций

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться в MATLAB с описанием работы следующих функций: load, plot, polifit, loglog.

3. Порядок выполнения работы

1 Исследование выходного сигнала ВОГ1 при постоянной температуре

1.1 Запустите MATLAB. Установите папку, содержащую программы обработки и файлы с входными данными, в качестве рабочей.

1.2 Загрузите файл с исходными данными для ВОГ1 в соответствии с вариантом в рабочую область. Для этого воспользуйтесь стандартной функцией **load**.

```
load('FOG1_1.mat');
```

При этом в рабочую область загрузятся следующие переменные: **f** – частота съема данных ВОГ1, [Гц]; **t** – время, [с]; **Y1** – выходной сигнал ВОГ1 при постоянной температуре, [°/ч]; **Y2** – выходной сигнал ВОГ1 при линейно изменяющейся на 10°С температуре, [°/ч]; **T1** и **T2** – температура, [°С].

1.3 Используя функцию **plot**, постройте выходной сигнал ВОГ1 при постоянной температуре **Y1** как функцию времени **t**.

```
figure
plot(t,Y1);grid
title(['Выходной сигнал ВОГ1 при постоянной температуре'])
xlabel('Время, с')
ylabel('Выходной сигнал, ^о/ч')
```

Наблюдайте выходной сигнал ВОГ. Аналогичным образом постройте график изменения температуры **T1**. Внесите полученные графики в отчет.

1.4 Определение систематической составляющей смещения нуля.

Используя функцию **polyfit**, определите коэффициенты полинома 2ой степени, аппроксимирующего зависимость выходного сигнала ВОГ1 **Y1** от значения температуры **T1**.

```
p = polyfit(T1,Y1,2);
```

Переменная **p** в данном случае возвращает значения коэффициентов полинома, причем первое значение будет соответствовать коэффициенту при наивысшей степени **T**, а последнее при нулевой степени, он-то и будет определять величину систематической составляющей смещения нуля. Зафиксируйте полученное значение.

1.5 Исключите из выходного сигнала ВОГ1 значение систематической составляющей смещение нуля и постройте график спектральной плотности, воспользовавшись функцией **SmSp** (рассчитывает значение спектральной плотности) и **loglog** (строит график в логарифмическом масштабе).

```
fsG=SpSm(Y1-p(3),1/f,1);
figure
loglog(fsG(:,1),fsG(:,2));grid
title(['Спектральная плотность'])
ylabel('ВОГ, ^о/ч/(Гц)^1/^2')
xlabel('Частота, Гц')
```

Наблюдайте график спектральной плотности. Внесите полученный график в отчет.

1.6 Проанализируйте, каким типовым процессом представлена случайная составляющая смещения нуля: винеровский процесс или экспоненциально-коррелированный процесс первого порядка. Если это винеровский процесс, оцените интенсивность порождающего его шума. Зафиксируйте полученное значение.

1.7 Оцените по графику интенсивность белозумной составляющей. Зафиксируйте полученное значение.

1.8 Постройте график вариации Аллана для выходного сигнала ВОГ1 за вычетом систематической составляющей. Для этого откройте программу **ADISacc_allan.m** и настройте файл в соответствии с вариантом для ВОГ1 при постоянной температуре.

```
name0='FOG1_1.mat';  
  
load(name0);  
  
dt = 1/f; %частота дискретизации  
  
Y = [Y1]; %определение нужного массива
```

Запустите программу, нажав F5. Наблюдайте график вариации Аллана. Внесите полученный график в отчет.

1.9 Проанализируйте, каким типовым процессом представлена случайная составляющая смещения нуля: винеровский процесс или экспоненциально-коррелированный процесс первого порядка. Если это винеровский процесс, оцените интенсивность порождающего его шума. Зафиксируйте полученное значение. Оцените по графику интенсивность белозумной составляющей. Зафиксируйте полученное значение.

1.10 Оцените по графику нестабильность смещения нуля. Зафиксируйте полученное значение.

2 Исследование выходного сигнала ВОГ1 при изменяющейся по линейному закону температуре

2.1 Повторите п.п.1.3 – 1.4 для выходного сигнала ВОГ1 **Y2** при переменной температуре **T2**. Проанализируйте влияние температуры на выходной сигнал ВОГ1.

2.3 Исключите из выходного сигнала ВОГ1 **Y2** значение систематической составляющей (смещение нуля и зависимость от температуры **T2**).

```
Y2-r(3)-r(2)*T2-r(1)*T2.^2;
```

Постройте графики спектральной плотности и вариации Аллана и проведите идентификацию случайной и белозумной составляющих аналогично п.п. 1.5 – 1.10.

2.4 Сформируйте в отчете таблицу со значениями оцененных параметров модели погрешностей ВОГ1. Таблица должна содержать: значение систематической составляющей смещения нуля, интенсивности порождающего шума винеровского процесса (при его наличии), интенсивность белозумной составляющей, нестабильность смещения нуля. Все эти величины должны быть рассчитаны для постоянной и переменной температуры с помощью как графиков спектральной плотности, так и вариации Аллана. Проанализируйте полученные результаты. Как влияет изменение температуры на перечисленные выше характеристики выходного сигнала ВОГ1?

2.5 Определите, к какому классу точности относится ВОГ1.

3 Исследование выходного сигнала ВОГ2

3.1 Прodelайте по аналогии процедуру идентификации составляющих модели погрешностей ВОГ2 в соответствии с п.п. 1-2.

4. Содержание отчета

- Цель работы
- Графики внешнего вида выходного сигнала, спектральной плотности его шума, вариации Аллана для каждого ВОГ при постоянной и изменяющейся температуре
- Таблицы, в которые сведены значения систематического смещения нуля, интенсивности порождающего шума винеровского процесса, интенсивность бел шумной составляющей (рассчитанных как по спектральной плотности, так и по вариации Аллана), нестабильности смещения нуля для каждого ВОГ при постоянной и изменяющейся температуре
- Анализ данных таблиц, к какому классу точности можно отнести ВОГ1 и ВОГ2 при постоянной и изменяющейся температуре.
- Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое место на рынке современных гироскопических датчиков занимают ВОГ?
2. Чем отличается свободный гироскоп от датчика угловой скорости?
3. Какими преимуществами обладает ВОГ по сравнению с лазерными и микромеханическими гироскопами?
4. Назовите несколько представителей производителей волоконно-оптических гироскопов.
5. Поясните суть эффекта Саньяка.
6. Что является чувствительным элементом волоконно-оптического гироскопа?
7. Каким образом решается проблема малой чувствительности ВОГ в области малых скоростей вращения?
8. Почему в ВОГ не используются невзаимные элементы?
9. Из каких соображений выбирается частота модуляции фазы во взаимном элементе?
10. Чем определяется нелинейность выходной характеристики ВОГ?
11. В чем смысл обратной связи в ВОГ?
12. Какие величины являются выходным сигналом в ВОГ, построенных по открытой схеме и схеме с обратной связью?
13. Назовите основные составляющие модели погрешностей ВОГ.
14. Чем отличается систематическая составляющая смещения нуля от случайной? Каков характер их изменчивости во времени?
15. Какие типовые случайные процессы могут быть использованы для описания случайной составляющей смещения нуля?
16. Поясните смысл вариации Аллана.
17. Какой наклон на графике вариации Аллана имеет белый шум, а какой на графике спектральной плотности?
18. Как влияет температура на выходной сигнал ВОГ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Учебное пособие для вузов./ Под ред. д.т.н. В.Я. Распопова. – СПб.:ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
2. Прикладная теория гироскопов / Д.П.Лукьянов, В.Я. Распопов, Ю.В. Филатов.- СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ «Электроприбор», 2015.- 316 с.
3. Новожилов И.В. (ред.) Сборники научно-нормативной терминологии. Выпуск 118. Гироскопия. Терминология. Комитет научной терминологии в области фундаментальных наук Российской Академии наук. — М.: Институт проблем передачи информации, 1994. — 38 с.
4. Girardin G. High End Inertial Systems Market Overview / 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) September 19-20, 2017, Karlsruhe, Germany: proceedings.
5. Филатов Ю.В. Волоконно-оптический гироскоп: Учебн. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 63 с.
6. Lefèvre H.C. The fiber-optic gyroscope : The Artech House applied photonics series. – Second edition. – Boston: Artech House, 2014. – 391 с.
7. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement And Perspective // Proceedings of 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2012. С.122-126.
8. Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация - 2017. - Т. 25. - № 3(98). - С. 78–85.
9. Великосельцев А. А., Филатов Ю. В. Волоконно-оптические технологии в навигационных системах: Учеб. по собие. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 64 с.
10. Пешехонов В. Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 3-10.
11. Патюрель, И. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе ВОГ / И. Патюрель [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 3 (82). – С. 3–13.

12. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
13. Электронный ресурс <https://www.fizoptika.ru/> (Дата обращения 13.11.2020).
14. Napoli J. 20 years of KVH fiber optic gyro technology: the evolution from large, low performance FOGs to compact, precise FOGs and FOG-based inertial systems / J. Napoli // SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging / ред. E. Udd, G. Pickrell, H.H. Du. – Baltimore, Maryland, United States, 2016. – 20 years of KVH fiber optic gyro technology. – С. 98520A.
15. Deppe O., Dorner G., König S., Martin T., Voigt S., Zimmermann S. MEMS and FOG Technologies for Tactical and Navigation Grade Inertial Sensors—Recent Improvements and Comparison//Sensors, 2017, Vol. 17, No. 3, P. 567.
16. Untilov A.A., Egorov D.A., Rupasov A.V., Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia, Novikov R.L., Neforosnyi S.T., Azbeleva A.P., Dranitsyna E.V. Results of fiber-optic gyro testing//Giroskopiya i Navigatsiya, 2017, Т. 25, N 3, С. 78-85.
17. Драницына Е.В. Калибровка измерительного модуля прецизионной БИНС на волоконно-оптических гироскопах / Дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2016.- 89 с.
18. IEEE Std 1559 –2009, IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology.
19. Markley F.L., Crassidis J.L. Fundamentals of spacecraft attitude determination and control : Space technology library. – New York: Springer, 2014. – Вып. 33. – 486 с.
20. Драницына, Е.В. Модель погрешностей волоконно-оптического гироскопа / Е.В. Драницына, Н.Г. Галиева, А.А. Павлов // Материалы XVII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2015. – С.342–348.
21. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. - СПб: Университет ИТМО, 2017. - 196 с.
22. Джашитов, В.Э. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов; под ред. В.Г. Пешехонова. – СПб: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – 150 с.
23. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов./ Под общей ред. академика РАН В.Г.Пешехонова. Изд. 2-е, переработанное и дополненное.- СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. -390 с.

24. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis. : IEEE Aerospace and Electronic Systems Society / рук. IEEE Std. 1554-2005, 2005.
25. Емельянцев Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. – Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – 235 с.
26. Matasov A.I., Akimov P.A. Estimation of Biases in Gyro Drifts by Means of 11-norm Approximation.//IFAC Proceedings Volumes, 2012, Т. 45, N 13, С. 442-447.
27. Моторин А.В. Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации / Дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2017.- 135 с.
28. N. El-Sheimy, H. Hou, and X. Niu, “Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 57, no. 1, pp. 140–149, 2008.
29. ГОСТ Р ИСО 5725-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Введ. 01.11.2002. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002.
30. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»: 2013.
31. ГОСТ Р 8.563-2009 Методики (методы) измерений. Введ. 15.04.2010. – Москва: Стандартинформ, 2009.
32. Allan D.W. Statistics of Atomic Frequency Standards//Proceedings of the IEEE, 1966, Т. 54, N 2, С. 221-230.
33. Lawrence C.N., Darryll J.P. Characterization of Ring Laser Gyro Performance Using the Allan Variance Method//Journal of Guidance Control, and Dynamics, 1997, Т. 20, N 1, С. 211-214.
34. Сирая Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения//Гироскопия и навигация, 2010, Т. 69, N 2, С. 29-36.
35. Кучерков С.Г., Лычев Д.И., Скалон А.И., Чектков Л.А. Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханического гироскопа//Гироскопия и навигация, 2003, N 2 (41), С. 98-104.

36. Кутовой В.М., Кутовой Д.А., Перепелкина С.Ю., Федотов А.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы / В.М. Кутовой и др. // Материалы XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С. 229-233.

37. Моторин А. В., Степанов О.А., Челпанов И. Б. О точности оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связи с вариацией Аллана / XXII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. Материалы круглого стола «Методы определения характеристик погрешностей навигационных датчиков», 2015, pp. 485–491.

38. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

Драницына Елена Викторовна
Моторин Андрей Владимирович

**Методические указания по выполнению
лабораторных работ "Исследование выходных сигналов
волоконно-оптических гироскопов"**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А