

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Системы автоматического управления»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

Шаршин Д.Н.

_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

Ширяев В.И.

_____ 2017 г.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО
ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА В РЕЖИМЕ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 24.04.02.2017.469.00 ПЗ ВКР

Консультант

к.т.н, профессор

_____ Г.А. Левина

_____ 2017 г.

Руководитель работы

инженер-конструктор 3 категории

_____ А.В. Светлаков

_____ 2017 г.

Автор работы

Студент группы КЭ-279

_____ А.К. Уманская

_____ 2017 г.

Нормоконтролер

к.т.н., доцент

_____ В.В. Седышев

_____ 2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ.....	10
2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТВГ.....	13
3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ШУМОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТВГ ПО МЕТОДУ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА.....	36
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	60

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) – прибор, который по принципу действия и применению в системах ориентации и навигации подразделяется на ТВГ, работающие в режиме датчика угла и ТВГ, работающие в режиме датчика угловой скорости. Твердотельный волновой гироскоп является одним из наиболее перспективных приборов с точки зрения соотношения себестоимости изготовления и точности получаемой информации [1]. При достаточно хорошей точности себестоимость ниже, чем у приборов с такой же точностью. Принцип работы прибора построен на использовании инерционных свойств упругих волн в твердом теле.

Особенностью ТВГ является его конструкция, в которой чувствительный элемент является упругим телом в виде полусферической оболочки, совершающей упругие колебания. Чувствительный элемент имеет малый вес и габариты. ТВГ не имеет в своем составе вращающихся частей и элементов, которые могут выйти из строя при больших амплитудах колебаний [2].

Твердотельный волной гироскоп обладает рядом преимуществ:

- высокая точность;
- малое потребление мощности;
- конструктивная простота механических узлов;
- минимальное, по сравнению с аналогами, время готовности;
- широкий диапазон рабочих температур;
- высокая устойчивость к механическим воздействиям (линейные перегрузки, вибрационные и ударные воздействия), а так же к прерыванию подачи электропитания;
- длительный срок службы.

Помимо преимуществ ТВГ имеет и ряд недостатков:

- сложность изготовления полусферических резонаторов и металлизация их поверхностей;

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

– сложность обеспечения соосности между резонатором и системами съема/возбуждения;

– сложность балансировки резонатора;

– сложность устранения погрешностей.

Применение ТВГ позволяет решать задачи повышения точности, надежности, виброустойчивости, ударопрочности, обеспечения возможности работы в условиях повышенного радиационного фона. Обладая рядом преимуществ, недоступных другим приборам – механическим, лазерным и волоконно–оптическим гироскопам, во многих случаях для решения задач управления и навигации применение ТВГ является приоритетным. Прибор применяется как в военной, так и в гражданской сферах: нефтедобыча, системы контроля качества автомобильных и железных дорог, управление космическими аппаратами и другие.

Твердотельный волновой гироскоп в режиме датчика угловой скорости, имеет погрешности различной природы возникновения. В ряде работ отмечается, что на достоверность оценки самой измеряемой величины существенно влияют структура и характер шумовых составляющих в канале измерения [3]. Известно несколько методов исследования случайных процессов, среди них метод выборочной дисперсии, спектральной плотности и метод вариации Аллана. Первые два не всегда позволяют идентифицировать источник погрешностей и их количественный вклад в общую статистику шума, именно поэтому для решения подобных задач рекомендуется использовать метод вариации Аллана. [4]

Метод вариации Аллана – это метод анализа временных последовательностей для определения характеристик шумов как функций усредненного времени. Метод, изначально разработанный для оценки нестабильности часов в спутниковых навигационных системах, с успехом применяется с целью анализа шума для других систем.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Вариация Аллана позволяет оценить стабильность показаний различных приборов и устройств, в том числе и для ТВГ в режиме датчика угловой скорости (ДУС).

Целью выпускной квалификационной работы является разработка программного обеспечения расчета вариации Аллана на основе результатов измерений для получения численных оценок шумовых составляющих твердотельного волнового гироскопа в режиме датчика угловой скорости разработки предприятия АО «ИЭМЗ «Купол».

Для достижения поставленной цели требуется выполнить **следующие задачи:**

- 1) получить выходные данные прибора на испытательном стенде;
- 2) разработать программное обеспечение для расчета вариации Аллана на ПЭВМ;
- 3) произвести расчет вариации Аллана и аппроксимацию кривой отклонения Аллана;
- 4) выполнить анализ численных результатов, полученных после аппроксимации кривой отклонения Аллана, сформулировать выводы о шумовом спектре измерительной информации ТВГ в режиме ДУС;
- 5) организован графический пользовательский интерфейс.

Поставленная цель работы и сформулированные задачи соответствуют направленности работ по разработке ТВГ на предприятии.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ

Изучение метода вариации Аллана и его применения опирается на ряд научных статей, в которых дано описание методики для определения шумовых составляющих выходных сигналов различных гироскопических приборов. Далее приводится краткий обзор работ, наиболее близких к теме данной работы.

В статье Д.А. Кутового и П.В. Ситникова (ФГУП «НПО Автоматики», г. Екатеринбург)[4] дано описание использования вариации Аллана для исследования бесплатформенного инерциального блока (БИБ) на базе маятниковых акселерометров и волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). В работе приведены оценки шумовых составляющих выходных сигналов измерителей на примере обработки данных одного маятникового акселерометра и одного волоконно-оптического гироскопа в трех запусках с проведением сравнения с паспортными характеристиками. Авторы приходят к выводу, что метод вариации Аллана является эффективным способом идентификации шумов в канале измерения.

В статье Кутового Д.А., С.Ю. Перепелкиной, Федотова А.А. («НПО Автоматики» г. Екатеринбург) [5] приведена методика оценки шумовых составляющих в измерительной информации инерциальных датчиков на основе метода вариации Аллана, где в основе методики взят способ аппроксимации кривой вариации Аллана посредством многопараметрической оптимизации, в отличие от применения метода наименьших квадратов в работе [4]. В статье приведены результаты расчетов по новой методике для бесплатформенного инерциального блока (БИБ). Проведены сравнительные оценки полученных данных прежнего и нового методов с характеристиками, заявленными разработчиком БИБ. Полученные результаты не позволили авторам сделать заключение о том, какой из способов является наилучшим для аппроксимации кривой вариации Аллана, они пришли к выводу о том, что оба метода необходимо изучить более тщательно.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Статья В.В. Матвеева и М.Г. Погорелова (Тульский государственный университет) [6] посвящена изучению погрешностей микромеханических гироскопов. В ней описана методика нахождения параметров случайных погрешностей с помощью метода вариации Аллана. В работе описаны эксперименты и их результаты, с помощью которых сделаны выводы о том, какой из гироскопов имеет наилучшие характеристики, что позволяет прогнозировать высокую точность работы данного прибора в составе системы ориентации.

В статье авторов Коркишко Ю.Н., Федорова В.А., Прилуцкого В.Е. и Пономарева В.Г. (предприятие «Оптолинк» г. Москва) [7] проведено исследование и идентификация структуры шумов волоконно-оптического гироскопа. Метод вариации Аллана позволил авторам идентифицировать составляющие шумов гироскопов производства компании НПК «Оптолинк». Было выявлено, что в канале измерения присутствуют белый шум, фликкер-шум различных типов, и шум ухода выходного сигнала. На основе полученных результатов даны рекомендации по улучшению характеристик волоконно-оптических гироскопов.

В статье Михеева А.В. (Саратовский государственный университет) [8] предложен способ учета шумовых характеристик датчиков первичной информации при математическом моделировании БИНС и показано их влияние на точность выходных характеристик системы. Авторы пришли к выводу, что наличие шумов приводит к возрастанию погрешностей выходных параметров БИНС. Чем более низкочастотный компонент шума, тем большее влияние он оказывает на погрешность прибора.

В статье Малкина З.М. (Пулковская обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург) [9] описано использование вариации Аллана и ее модификаций для исследования временных рядов. Статья содержит информацию о применении классической вариации Аллана в астрометрии и геодинاميке, а также предложена модификация этого метода для многомерных и неравноточных временных рядов, которая активно используется

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

исследователями гироскопических приборов. Автор приходит к выводу, что вариация Аллана является перспективной статистикой для исследования выходных данных приборов различной области применения.

На основе анализа результатов приведенных в обзоре научно–практических работ можно сделать вывод о том, что метод вариации Аллана эффективно используется разработчиками и исследователями гироскопических приборов. В то же время рассмотренные работы не содержат применения этого метода для ТВГ. Следовательно, задача создания программы анализа шумовых составляющих выходного сигнала ТВГ является новой и **актуальной**. В данной работе метод вариации Аллана впервые используется для твердотельного волнового гироскопа, работающего в режиме датчика угловой скорости.

Выводы по разделу 1:

- в опубликованных работах отмечается эффективность метода вариации Аллана для анализа погрешностей гироскопических приборов;
- тема выпускной работы является актуальной.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТВГ

Тема работы связана с необходимостью для предприятия АО «ИЭМЗ «Купол» иметь достоверные оценки шумовых составляющих измеряемой величины угловой скорости или угла поворота объекта. Для испытаний предложено взять опытный образец твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) производства предприятия. Разработка данного прибора – одно из основных направлений предприятия.

2.1 Принцип действия ТВГ

Принцип действия ТВГ основан на явлении прецессии стоячей волны, возникающей при вращении полусферической оболочки, совершающей упругие колебания (эффект Г.Х. Брайена) [3]. При вращении основания вокруг главной оси оболочки стоячая волна поворачивается вследствие действия сил Кориолиса относительно резонатора и относительно инерциального пространства – явление прецессии стоячей волны, описанное в работе [10]. При этом угол поворота стоячей волны оказывается пропорциональным скорости вращения или угла поворота основания – в зависимости от способа возбуждения колебаний.

Резонатор твердотельного волнового гироскопа представляет собой полусферу на ножке, с помощью которой он крепится к основанию прибора (рисунок 2.1) [11].

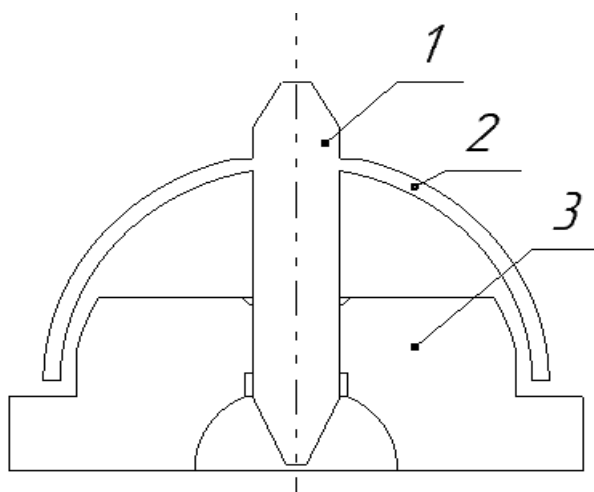


Рисунок 2.1–Резонатор ТВГ:
1 – оболочка; 2 – ножка; 3 – основание

«В рабочем режиме в резонаторе возбуждаются колебания, при этом образуется стоячая волна, определив положение которой относительно корпуса прибора, можно получить информацию об угле поворота объекта. В качестве основной формы колебаний резонатора используется низшая (вторая) форма изгибных колебаний кромки, которая имеет четыре узла и четыре пучности (рисунок 2.2). На рисунке показана основная (вторая) форма колебаний резонатора. При упругих колебаниях кольца основанная форма колебаний имеет вид эллипса, четыре точки которой остаются неподвижными (узловые точки). Это подтверждается математической моделью, описанной в литературе [10]».

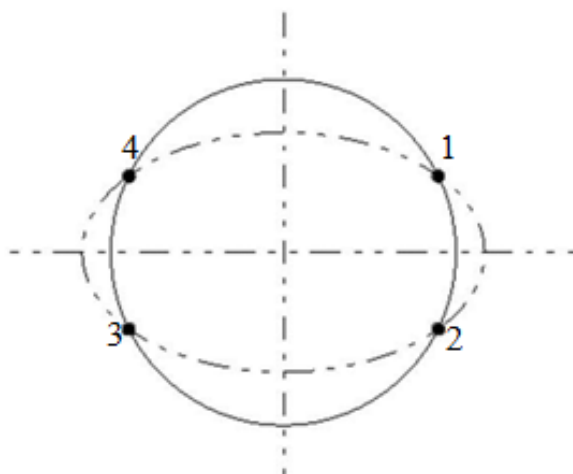


Рисунок 2.2 – Вторая форма колебаний полусферического резонатора: 1-4 узловые точки

Гироскопический эффект проявляется в том, что при повороте основания форма колебаний поворачивается в ту же сторону в инерциальном пространстве, но на величину гораздо меньшую. Стоячая волна будет располагаться под некоторым углом к оси возбуждения.

Зная положение стоячей волны относительно корпуса прибора, можно определить угол поворота основания в инерциальном пространстве. Угол, определяющий ориентацию волновой картины колебаний резонатора, находится по следующей формуле:

$$\vartheta(t) = -K \int_0^t \Omega(\tau) d\tau = -k\Delta\psi, \quad (2.1)$$

где $\Omega(\tau)$ – угловая скорость объекта, K – масштабный коэффициент ТВГ, $\Delta\psi$ – угол поворота основания.

Соотношение между входной угловой скоростью объекта и углом ориентации стоячей волны относительно инерциального пространства имеет вид

$$\vartheta(t) = k \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (2.2)$$

где

$$k = 1 - K.$$

2.2 Твердотельный волновой гироскоп в режиме ДУС

Твердотельный волновой гироскоп может работать в режиме датчика угловой скорости в условиях позиционного возбуждения. Рассмотрим этот случай на основе кольцевой модели резонатора [3].

На рисунке 2.3 представлена схема позиционного возбуждения. На пару противоположно расположенных на корпусе электродов подается переменное электрическое напряжение, частота которого в два раза меньше основной частоты собственных колебаний кольца. Распределение электрического потенциала по поверхности кольца имеет вид

$$V(\varphi, t) = \begin{cases} 0, & 0,5\varphi_{эл} < \varphi < \pi - 0,5\varphi_{эл}; \\ V_0 \cos \frac{\lambda}{2} t, & 0 \leq \varphi < 0,5\varphi_{эл}; \\ \pi - 0,5\varphi_{эл} < \varphi < \pi + 0,5\varphi_{эл}, \end{cases} \quad (2.3)$$

где V_0 – амплитудное значение, $\varphi_{эл}$ – угловой размер электрода, λ – собственная частота.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

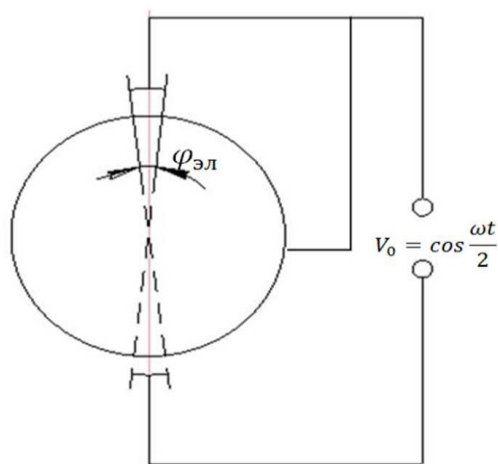


Рисунок 2.3 – Схема позиционного возбуждения

На рисунке 2.4 показан график функции $V(\varphi, t)$.

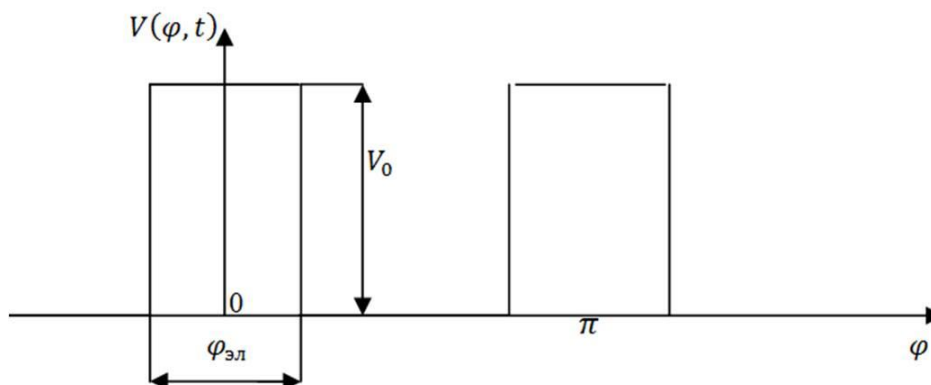


Рисунок 2.4 – Распределение напряжения по углу φ

Поверхность электродов и резонатора покрыты тонким электропроводящим слоем, поэтому их можно рассматривать как обкладки цилиндрического конденсатора.

Силу притяжения обкладок плоского конденсатора, отнесенную к площади обкладки, найдем по формуле

$$p = -\frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{V}{d}\right)^2, \quad (2.4)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

где V – разность потенциалов между обкладками, d – расстояние между обкладками, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$ – диэлектрическая постоянная, минус в данном выражении указывает на то, что это всегда сила притяжения.

Уравнение движения кольцевой модели под действием сил позиционного возбуждения имеет вид

$$\ddot{\omega}'' + \ddot{\omega} + 4\Omega\dot{\omega}' + \varkappa^2(\omega^6 + 2\omega^4 + \omega'') + \varkappa^2\xi(\dot{\omega}^6 + 2\dot{\omega}^4 + \dot{\omega}'') = \frac{p_{\omega}''}{\rho S},$$

где $\varkappa^2 = EI/\rho SR^4$; ρ – плотность материала кольца, S – площадь поперечного сечения, I – момент инерции поперечного сечения относительно его центральной оси, R – радиус недеформированного кольца, p_{ω} – проекция внешней распределенной нагрузки на нормаль к недеформированному кольцу, ξ – время затухания свободных колебаний.

С учетом (2.3), (2.4), найдем нормальную составляющую внешней нагрузки

$$p_{\omega}(\varphi, t) = -\frac{\varepsilon_0 L}{2d^2} V_0^2 f(\varphi) \cos^2 \frac{\lambda}{2} t, \quad (2.5)$$

где L – высота электрода, $f(\varphi) = \begin{cases} 0, & 0,5\varphi_{\text{эл}} < \varphi < \pi - 0,5\varphi_{\text{эл}}, \\ 1, & 0 < \varphi < 0,5\varphi_{\text{эл}}. \end{cases}$

Пусть пара возбуждающих электродов ориентирована под углом $\varphi = \varphi_{\text{эл}}$ (где $\varphi_{\text{эл}}$ – ориентация первого электрода), характеризующим положение электродов относительно корпуса (рисунок 2.5). Тогда выражение (2.5) запишется в виде

$$p_{\omega}(\varphi, t) = -\frac{\varepsilon_0 L}{\pi d^2} V_0^2 \sin \varphi_{\text{эл}} \cos 2(\varphi - \varphi_{\text{эл}}) \cos \lambda t, \quad (2.6)$$

где d – зазор между электродом и резонатором.

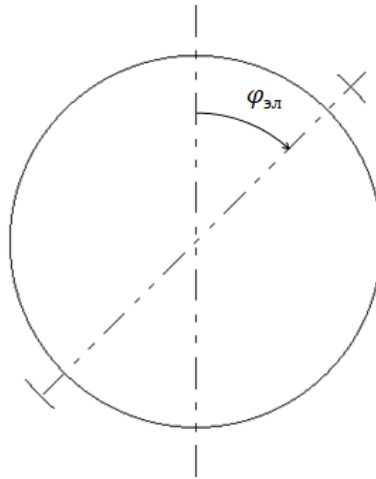


Рисунок 2.5 – Ориентация электродов возбуждения

Уравнение движения кольцевой модели запишется следующим образом:

$$\ddot{\omega}'' - \ddot{\omega} + 4\Omega\dot{\omega}' + \varkappa^2(\omega^{VI} + 2\omega^{IV} + \omega'') + \varkappa^2\xi(\dot{\omega}^{VI} + 2\dot{\omega}^{IV} + \dot{\omega}'') = H\cos 2(\varphi - \varphi_3)\cos\lambda, \quad (2.7)$$

где φ – полярный угол точки средней линии недеформированного кольца, отсчитанный от оси возбуждения, $H=2\varepsilon_0LV_0^2 \sin \varphi_{эл} / (\pi d_0^2 \rho S)$ – амплитуда возбуждения.

Строим приближенное решение уравнения упругих колебаний кольца по методу Бубнова–Галеркина в виде

$$\omega(\varphi, t) = p(t)\cos 2\varphi + q(t)\sin 2\varphi. \quad (2.8)$$

Следуя методу Бубнова–Галеркина, получаем динамическую систему

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \omega^2\xi\dot{p}(t) + \omega^2p(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{q}(t) = -\frac{1}{5}H\cos\varphi_3\cos\lambda t; \\ \ddot{q}(t) + \omega^2\xi\dot{q}(t) + \omega^2q(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{p}(t) = -\frac{1}{5}H\sin\varphi_3\cos\lambda t. \end{cases} \quad (2.9)$$

Функции $p(t)$ и $q(t)$ найдем в виде

$$\begin{aligned} p(t) &= a\cos\lambda t + m\sin\lambda t; \\ q(t) &= a\cos\lambda t + n\sin\lambda t. \end{aligned}$$

Для определения величин a , m , и n имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} m\omega_0^2\xi - \frac{8}{5}\Omega\omega_0n = -\frac{1}{5}H\cos 2\varphi_3; \\ n\omega_0^2\xi + \frac{8}{5}\Omega\omega_0m = \frac{1}{5}H\sin 2\varphi_3; \\ a = b = 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

Выражение для перемещения кромки резонатора можно привести к следующей форме

$$\omega(\varphi, t) = \sin\omega_0 t(m\cos 2\varphi + n\sin 2\varphi). \quad (2.11)$$

После элементарных преобразований получаем

$$\omega(\varphi, t) = \sqrt{m^2 + n^2} \sin\omega_0 t \cos 2(\varphi - \vartheta), \quad (2.12)$$

где $tg\ 2\vartheta = n/m$.

Решая систему (2.7) методом Бубнова–Галеркина получаем угол ориентации стоячей волны в условиях позиционного возбуждения.

$$tg\ 2\vartheta = tg\ 2\varphi_3 - \frac{8}{5} \frac{\Omega}{\omega_0^2 \xi} (1 + tg^2\ 2\varphi_3) + \frac{64}{25} \frac{\Omega^2}{\omega_0^4 \xi^2} tg\ 2\varphi_3, \quad (2.13)$$

где ξ – коэффициент внутреннего трения, ω_0 – собственная частота.

Если угловая скорость $\Omega \neq 0$, то пучность стоячей волны отстает от оси электродов возбуждения на угол ψ , который определяется величиной угловой скорости, собственной частотой и коэффициентом внутреннего трения.

Обозначим

$$\vartheta = \varphi_3 - \psi,$$

знак «−» перед величиной ψ в формуле соответствует вращению основания в сторону отсчета угла φ (по часовой стрелке), при вращении по часовой стрелке следует писать

$$\vartheta = \varphi_3 + \psi,$$

Угол ψ определяется по формуле

$$\psi = 2K \frac{\Omega}{\omega_0^2 \xi},$$

где K – масштабный коэффициент прибора, зависит от модели резонатора.

На рисунке 2.6 показано положение стоячей волны при неподвижном и вращающемся основании.

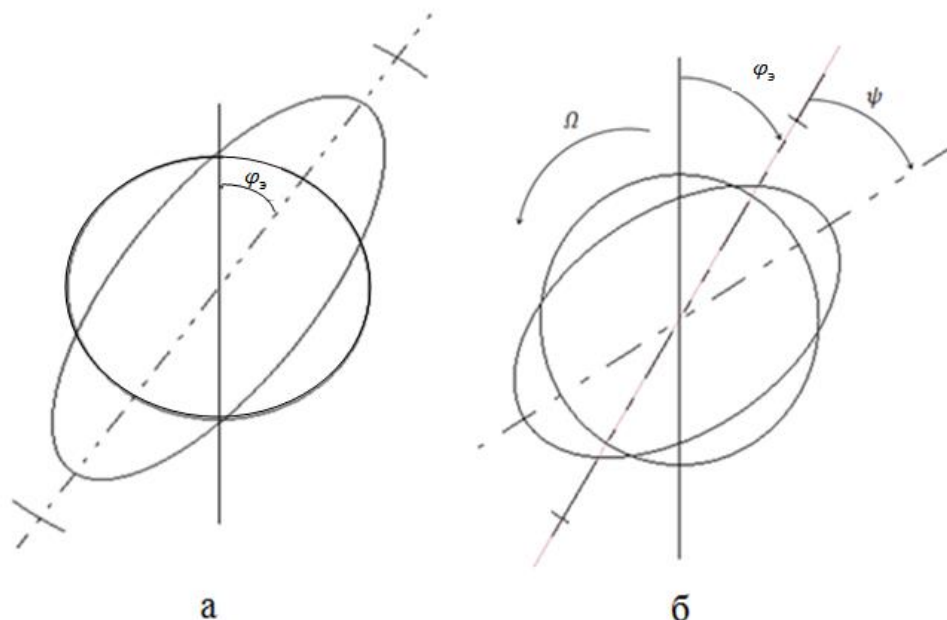


Рисунок 2.6 – Положение стоячей волны:

а – неподвижное основание; б – вращающееся основание

Угол прецессии стоячей волны пропорционален угловой скорости объекта, такой режим работы твердотельного волнового гироскопа является режимом датчика угловой скорости и описывается уравнением

$$\psi = 2K \frac{\Omega}{\omega_0^2 \xi}. \quad (2.15)$$

Угловую скорость измеряют следующим образом. На внутреннем корпусе резонатора расположены емкостные датчики Д1 и Д2 (рисунок 2.8). На рисунке показано два датчика из восьми, используемых в реальной конструкции. Так как разность потенциалов между поверхностью датчика и резонатором неизменна, то при изменении зазора между ними на поверхности датчика появляется избыток заряда. Количество заряда пропорционально изменению зазора, т.е. упругому перемещению кромки

резонатора. Таким образом, сигнал емкостного датчика дает информацию об упругом перемещении кромки резонатора.

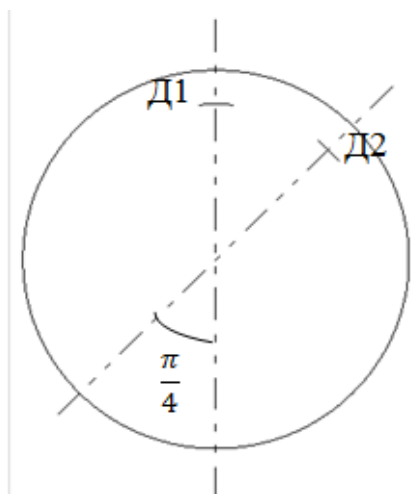


Рисунок 2.7 – Измерение угловой скорости ТВГ в режиме ДУС

Датчики Д1 и Д2 расположены под углом 0° и 45° . Сигналы, поступающие с них, имеют вид

–датчик Д1: $\omega_1 = m \sin \lambda t$;

–датчик Д2: $\omega_2 = n \sin \lambda t$.

Если произвести демодуляцию сигналов с опорным сигналом демодулятора $\sin \lambda t$, получаем:

$$\frac{\omega_2^*}{\omega_1^*} = \operatorname{tg} 2\vartheta;$$

$$\vartheta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\omega_2^*}{\omega_1^*},$$

где ϑ – угол поворота стоячей волны, отсчитанный от полярной оси, связанной с недеформированным кольцом; ω_1^*, ω_2^* – сигналы после демодуляции.

Угловая скорость основания при условии, что она постоянна, определяется формулой:

$$\Omega = 0,5K^{-1}\omega_0^2\xi(\varphi_0 - \vartheta). \quad (2.16)$$

На рисунке 2.8 изображен общий вид конструкции ТВГ в режиме ДУС [3].

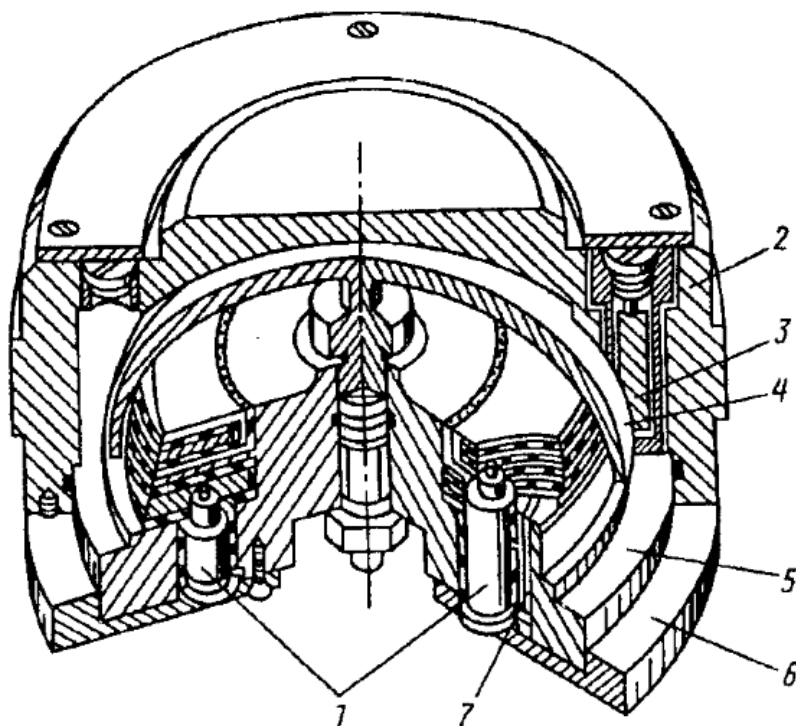


Рисунок 2.8 –ТВГ в режиме ДУС с полусферическим резонатором: 1 – гермоввод; 2 – наружный корпус; 3 – датчик перемещения; 4 – резонатор; 5 – внутренний корпус; 6 – основание; 7 – электрод возбуждения

На основание 6 прибора устанавливается внутренний корпус 5 с восемью электродами возбуждения 7, расположенными под углами 45° между собой. На экраны датчиков перемещения 3 измерительного канала, расположенных на наружном корпусе 2 подается напряжение, снимаемое с выходов предварительных усилителей. Резонатор 4 изготовлен из материала с высокой добротностью (кварцевое стекло). В процессе изготовления резонатора обеспечивается высокая точность по геометрии и соосности полусферы по отношению к ножке, с помощью которой он крепится в основание 6. Подача напряжения возбуждения на электроды и съем сигналов с датчиков осуществляется через гермовводы 1. Наружный корпус 2 обеспечивает герметичность конструкции.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.04.02.2017.469.00 ПЗ

Лист

21

2.3 Твердотельный волновой гироскоп в режиме ДУ

Параметрическое возбуждение осуществляется с помощью кольцевого электрода, окружающего кромку резонатора. Поверхности резонатора и кольцевого электрода можно рассматривать, как обкладки цилиндрического конденсатора, к которым приложено напряжение, не зависящее от угла φ , с частотой, близкой к собственной частоте резонатора (рисунок 2.9)

$$V = V_0 \cos \lambda t.$$

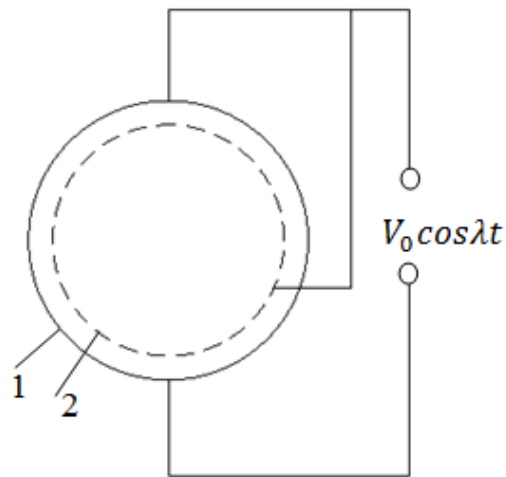


Рисунок 2.9 – Схема расположения кольцевого электрода: 1–кольцевой электрод; 2–резонатор

При построении математической модели принимается, что касательная составляющая электрической силы, приложенной к резонатору, равна нулю, а нормальную разложим в ряд по степеням перемещения ω с точностью до первого порядка [3]:

$$p_{\omega} = -\frac{\varepsilon_0}{2} \frac{V^2}{(d_0 + \omega)^2} \approx \frac{\varepsilon_0 V^2}{d_0^3} + \dots,$$

где многоточие обозначает величины более высокого порядка малости, а также постоянную составляющую.

Уравнение упругих колебаний кольцевой модели резонатора в условиях параметрического возбуждения имеет вид

$$\ddot{\omega}'' - \ddot{\omega} + 4\Omega\dot{\omega}' + \varkappa^2(\omega^{VI} + 2\omega^{IV} + \omega'') + \varkappa^2\xi(\dot{\omega}^{VI} + 2\dot{\omega}^{IV} + \dot{\omega}'') = \omega'' R \cos^2 \lambda t, \quad (2.17)$$

где $R = \varepsilon_0 L V_0^2 / (\rho S d_0^3)$.

Приближенное решение уравнения (2.17) записывается в форме

$$\omega(\varphi, t) = p(t) \cos 2\varphi + q(t) \sin 2\varphi. \quad (2.18)$$

Применяя метод Бубнова - Галеркина, приходим к параметрически возмущенной системе

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \omega^2 \xi \dot{p}(t) + \omega^2_0 p(t) - \frac{8}{5} \Omega \dot{q}(t) = \frac{4R}{5} p(t) \cos^2 \lambda t; \\ \ddot{q}(t) + \omega^2 \xi \dot{q}(t) + \omega^2_0 q(t) - \frac{8}{5} \Omega \dot{p}(t) = \frac{4R}{5} q(t) \cos^2 \lambda t. \end{cases} \quad (2.19)$$

Пусть $\Omega = \Omega(t)$ – медленная функция времени. Для решения системы (2.19) применяется метод осреднения (метод медленно изменяющихся параметров). Введем медленные переменные $a(t)$, $m(t)$, $b(t)$, $n(t)$, согласно следующим условиям

$$\begin{aligned} p(t) &= a(t) \cos \lambda t + m(t) \sin \lambda t; \\ q(t) &= b(t) \cos \lambda t + n(t) \sin \lambda t; \\ \dot{p}(t) &= -a(t) \lambda \sin \lambda t + m(t) \lambda \cos \lambda t; \\ \dot{q}(t) &= -b(t) \lambda \sin \lambda t + n(t) \lambda \cos \lambda t. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Подставляя (2.20) в (2.19) и производя осреднение полученной системы по быстрой переменной λt , приходим к системе, описывающей эволюцию медленных переменных

$$\begin{cases} \dot{m} = -\frac{1}{2}\left(\Delta + \frac{3}{2}s\right)a + \frac{1}{2}m\omega_0^2\xi - \frac{4}{5}\Omega n; \\ \dot{a} = \frac{1}{2}\left(\Delta + \frac{1}{2}s\right)m + \frac{1}{2}a\omega_0^2\xi - \frac{4}{5}\Omega b; \\ \dot{n} = -\frac{1}{2}\left(\Delta + \frac{3}{2}s\right)b + \frac{1}{2}n\omega_0^2\xi + \frac{4}{5}\Omega m; \\ \dot{b} = \frac{1}{2}\left(\Delta + \frac{1}{2}s\right)n + \frac{1}{2}b\omega_0^2\xi + \frac{4}{5}\Omega a, \end{cases} \quad (2.21)$$

где $\Delta = \frac{\lambda^2 - \omega_0^2}{\lambda}$; $s = \frac{2R}{(5\lambda)}$, значение λ близко к собственной частоте ω_0 .

Построим границу области устойчивости нулевого решения системы (2.21) при $\Omega = 0$. Граница области устойчивости в плоскости параметров Δ и s определяется с помощью в уравнения

$$\left(\Delta + \frac{3}{2}s\right)\left(\Delta + \frac{1}{2}s\right) + \omega_0^4\xi = 0. \quad (2.22)$$

На рисунке 2.10 изображена гипербола, представляющая границу области устойчивости. Координаты точки минимума

$$\begin{aligned} \Delta_{min} &= -2\omega_0^2\xi; \\ s_{min} &= 2\omega_0^2\xi. \end{aligned} \quad (2.23)$$

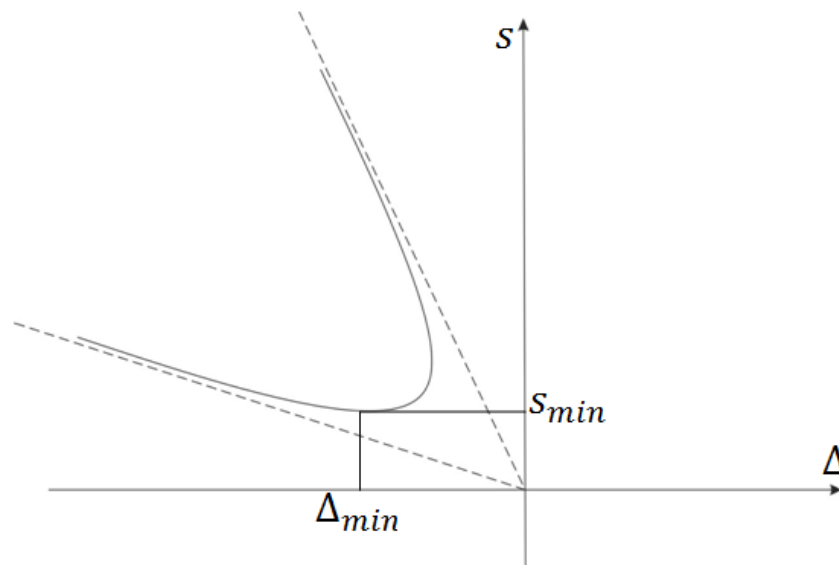


Рисунок 2.10 – Граница области устойчивости

Область внутри гиперболы соответствует неустойчивым колебаниям, область вне гиперболы соответствует устойчивым колебаниям.

Случай режима возбуждения с частотой и амплитудой напряжения кольцевого электрода, соответствующий точке минимума, описан выражением

$$\lambda_{min} = -\omega_0^2 \xi + \omega_0 \sqrt{1 + \omega_0^2 \xi^2};$$

$$V_{0min}^2 = \frac{5\rho S d_0^3 \omega_0^3 \xi \lambda_{min}}{\varepsilon_0 L}.$$

По отношению к амплитуде подаваемого напряжения этот режим является оптимальным.

Колебательный процесс, возбужденный в резонаторе, описывается уравнением

$$\omega(\varphi, t) = \cos 2\varphi (a \cos \lambda t + m \sin \lambda t) + \sin 2\varphi (b \cos \lambda t + n \sin \lambda t). \quad (2.24)$$

Уравнение (2.24) представляет собой стоячую волну при выполнении условия

$$\det \begin{bmatrix} a & m \\ b & n \end{bmatrix} = 0. \quad (2.25)$$

При условии $\Omega \neq 0$ и учитывая выражение (2.23) запишем систему (2.21) в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{a} = \frac{1}{2}(a - m)\omega_0^2 \xi - \frac{4}{5}\Omega b; \\ \dot{m} = \frac{1}{2}(m - a)\omega_0^2 \xi - \frac{4}{5}\Omega m; \\ \dot{n} = \frac{1}{2}(n - b)\omega_0^2 \xi - \frac{4}{5}\Omega n; \\ \dot{b} = \frac{1}{2}(b - n)\omega_0^2 \xi - \frac{4}{5}\Omega a. \end{cases} \quad (2.26)$$

Преобразуем (2.24) с учетом (2.25) к виду

$$\omega(\varphi, t) = \sqrt{m^2 + n^2 + a^2 + b^2} \cos(\lambda t - \alpha) \cos 2(\varphi - \vartheta), \quad (2.27)$$

где $tg \alpha = m/a$; $tg 2\vartheta = \sqrt{b^2 + n^2} / \sqrt{a^2 + m^2}$.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист 25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Угол определяет ориентацию стоячей волны (2.27) относительно резонатора. Для нахождения эволюции этого угла имеем соотношение:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left[\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{b^2+n^2}}{\sqrt{a^2+m^2}} \right].$$

Вычисляя производную и пользуясь уравнениями системы (2.26), получаем:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{2}{5} \Omega + 4\omega^2 \xi [m^2 b^2 - n^2 a^2 + 2(b^2 + n^2)am - 2(a^2 + m^2)bn].$$

Выражение в квадратных скобках равно нулю, поэтому

$$\dot{\vartheta} = -K\Omega,$$

или

$$\vartheta = \vartheta_0 - K \int_0^t \Omega(r) dr,$$

где K – масштабный коэффициент.

Из последней формулы следует, что угол поворота стоячей волны пропорционален углу поворота корпуса твердотельного волнового гироскопа, следовательно, в режиме параметрического возбуждения ТВГ является датчиком угла.

Угол ϑ находится с помощью демодуляции с опорным сигналом из формулы (2.27). Сигналы с датчиков перемещений Д1 и Д2 имеют вид

$$\text{датчик Д1: } \omega_1 = A \cos(\lambda t - \alpha) \cos 2\vartheta;$$

$$\text{датчик Д2: } \omega_2 = A \cos(\lambda t - \alpha) \sin 2\vartheta,$$

где

$$A = \sqrt{a^2 + m^2 + b^2 + n^2}.$$

После проведения демодуляции сигналы преобразуются следующим образом

$$\omega_1^* = A \cos \alpha \cos 2\vartheta;$$

$$\omega_2^* = A \cos \alpha \sin 2\vartheta.$$

Отсюда находим соотношение

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

$$\operatorname{tg} 2\vartheta = \frac{\omega_2^*}{\omega_1^*}.$$

Угол поворота основания определяется

$$\Delta\psi = 0,5\text{K}^{-1}\operatorname{arctg}(\omega_2^*/\omega_1^*).$$

2.4 Система съема информации ТВГ

Рассмотрим систему съема информации для твердотельного волнового гироскопа, состоящую из восьми датчиков линейных перемещений, которые располагаются на внутреннем корпусе прибора.

На каждую пару электродов подается напряжение. Положения электродов на корпусе отстоят друг от друга на углы 45° .

Сигналы с датчиков, расположенных на осях $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, электрически складываются и образуют косинусный канал информации E_c .

Сигналы, поступающие с датчиков $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$, определяют синусный канал информации E_s .

Сигналы E_c и E_s изменяются с частотой собственных колебаний резонатора и амплитудой, пропорциональной составляющим амплитуд колебаний вдоль осей Ox, Oy, Ox_1, Oy_1 . На рисунке 2.11 показано расположение датчиков съема сигнала.

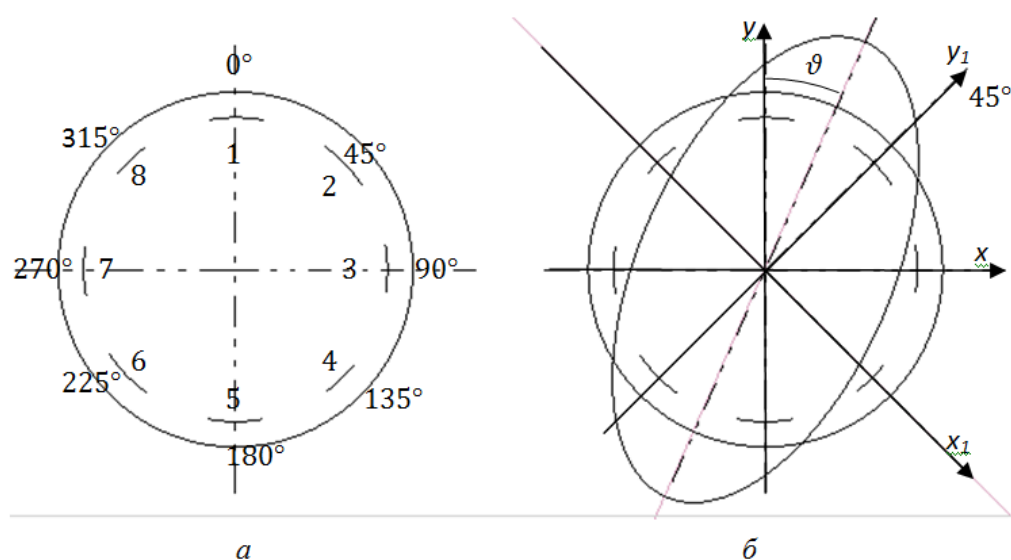


Рисунок 2.11 – Расположение датчиков съема сигнала: а – неподвижное основание, б – подвижное основание; 1–8 – датчики Д1–Д8 соответственно

Сигналы E_c и E_s обрабатываются с целью получения соотношения амплитуд для нахождения угла ϑ поворота стоячей волны относительно резонатора. С помощью демодулятора, после усиления сигналов E_c и E_s выделяют их составляющие, которые находятся в фазе с опорным сигналом демодуляторов $\cos\lambda t$ (λ – частота напряжения питания кольцевого электрода). Эти составляющие преобразуют в электронные коды, которые поступают на ЭВМ, где вычисляется угол ϑ . Принципиальная схема преобразования сигналов показана на рисунке 2.12 [3].

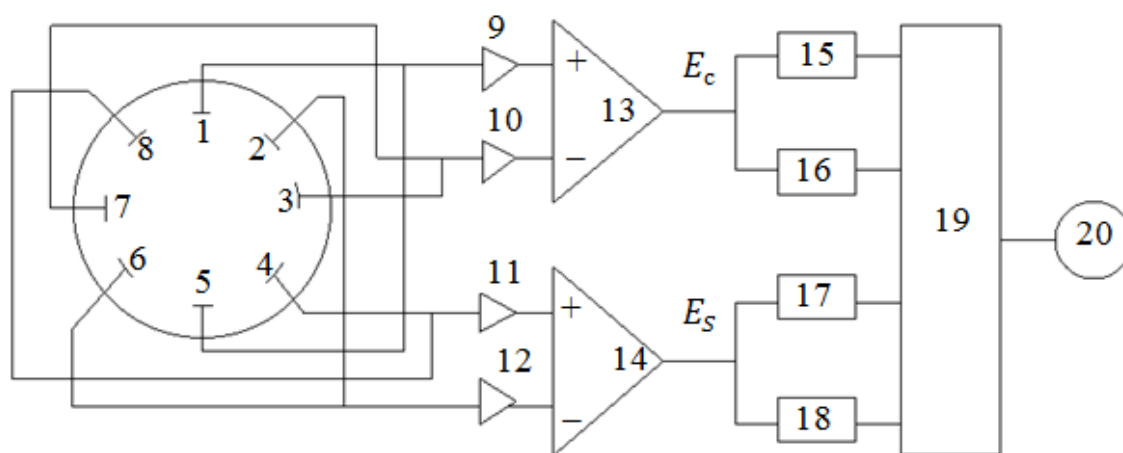


Рисунок 2.12 – Схема преобразования сигналов для вычисления угла поворота основания ТВГ: 1–8 – емкостные датчики; 9,10,11,12 – предварительные усилители каналов E_c и E_s ; 13,14 – операционные усилители; 15, 17 – фазовые демодуляторы сигналов E_c и E_s ; 16,18 – квадратурные демодуляторы сигналов E_c и E_s ; 19 – АЦП (аналоги-цифровой преобразователь); 20 – ЭВМ

Система съема информации с помощью емкостных датчиков линейных перемещений, которая характеризует положение стоячей волны, изображена на рисунке 2.13. Система состоит из восьми емкостных датчиков перемещений и усилительно–преобразующих блоков. Емкостной датчик образуется двумя «обкладками» – напыляемыми пленками, одна расположена на электроде корпуса прибора, другая образуется металлизированной поверхностью резонатора. На рисунке 2.13 рабочие

емкости датчиков угла обозначены С1–С8. Расстояние между обкладками конденсатора (расстояние между поверхностями электрода и резонатора), не превышает сотен микрометров. Секторы датчика угла электрода соединены с буферными усилителями БУ, образуя дифференциальную систему съема сигнала: каналы С1–С5, С3–С7. С изменением зазора между электродами и резонатором на выходе каналов появляются сигналы, пропорциональные параметрам колебаний резонатора вдоль осей Oy (0°), $Oy1$ (45°) (рисунок 2.11 а), которые характеризуют положение диаграммы вибраций возбужденного резонатора, относительно корпуса прибора.

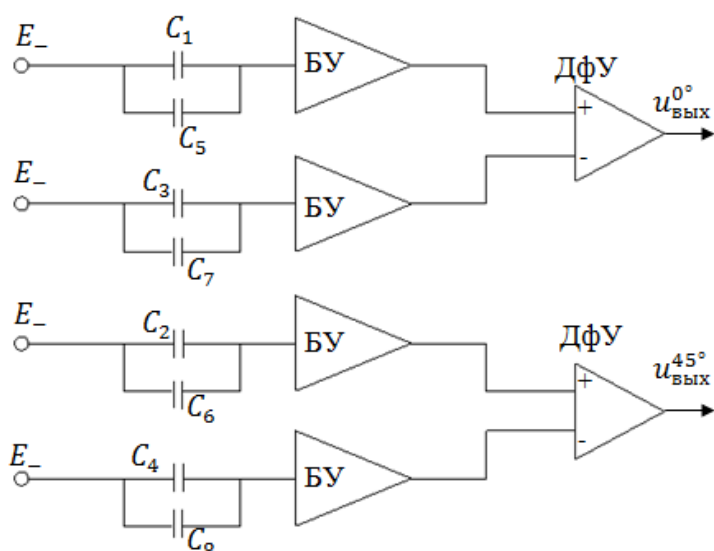


Рисунок 2.13 – Система съема информации с датчиков ТВГ: E – питающее постоянное напряжение; С1–С8 – рабочие емкости датчика угла; БУ – буферный усилитель; ДфУ – дифференциальный усилитель

Для определения изменения емкости при изменении зазора между резонатором и электродом при возбуждении резонатора воспользуемся формулой для емкости плоского конденсатора. Тогда номинальная емкость по измерительному каналу Oy (0°), равна

$$C_0 = 2\varepsilon_0\varepsilon R^2 d_0^{-1}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)\psi.$$

При возбуждении резонатора происходит изменение зазора. На оси Oy радиальных перемещений величина зазора

$$d = d_0 + w,$$

где w – радиальное упругое перемещение (прогиб) кромки резонатора, который определяется выражением

$$w = A(1 - \theta\theta_0^{-1})\cos 2\vartheta \sin \lambda_0 t,$$

где A – амплитуда колебаний кромки резонатора, θ – текущее значение угла, ϑ – угол, определяющий положение диаграммы вибрации в окружном направлении, λ_0 – собственная частота колебаний резонатора. Выражение рабочей емкости имеет вид

$$C_y = 2\varepsilon_0\varepsilon R^2 \int_{-\psi/2}^{\psi/2} d\psi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\cos\theta d\theta}{d_0 + w}$$

$$C_y = C_0(1 - B \sin \lambda_0 t + D a^2(1 - \cos 2\lambda_0 t)),$$

где $a = A/d_0$ – относительная амплитуда колебаний кромки резонатора.

Измерительному каналу по оси Ox соответствует изменение зазора $d = d_0 - w$:

$$C_x = C_0(1 + B \sin \lambda_0 t + D a^2(1 - \cos 2\lambda_0 t)).$$

Изменение суммарной емкости датчиков при изменении рабочего зазора в направлении оси Oy (0°) пропорционально амплитуде колебаний резонатора:

$$\Delta C_0 = C_x - C_y = 2C_0 B \sin \lambda_0 t.$$

Анализ схемы измерения приведен в книге [3]. «С целью защиты от помех емкостные датчики конструктивно выполняют с буферными усилителями, которые согласуют высокоемкостной выход датчика углового положения с малым омическим сопротивлением. Монтажные схемы устройств, включая схему буферного усилителя, тщательно экранируют. Входное сопротивление буферного усилителя составляет несколько гектоом (гОм), а паразитная

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

емкость не превышает долей пикофарады (пФ), все это гарантирует высокую точность преобразования амплитуды и фазы колебаний резонатора в электрический сигнал».

Система коррекции собственных осей жесткости резонатора твердотельного волнового гироскопа состоит из шестнадцати электродов предназначены для повышения точности определения угла прецессии. Колебания имеют вид стоячей волны, ориентированных вдоль собственных осей жесткости, в противном случае появляется дополнительная стоячая волна, вызывающая скорость ухода ТВГ. Для того, чтобы устранить это явление и следить за положением собственных осей жесткости, чтобы одна из них все время совпадала с положением пучностей стоячей волны, реализуют систему, состоящую из 16-ти электродов, образуя электродную систему коррекции.

Масштабный коэффициент, который является отношением угла поворота волны относительно основания к углу поворота основания, в случае шестнадцатиточечной модели близка к масштабному коэффициенту кольца. Данная система ближе по свойствам к кольцу по сравнению с восьмиточечной моделью.

2.5 Погрешности ТВГ

Основными причинами возникновения погрешностей ТВГ служат:

- технологические дефекты резонатора;
- погрешности систем возбуждения;
- погрешности электронной системы съема сигналов.

Существенное влияние на поведение стоячих волн в резонаторе оказывает четвертая гармоника разложения Фурье неоднородности плотности и неоднородности модуля Юнга, а также толщины оболочки. Вследствие неоднородности может оказать влияние четвертая гармоника колебания оболочки, такой дефект приводит к расщеплению собственной частоты. Из-за расщепления собственной частоты по четвертой гармонике неоднородности

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

распределения массы резонатора появляется скорость ухода основной стоячей волны ТВГ.

При наличии первой, второй и третьей гармоник распределения массы резонатора по окружному углу волновая картина имеет «паразитную» составляющую, которая искажает полезный сигнал. Это объясняется тем, что помимо основной формы колебаний в резонаторе возбуждается ряд побочных форм, вызываемые вибрациями основания. Существуют продольная и поперечная вибрации. Воздействие продольной вибрации «привязывает» стоячую волну к ориентации второй гармонике дефекта, а поперечной к третьей и первым гармоникам дефекта массы.

Наличие диссипации энергии в резонаторе приводит к затуханию амплитуды колебаний при условии однородности диссипативных свойств по окружному углу. Если добротность резонатора зависит от окружного угла, то это явление носит название разnodобротности. В разnodобротном резонаторе возникает скорость ухода стоячей волны.

Идеальный резонатор так же будет иметь скорость ухода, если система его возбуждения будет неидеальна. Погрешности возникают из-за нестабильности питания кольцевого электрода, некруглости кольцевого электрода или при комбинации этих дефектов.

Из-за неправильной выставки электродов съема информации, также возникают погрешности.

Первостепенными погрешностями твердотельного волнового гироскопа в режиме датчика угловой скорости являются нестабильность масштабного коэффициента и смещение (дрейф) нуля. Возникновение погрешностей связано с приближенным рассмотрением математической модели, воздействием возмущающих сил (моментов) на подвижные части гироскопа и разбалансировкой электронных узлов, систем съема и обработки информации.

При съеме информации выходные сигналы гироскопов подвержены различным шумовым возмущениям.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Шум квантования – ошибки, возникающие при преобразовании выходного сигнала из аналоговой формы в цифровую форму. Характер этой погрешности зависит от типа аналогово-цифрового преобразователя либо из-за округления (до определенного разряда), либо из-за усечения (отбрасывания младших разрядов) сигнала.

Белый шум – стационарный шум, спектральные составляющие которого распределены на всех частотах видимого диапазона. В технических описаниях используют характеристики не самого шума, а случайный процесс, который получается в результате интегрирования шума. В случае для гироскопических приборов погрешность возникает в определении угла (случайное блуждание угла) или в определении угловой скорости (случайное блуждание угловой скорости).

Фликкер-шум (розовый шум) – электронный шум, который наблюдается почти во всех аналоговых устройствах. Источниками шума являются неоднородности в проводящей среде, материалы и элементы, используемые в электронике. Именно этот шум в электронных компонентах съема и обработки информации гироскопов вызывает нестабильность нуля.

Тренд – долговременная тенденция исследования временного ряда. Для датчиков угловой скорости исследует приращение выходного сигнала.

Метод вариации Аллана позволяет выявить эти шумовые составляющие в канале измерения, а также определить их численное значение. Для определения случайных составляющих сигнала датчиков угловой скорости, так же принято применять вариацию Аллана, с помощью которой определяют спектральную плотность и мощность белого шума, случайное блуждание угла и угловой скорости, нестабильность нулевого сигнала и тренд.

Выводы по разделу 2:

– даны описания принципа действия твердотельного волнового гироскопа в режиме датчика угловой скорости и датчика угла;

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

- приведены математические модели твердотельного волнового гироскопа в режиме датчика угловой скорости и датчика угла;
- описана система съема информации угла поворота стоячей волны;
- описаны источники погрешностей прибора.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ШУМОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТВГ ПО МЕТОДУ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

В данном разделе приводится содержание метода вариации Аллана, разработка программы расчета вариации и отклонения Аллана, графического интерфейса и результаты, полученные по программе.

3.1. Содержание метода вариации Аллана

Вариация Аллана (ВА), разработана в 1960–х годах Дэвидом Алланом, для оценки стандартов частоты. Метод вариации Аллана позволяет анализировать временные последовательности для определения характеристик шумов в функции времени усреднения. Более 40 лет назад методика создавалась для оценки нестабильности часов в спутниковых навигационных системах, а сейчас она применяется с целью анализа шума для других систем, в том числе и гироскопических приборов.

Вариация Аллана имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами исследования погрешностей прибора:

- нет никаких теоретических ограничений применения этого метода для различных типов измеряемых величин, т.к. он не связан с какой-либо физической моделью стандарта, его основа – измерения;
- метод позволяет описывать поведение выходного сигнала на различных участках усреднения, начиная от периода равного интервалу между отсчетами.

Оба этих свойства позволяют применять вариацию Аллана для исследования различных рядов измерений, в том числе и для твердотельных волновых гироскопов, работающих в режиме датчика угловой скорости.

Вариация Аллана позволяет оценить стабильность показаний различных приборов и устройств, определяя дисперсии разницы соседних отклонений. Это метод представления среднеквадратичного случайного дрейфа в зависимости от времени усреднения. Он прост в вычислениях, значительно лучше подходит для анализа шума, чем простое вычисление

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

среднеквадратичного отклонения (СКО), относительно прост для интерпретации и понимания. Метод не очень хорошо подходит для строгого анализа, но является разумным решением в процессе подготовки моделей ошибок инерциальных датчиков [8].

Классический вид вариации Аллана описан формулой

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (x_{k+1} - x_k)^2, \quad (3.1)$$

где σ_A^2 – вариация Аллана, τ – интервал усреднения, x_k ($k = 1, 2 \dots N$) – усреднение выборки измерений на времени τ .

В большинстве случаев используется не вариация Аллана, а отклонение Аллана, которое определяется как квадратный корень из вариации. Затем строят график отклонения вариации Аллана, далее производится анализ различных участков наклонов этой кривой, по которым судят о присутствии всевозможных составляющих погрешности.

Для датчика угловой скорости вариацию Аллана модифицируют. С учетом того, что информация с датчика получена в виде угла поворота, приближенное значение угловой скорости получают с помощью конечно-разностной аппроксимации на отрезке времени, равному интервалу осреднения. Используется выходной сигнал гироскопа по углу $\theta(t)$, измеренный N раз, с шагом измерения (опроса) τ_0 .

Формула (3.1) принимает вид

$$\sigma_A^2(n \cdot \tau_0) = \frac{1}{2(n \cdot \tau_0)^2 (N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} (\theta_{k+2n} - 2\theta_{k+n} - \theta_k)^2, \quad (3.2)$$

где N – количество измерений,

n – кратность интервала усреднения данных ($n = 1, 2 \dots n_{max} \leq \frac{N-1}{2}$),

$\tau = n\tau_0$ – интервал усреднения данных,

τ_0 – шаг опроса измерителя,

θ – значение выходного сигнала с усреднением на интервале τ .

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

В выражении (3.2) использована конечно–разностная аппроксимация угловой скорости по дискретным значениям угла поворота на отрезке времени усреднения τ .

Затем, как и при применении классической методики, определяется отклонение Аллана, строится график кривой отклонения в логарифмическом масштабе, где по оси ординат откладывается само отклонение, а по оси абсцисс время осреднения τ . Далее осуществляется анализ кривой и определяются шумовые составляющие сигнала.

3.2. Программа расчета вариации Аллана

Для получения шумовых составляющих в измерительной информации ТВГ в режиме ДУС рассмотрен опытный образец прибора производства АО «ИЭМЗ «Купол». Выходной сигнал прибора получен и обработан с помощью специализированного программного обеспечения «StatTest» собственной разработки АО «ИЭМЗ «Купол», которая предназначена для съема данных с гироскопических приборов. На рисунке 3.1 приведена схема рабочего места для проведения испытания приборов.

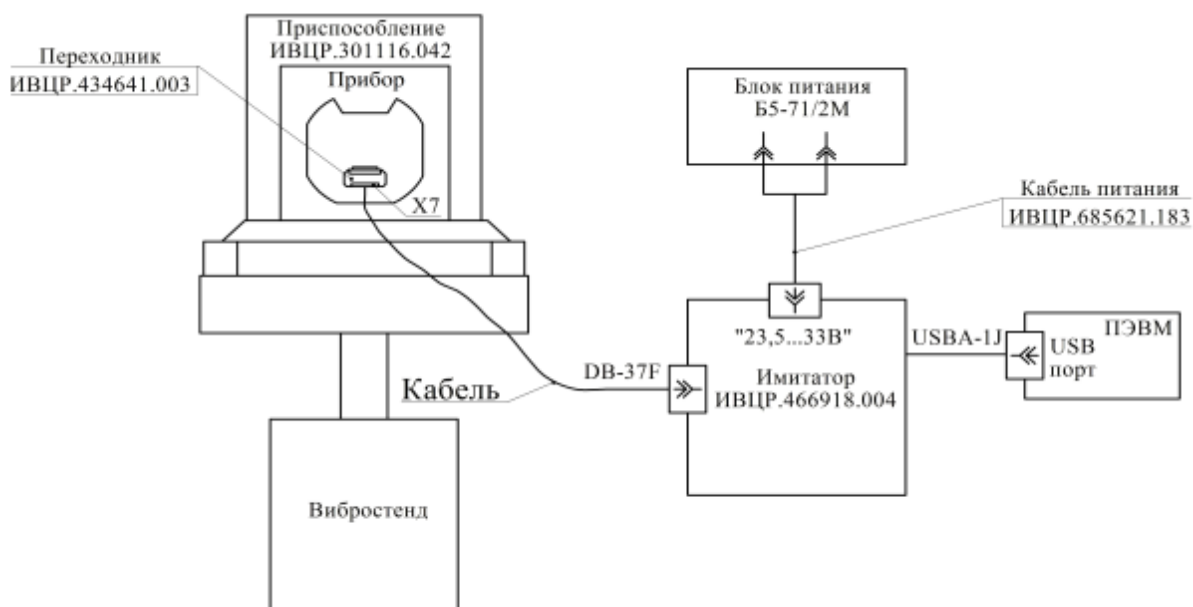


Рисунок 3.1– Схема рабочего места

После приема данных с изделия имитатор осуществляет с помощью программного обеспечения преобразование аналогового сигнала, полученного с прибора, через USB соединение. В результате на ПЭВМ получаем величину угла ориентации стоячей волны (или угол поворота основания), помещенный в файл в формате txt. Съём информации производился в течение получаса на неподвижном основании, данные получены относительно скорости Земли.

На рисунке 3.2 показана кривая изменения угла, где по оси абсцисс откладывается количество измерений, а по оси ординат угол.

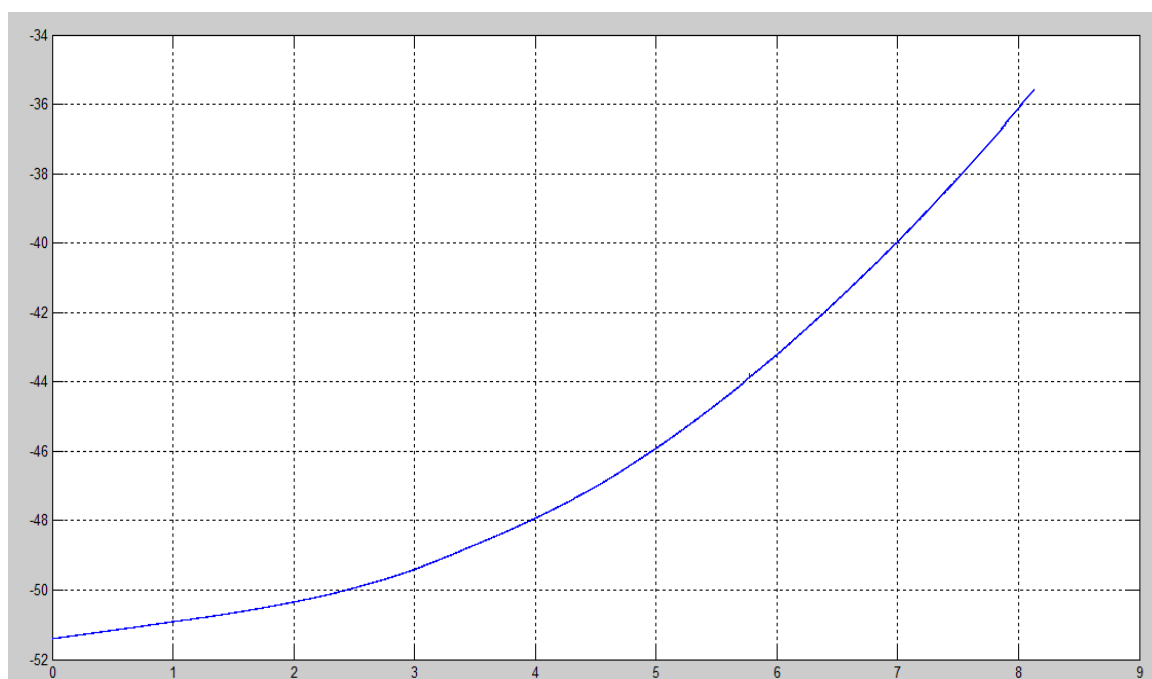


Рисунок 3.2 – Выходные данные ТВГ по углу

При достаточном увеличении видно, что выходной сигнал с ТВГ зашумлен (рисунок 3.3).

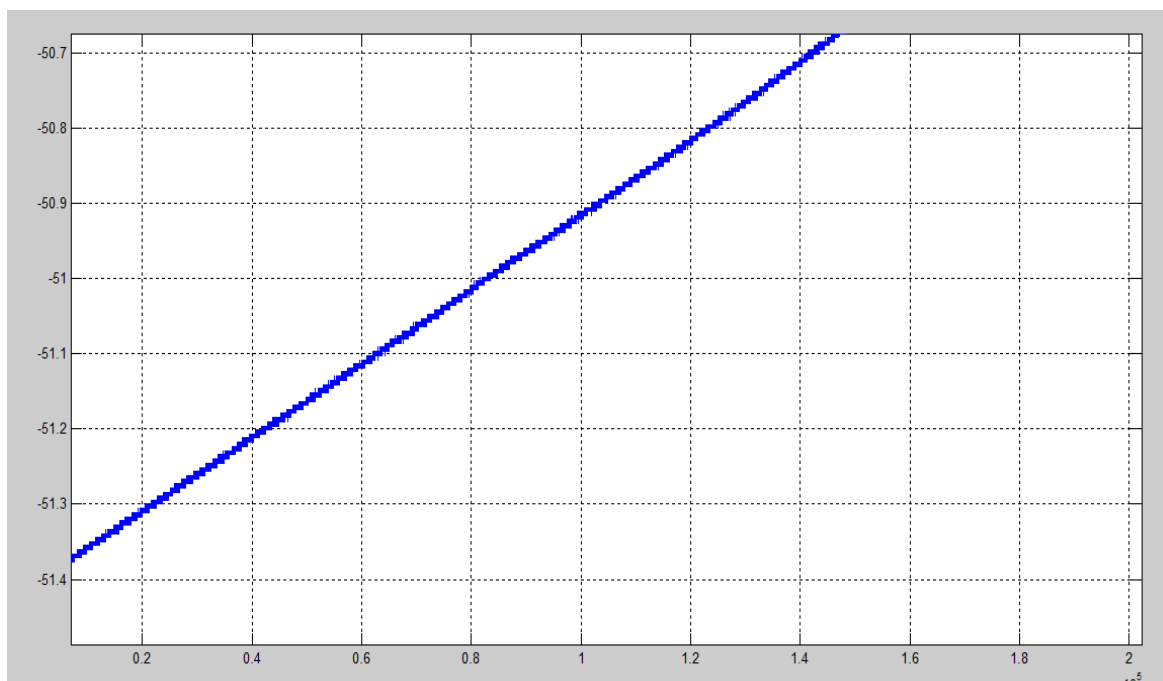


Рисунок 3.3 – Зашумленный сигнал

По полученным данным рассчитываем вариацию Аллана по формуле (3.2). Программа расчета вариации Аллана составлена с помощью средств программирования среды MATLAB. Также рассчитывалось отклонение Аллана как корень квадратный из вариации.

На рисунках 3.4 и 3.5 представлены фрагменты кода для расчета вариации Аллана, в том числе задание начальных данных (рисунок 3.4), программа расчета вариации и отклонения Аллана и построения графика кривой Аллана (рисунок 3.5).

```
% задание переменных
guidata(hObject, handles);
grid on
T=0;
sigma=0;
b=0;
n=0;
k=0;
q=0;
r=0;
```

Рисунок 3.4– Задание переменных вариации Аллана

```

% --- расчет вариации Аллана и аппроксимация кривой.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
sig=get(handles.edit1,'String');
omega=dlmread(sig);
fs = str2double(get(handles.edit3,'String'));%время осреднения
pts = str2double(get(handles.edit4,'String'));%количество точек

[N,M]=size(omega);
n=2.^(0:floor(log2(N/2)));
maxN=n(end);
endLogInc=log10(maxN);%задание логарифмической сетки
m=unique(ceil(logspace(0,endLogInc,pts)));%количество измерений
t0=1/fs;%шаг опроса измерителя
T=m*t0;%время усреднения
theta=omega;%задание угла
sigma2=zeros(length(T),M);%задание границ вариации

len=length(m);

for i=1:len
    for k=1:N-2*m(i)
        sigma2(i,:)=sigma2(i:)+(theta(k+2*m(i,:)-
2*theta(k+m(i,:))+theta(k,:)).^2;%формула расчета вариации
    end
end

sigma2=sigma2./repmat((2*T.^2.*(N-2*m)),1,M);
sigma=sqrt(sigma2);%получение отклонения Аллана
loglog(T,sigma);%приведение к логарифмическому масштабу

```

Рисунок 3.5– Программа расчета вариации Аллана и отклонения Аллана

Результатом программы расчета является построение кривой отклонения Аллана в логарифмическом масштабе, где по оси ординат откладывается само отклонение, а по оси абсцисс время осреднения τ (рисунок 3.6).

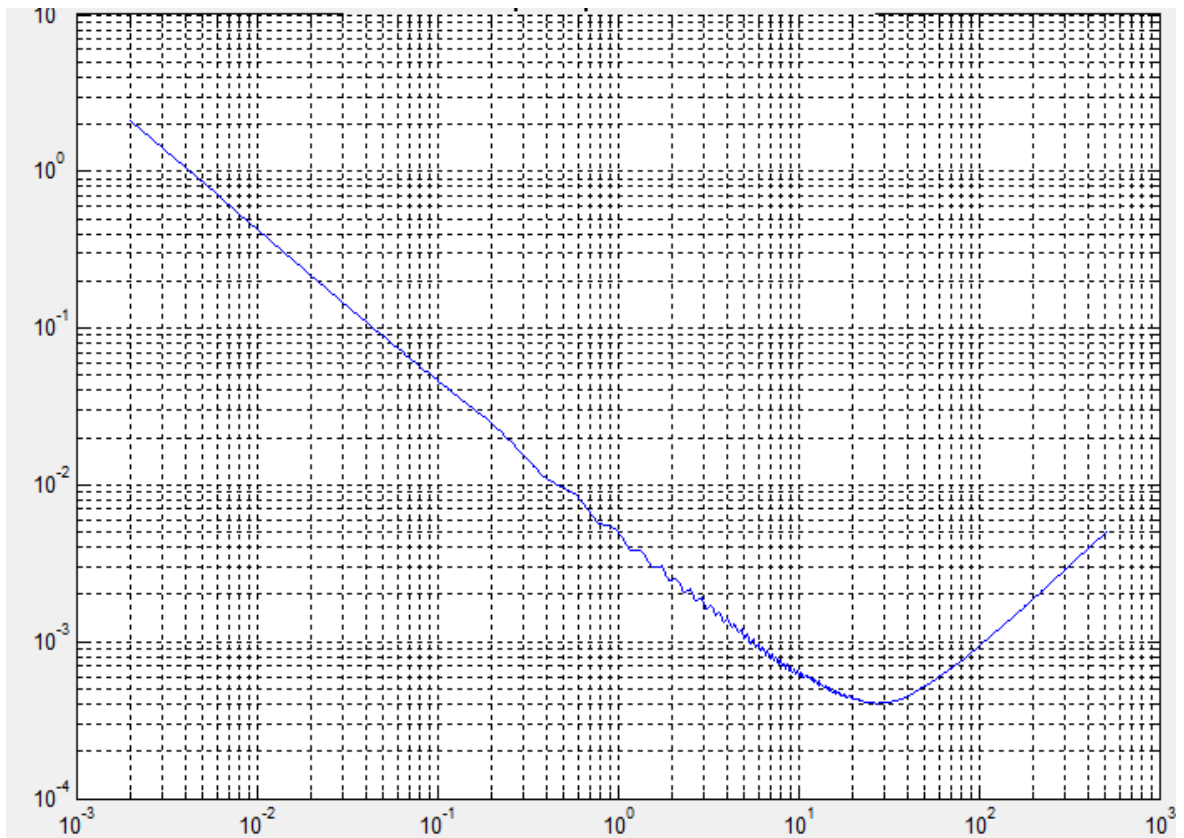


Рисунок 3.6– Кривая отклонения Аллана

3.3 Аппроксимация кривой отклонения Аллана

Сущность метода вариации Аллана для оценки шумовых составляющих состоит в вычислении дисперсий не самих отклонений центрированного случайного процесса, как это делается при определении классической выборочной дисперсии, а разницы соседних отклонений.

Вариация Аллана связана со спектральной плотностью шума соотношением:

$$\sigma_A^2 = 4 \int_0^\infty P(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (3.3)$$

В работе Н.И. Кробка сказано: «Исходя из известных для инерциальных измерителей основных физических источников возникновения шумовых составляющих и соответствующих выражений для спектральной плотности шума в стандарте IEEE (институт инженеров электротехники и электроники),

используется аппроксимирующее выражение для зависимости изменения вариации Аллана от времени осреднения τ в виде следующего обобщенного многочлена» [11]:

$$\sigma_A^2 \approx p_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}, \quad (3.4)$$

где B – коэффициент нестабильности (дрейфа) нулевого сигнала (смещения нуля), K – коэффициент случайного ухода угловой скорости; N – коэффициент случайного углового ухода – спектральной плотности мощности шума, Q – коэффициент шума квантования выходного сигнала; R – коэффициент линейного изменения угловой скорости.

В таблице 1 приведены соотношения между параметрами разложения вариации Аллана и спектральной плотностью шума.

Таблица 1

Тип погрешности шум/вариация	Спектральная плотность шума $P(f)$	Вариация Аллана $\sigma_A^2(\tau)$	Коэффициент многочлена $p_A^2(\tau)$
Белый шум квантования /шум квантования	$(2\pi f)2Q^2\tau_0$ при $f < 1/2\tau_0$	$\frac{3Q^2}{\tau^2}$	Q-погрешность квантования выходного сигнала
Фликкер-шум выходного сигнала/нестабильность смещения нуля	$\left(\frac{B^2}{2\pi}\right)\frac{1}{f}$ при $f \leq f_0$; 0 при $f > f_0$	$B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + \Delta(f_0)$ $\approx B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2$	B-коэффициент нестабильности смещения 0
Белый шум приращения выходного сигнала/случайное блуждание выходного сигнала	N^2	$\frac{N^2}{\tau}$	N- коэффициент случайного блуждания выходного сигнала

окончание таблицы 1

Белый шум изменения скорости изменения выходного сигнала / случайное блуждание угловой скорости	$\left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2}$	$\frac{K^2\tau}{3}$	К-коэффициент случайного блуждания скорости
Тренд приращения выходного сигнала	$\frac{R^2}{(2\pi f)^3}$	$\frac{R^2\tau^2}{2}$	Р-коэффициент случайного ухода выходного сигнала

Примечание. Величина $\Delta(f_0)$ определяется выражением [19]

$$-\frac{\sin^3 x}{2x^2}(\sin x + 4x\cos x) + C_i(2x) - C_i(4x); C_i(x) = -\int_x^\infty \frac{\cos t}{t} dt, \quad \text{где } x = \pi f\tau.$$

Каждая шумовая характеристика на кривой отклонения Аллана имеет свой наклон (рисунок 3.7), в таблице 2 указаны характерные значения углов наклона для каждой шумовой составляющей.

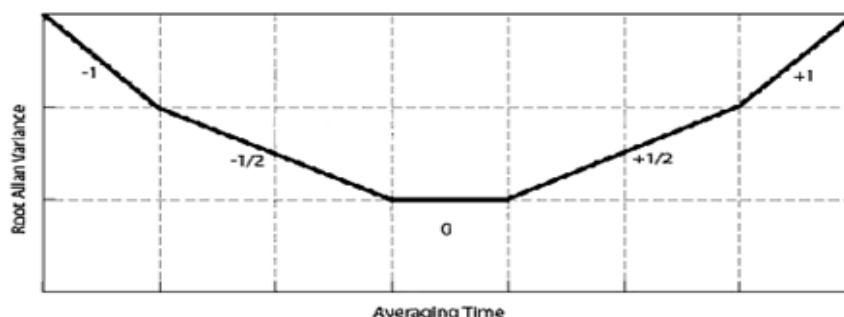


Рисунок 3.7– Характерные наклоны графика кривой отклонения Аллана

Таблица 2

Наклон графика	Тип погрешности шум/вариация
-1	Белый шум квантования
-0,5	Фликкер-шум выходного сигнала
0	Белый шум приращения выходного сигнала
0,5	Белый шум изменения скорости изменения выходного сигнала
1	Тренд приращения выходного сигнала

Для определения интенсивности каждой из шумовых составляющих и оценки ее влияния на выходные параметры требуется получить численные значения коэффициентов многочлена. Один из методов построения наилучшего приближения является метод наименьших квадратов (МНК).

Метод наименьших квадратов – математический метод, применяемый для решения различных задач, основанных на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомым переменных. Метод может быть использован для аппроксимации функции, заданной таблично в виде множества дискретных (точечных) значений.

Суть метода заключается в том, что для выходных данных, полученных экспериментально, отыскивается аналитическая зависимость, сумма квадратов уклонений которой во всех узловых точках должна быть минимальной [18].

Пусть задана система линейно независимых функций $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$ на отрезке $[a, b]$, $m \leq n$. Чтобы построить аналитическое выражение для заданной функции, составляется обобщенный многочлен $\Phi(x)$ из этих функций, при условии что величина

$$J = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - \Phi(x_i)]^2.$$

будет иметь наименьшее возможное значение.

Обобщенный многочлен имеет вид

$$\Phi(x) = c_0 \varphi_0(x) + c_1 \varphi_1(x) + \dots + c_m \varphi_m(x).$$

Если данный многочлен является многочленом наилучшего приближения, то его коэффициенты удовлетворяют системе уравнений

$$\sum_{j=0}^m c_j (\varphi_j, \varphi_k) = (f, \varphi_k),$$

где $k=0, 1, 2, \dots, m$.

Равенства являются необходимым условием достижения минимума величины J : $\frac{\partial J}{\partial c_k} = 0$.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

В результате решения системы линейных уравнений, получают значения коэффициентов аппроксимации c_0, c_1, \dots, c_m .

Аппроксимацию кривой отклонения Аллана выполняем по программе Matlab, так как встроенные функции данного пакета позволяют упростить эту процедуру в несколько раз.

Для аппроксимации данных, полученных методом вариации Аллана, обобщенным многочленом по методу наименьших квадратов, воспользуемся функцией Matlab Curve Fitting Toolbox. Сначала выберем способ аппроксимации, зададим его при помощи команды `fitoptions`. Затем вводим в нее нужную информацию: название метода, алгоритм. Создаем параметрическую модель при помощи функции `fittype`, в качестве этой модели используем обобщенный многочлен (3.4). С помощью функции `fit` определяем коэффициенты аппроксимации.

Данные для численного решения задачи аппроксимации: шаг опроса измерителя (T), аппроксимируемая дискретно заданная функция (sigma2) и аппроксимирующий многочлен (f). На рисунке 3.8 изображен фрагмент программы, отражающий описанные выше действия.

```
format long
s=fitoptions('Method','NonLinearLeastSquares','Algorithm','Trust-
Region','DiffMinChange',
1.0e-8,'DiffMaxChange',0.1,'MaxFunEvals',600,'MaxIter',400,'TolFun',
1.0e-10,'TolX',1.0e-10,'Lower',-Inf,'Upper',Inf);

f=fittype('r^2*x^2/2+k^2*x/3+b^2*2/pi*log(2)+n^2*1/x+q^2*3/x^2','options',s);%
задание аппроксимирующего многочлена
[c2,gof2]=fit(T,sigma2,f)%получение численных коэффициентов
```

Рисунок 3.8—Код для аппроксимации кривой отклонения Аллана

Для визуализации исходных данных и найденной параметрической модели воспользуемся функцией `plot`, численные значения коэффициентов программа выдает автоматически, при применении команды `fit`.

На рисунке 3.9 в логарифмическом масштабе по обеим осям изображен аппроксимирующий многочлен по МНК для кривой отклонения Аллана.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

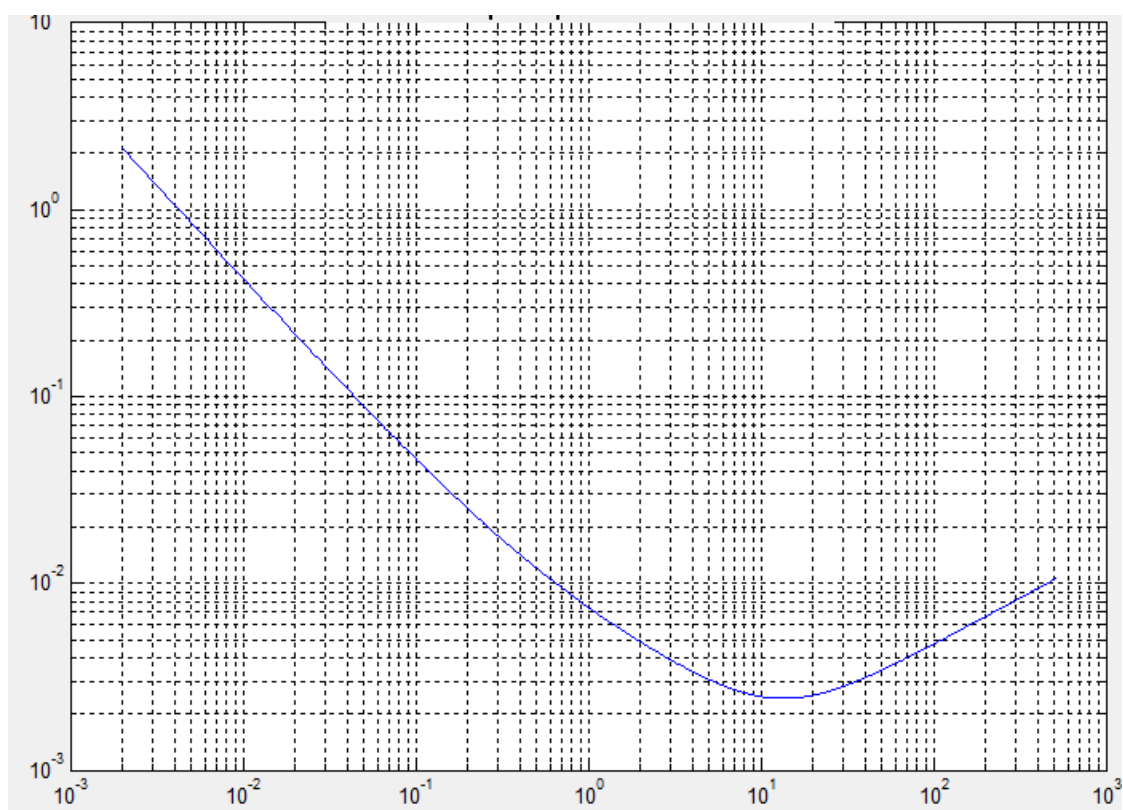


Рисунок 3.9– Аппроксимирующий многочлен

Фрагмент листинга программы, содержащий численные значения коэффициентов для оценки шумовых составляющих ТВГ в режиме ДУС, рассчитанные с 95% точностью (рисунок 3.9)

General model:

$$c2(x) = r^2 * x^2 / 2 + k^2 * x / 3 + b^2 * 2 / \pi * \log(2) + n^2 * 1 / x + q^2 * 3 / x^2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$b = 6.619e-005 \ (-0.1306, 0.1307)$$

$$k = 0.00081 \ (0.0005015, 0.001119)$$

$$n = 0.006153 \ (0.006103, 0.006202)$$

$$q = 0.00245 \ (0.00245, 0.00245)$$

$$r = 1.039e-008 \ (-0.004304, 0.004304)$$

Рисунок 3.10 – Численные значения коэффициентов обобщенного
многочлена

Здесь $b=B$, $k=K$, $n=N$, $q=Q$, $r=R$.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист 46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.4 Организация графического пользовательского интерфейса и результаты работы

Для обработки выходной информации прибора по методу вариации Аллана разработано программное обеспечение с использованием средств среды программного обеспечения Matlab, а так же был организован графический интерфейс. Для реализации графического интерфейса использовано средство визуального программирования GUI (Graphic User Interface), входящая в пакет программ Matlab.

Преимущества программного создания GUI:

- легко создать код, так как весь код для интерфейса генерируется самим Matlab;
- легкое управление кодом (код лучше структурирован, легче создавать новые элементы и удалять старые).

На рисунке 3.11 показано диалоговое окно создания графического интерфейса.

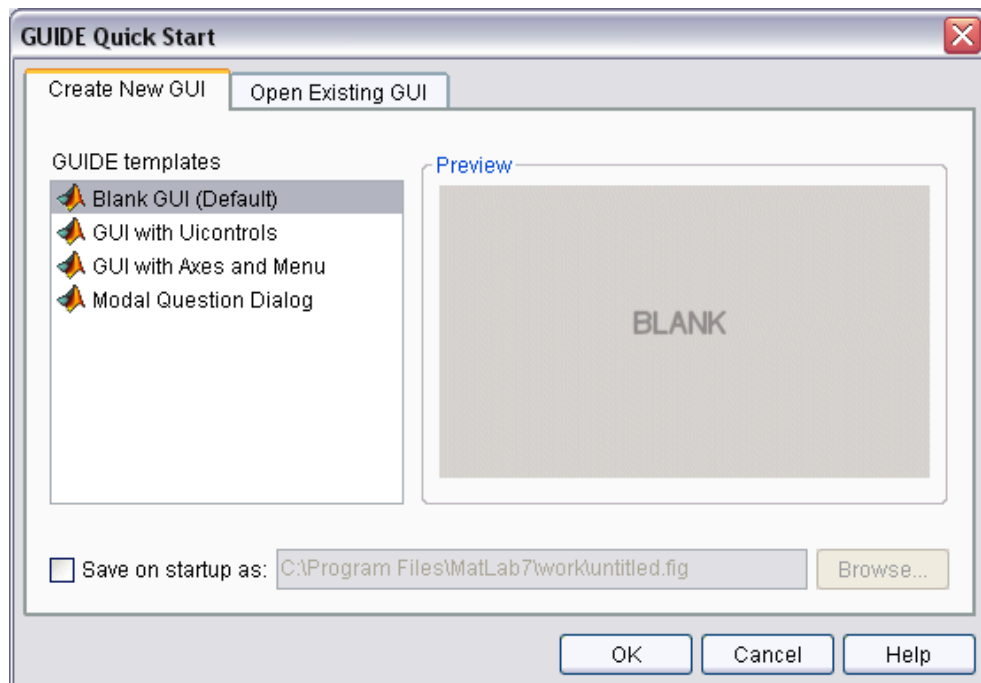


Рисунок 3.11–Диалоговое окно для запуска программы

С помощью вкладки Create New GUI создаем новое приложение, выбрав команду Blank GUI, получим заготовку для создания приложения (рисунок 3.12).

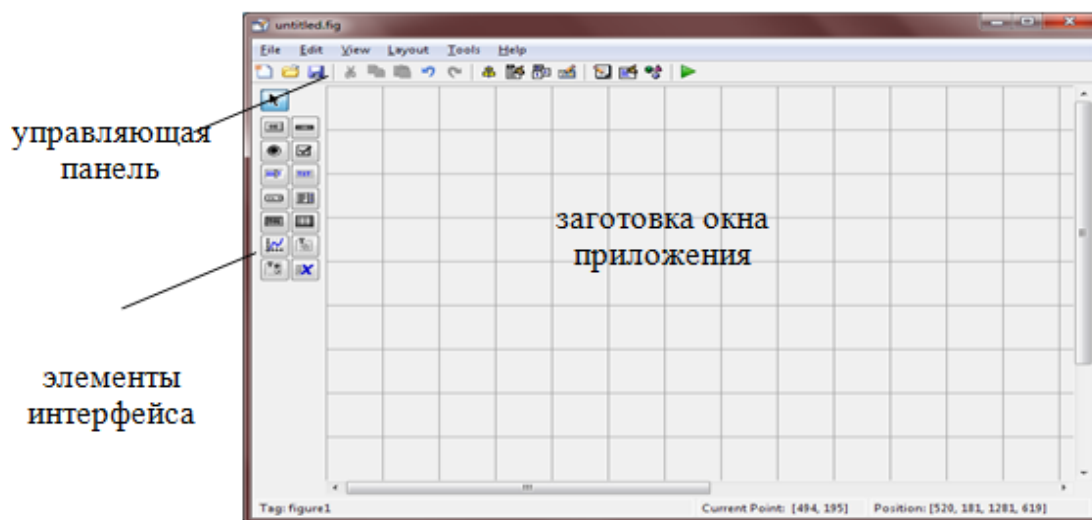


Рисунок 3.12-Среда GUIDE с заготовкой для окна приложения

На рисунке 3.13 показан графический интерфейс для программы расчета вариации Аллана и аппроксимации этой кривой обобщенным многочленом, созданной с помощью среды GUIDE MATLAB.

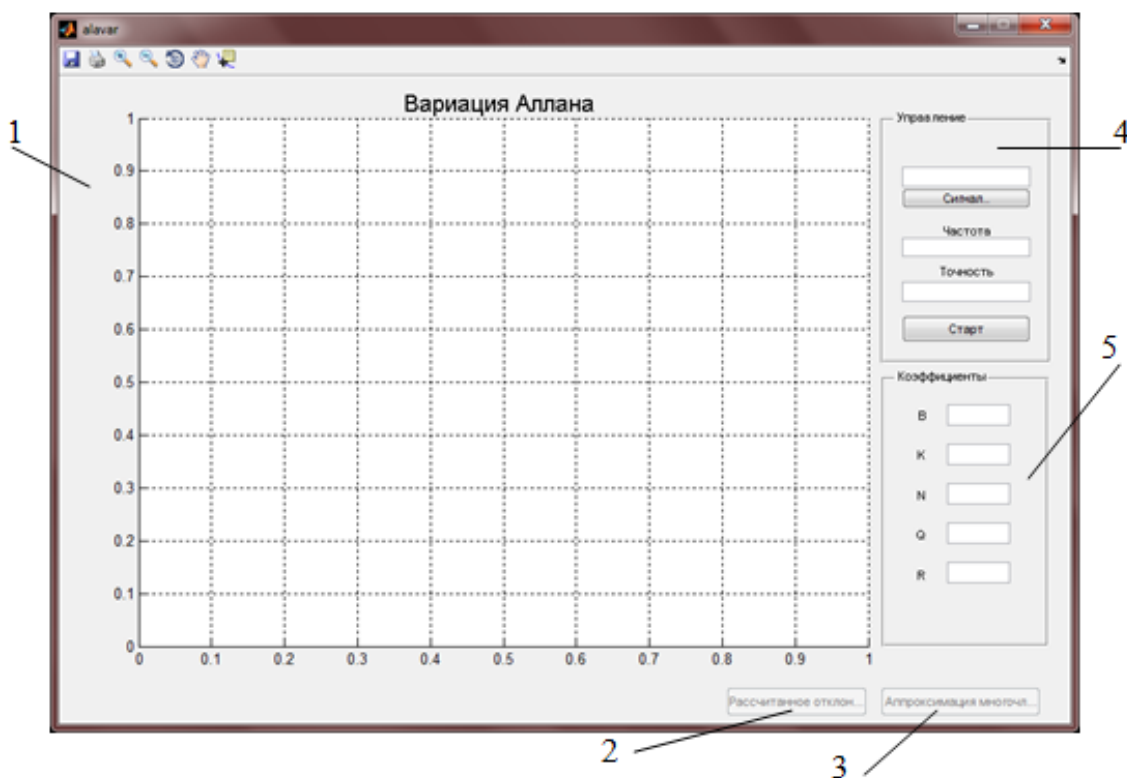


Рисунок 3.13 – графический интерфейс расчета вариации Аллана: 1 – логарифмическая сетка для отображения кривых; 2,3 – кнопки переключения отображения различных кривых; 4 – блок управления программой, 5 – блок отображения коэффициентов аппроксимации.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.04.02.2017.469.00 ПЗ

С помощью блока управления импортируются данные выходного сигнала для дальнейшей обработки в программе, а так же задается точность, с помощью которой определяется число точек для логарифмической сетки и частота, которая определяет шаг. На логарифмической сетке отображаются кривая отклонения Аллана или аппроксимация кривой отклонения Аллана, выбрать нужный график можно с помощью соответствующих кнопок на панели. Численные значения коэффициентов аппроксимации отображаются в поле «коэффициенты».

На рисунке 3.14 и 3.15 показан пример работы программы, отклонение Аллана и аппроксимация кривой отклонения Аллана многочленом соответственно.

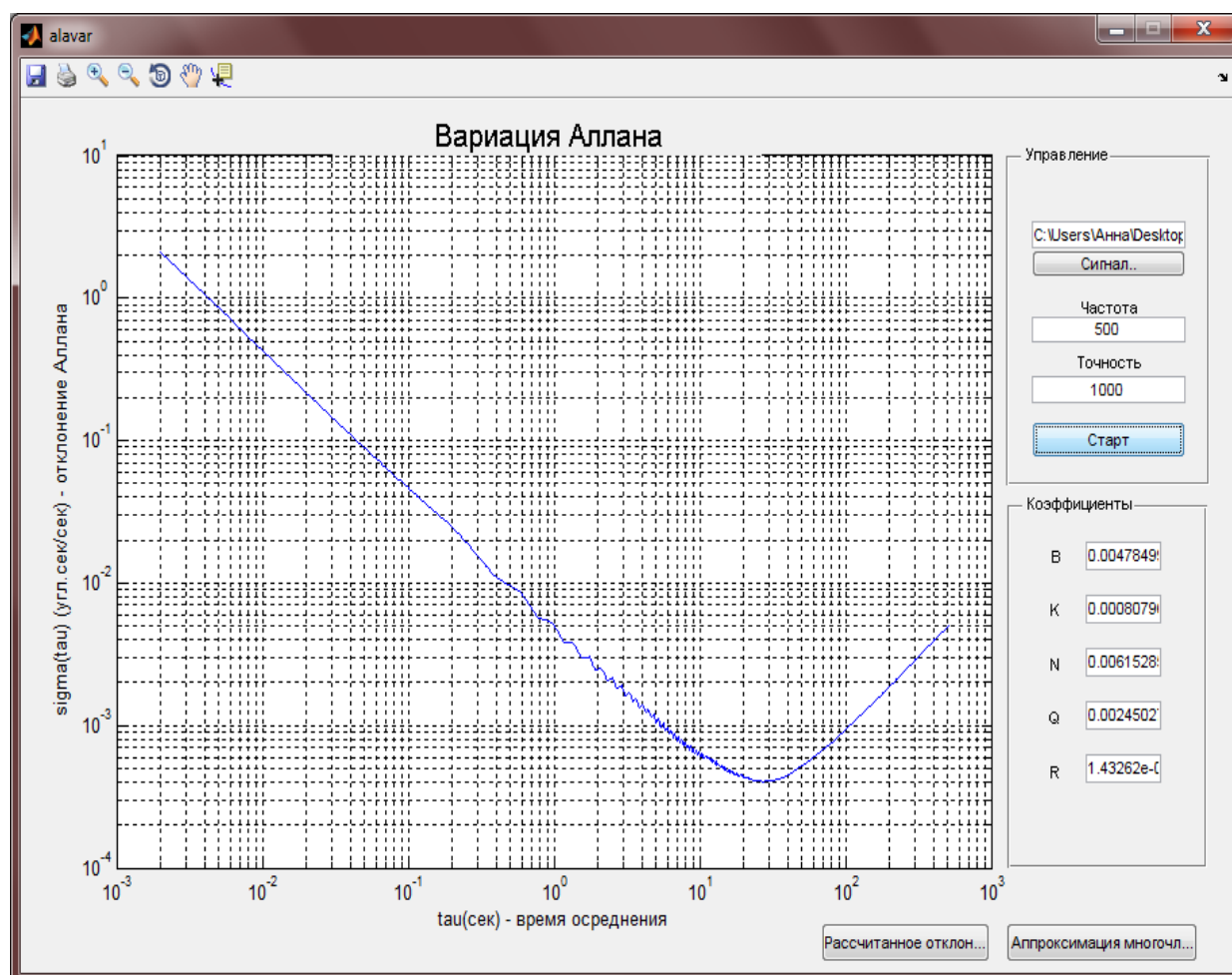


Рисунок 3.14 – Отклонение Аллана на графическом интерфейсе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.04.02.2017.469.00 ПЗ

Лист

49

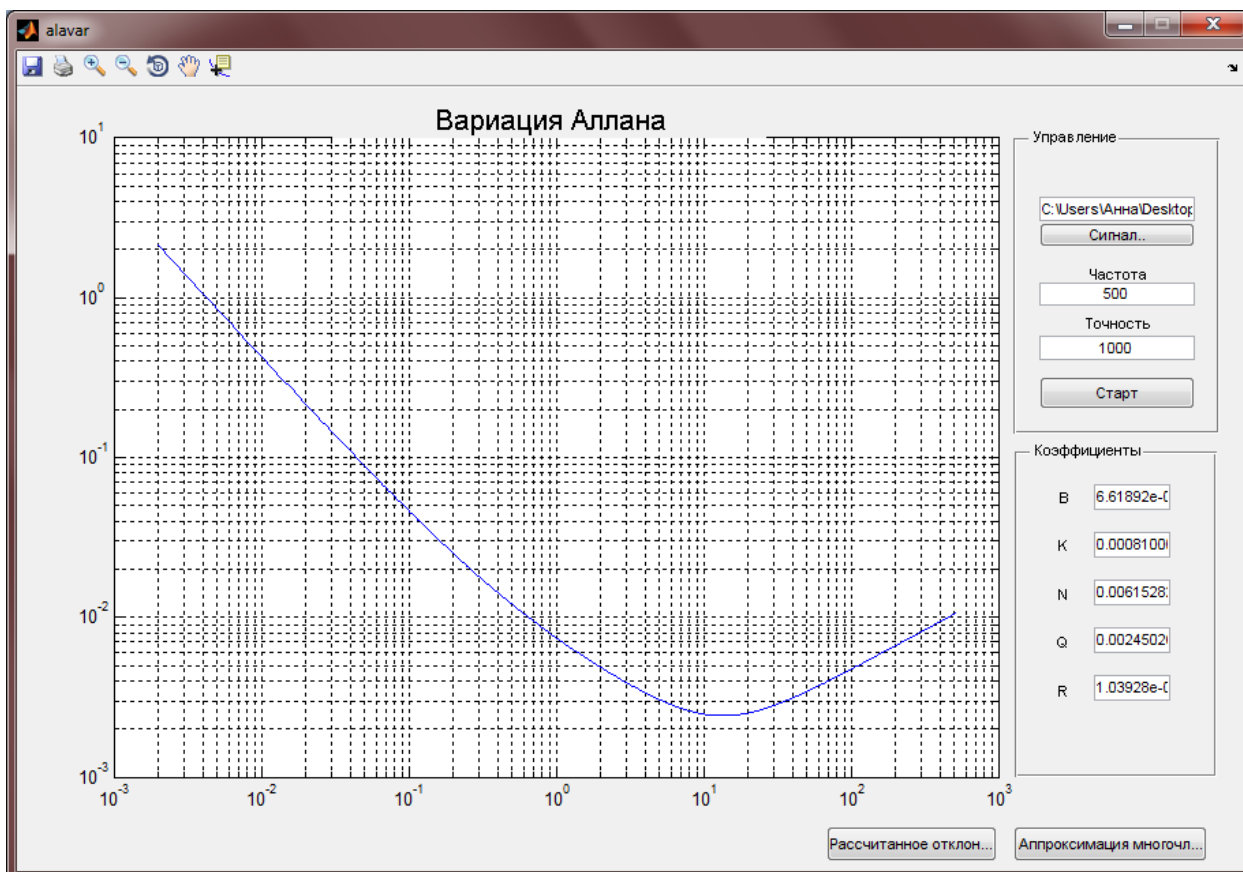


Рисунок 3.15 – Аппроксимация кривой отклонения Аллана многочленом на графическом интерфейсе

После аппроксимации кривой отклонения Аллана получаем численные значения коэффициентов шумовых составляющих:

B – коэффициент нестабильности (дрейфа) нулевого сигнала (смещения нуля), $B = 6,619 \cdot 10^{-5}$ град/с;

K – коэффициент случайного ухода угловой скорости, $K = 8,1 \cdot 10^{-4}$ град/с²;

N – коэффициент случайного углового ухода – спектральной плотности мощности шума, $N = 6,15 \cdot 10^{-3}$ град/√с;

Q – коэффициент шума квантования выходного сигнала, $Q = 2,45 \cdot 10^{-3}$ град;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.04.02.2017.469.00 ПЗ

Лист

50

R – коэффициент линейного изменения угловой скорости, $R = 1,039 \cdot 10^{-8}$ град/с².

Достоверность вычислений по программе косвенно подтверждается на основании сравнения полученных численных результатов с данными для приборов гироскопического типа, полученными по методу вариации Аллана в опубликованных работах. Для сравнения взяты результаты, полученные в работе Д.А. Кутового с соавторами [4] для прибора ВОГ4. Результаты сравнения приведены в таблице 3. Получается, что коэффициенты шумовых составляющих имеют одинаковый порядок.

Таблица 3

Образец гироскопа	Коэффициенты шумовых составляющих				
	B , град/с	$K, \frac{\text{град/с}}{\sqrt{\text{с}}}$	N , град/ $\sqrt{\text{с}}$	Q , град	R , град/с ²
ВОГ4	$7 \cdot 10^{-5}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$	$7,05 \cdot 10^{-3}$	–	$0,891 \cdot 10^{-8}$
ТВГ	$6,619 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$1,039 \cdot 10^{-8}$
Символ «–» указывает на то, что численное значение не определено					

Аппроксимация кривой отклонения Аллана позволила оценить количественный вклад идентифицированных шумов в канале измерения на достоверность оценки измеряемой величины.

Выводы по разделу 3:

- описан метод вариации Аллана и его применение для определения шумовых составляющих в канале изменения ТВГ в режиме ДУС;
- определены численные значение шумовых составляющих путем аппроксимации кривой вариации Аллана обобщенным многочленом методом наименьших квадратов;
- создана программа расчета вариации Аллана в программной системе Matlab для твердотельного волнового гироскопа, работающего в

режиме датчика угловой скорости, и результаты вычислений по программе;

- создана программа графического интерфейса для отображения результатов вычислений кривой Аллана и оценок шумовых составляющих выходного сигнала прибора на ПЭВМ испытательного стенда.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ТВГ – твердотельный волновой гироскоп;

ДУС – датчик угловой скорости;

ДУ – датчик угла;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

БИБ – бесплатформенный инерциальный блок;

ВОГ – волоконно–оптический гироскоп;

БИНС – бесплатформенная инерциальная система;

Д – датчик перемещений;

ЭВМ – электронно–вычислительная машина;

АЦП – аналогово–цифровой преобразователь;

БУ – буферный усилитель;

ДФУ – дифференциальный усилитель;

ВА – вариация Аллана;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

USB (Universal Serial Bus) — универсальная последовательная шина;

txt – файл, содержащий текстовые файлы (формат документа);

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Институт инженеров электротехники и электроники (стандарт);

МНК – метод наименьших квадратов;

GUI (Graphical User Interface) – графический пользовательский интерфейс;

GUIDE – редактор пользовательских интерфейсов в MATLAB.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выпускной квалификационной работы подробно изучен твердотельный волновой гироскоп, режимы его работы, погрешности и съем информации с прибора.

Проведены испытания твердотельного волнового гироскопа разработки АО «ИЭМЗ «Купол» и получены выходные данные испытаний прибора на стенде.

На основе обзора опубликованных работ составлено описание метода вариации Аллана для получения данных о шумовых составляющих выходной информации прибора.

Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее производить расчет вариации Аллана и отклонения Аллана по результатам полученной выходной информации с прибора с последующей аппроксимацией обобщенным многочленом. Создана программа графического пользовательского интерфейса для отображения результатов вычислений кривой Аллана и оценок шумовых составляющих выходного сигнала прибора на ПЭВМ испытательного стенда.

Получены оценки шумовых составляющих выходных сигналов измерителей на примере образца навигационного прибора твердотельного волнового гироскопа в режиме датчика угловой скорости, в результате которых сделан вывод о шумовом спектре измерительной информации прибора.

Созданное программное обеспечение в дальнейшем может использоваться для исследований точностных характеристик навигационных приборов и устройств на позициях предприятия АО «ИЭМЗ «Купол» как эффективный способ идентификации структуры шумов в канале измерения. Численные результаты по коэффициентам шумов твердотельного волнового гироскопа в режиме датчика угловой скорости, рассчитанные по методу вариации Аллана, являются оригинальными и получены впервые.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

В дальнейшем представляет интерес провести тестирование серийных приборов методом вариации Аллана и сравнить полученные результаты с паспортными характеристиками приборов.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б.С. Алешина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: ФИЗМАТЛИЗ, 2006. – 424 с.
2. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.
3. Бранец, В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец – М.: Наука, 1992. – 280 с.
4. Матвеев, В.В. Инерциальные навигационные системы: Учебное пособие / В.В. Матвеев. – Изд-во ТулГУ, 2012. – 199 с.
5. Галамай, А.А. Вопросы реализации на целочисленной ЦВС алгоритма тарировки датчиков в полете по информации от высокоточной ИНС / А.А. Галамай. / Вестник ЮУрГУ. Серия “Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника”. – 2015. – №4. – С. 111-120.
6. Галамай, А.А. Вопросы обеспечения точности при векторном согласовании бесплатформенной инерциальной навигационной системы с высокоточной инерциальной навигационной системой / А.А. Галамай. // Молодежь и будущее авиации и космонавтики. – Москва: МАИ, 2016. – С.247-249.
7. Антонова, М.В. Блочно-модульный принцип конструирования бесплатформенных инерциальных блоков / М.В. Антонова, Д.С. Бородулин, А.А. Волынцев, Е.Ю. Ковалева, Л.З. Новиков, А.И. Терёшкин, И.И. Жегалин. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерная технология, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 101-110.
8. Гавриленко, Ю.В. Особенности контроля информации БИНС при выполнении группового полета / Ю.В. Гавриленко, В. В. Грошев,

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

- Н.А. Зайцев, А. Е. Ярцев. // Труды московского института электромеханики и автоматики. – 2016. – №12. – С.19.
9. Акишин, В.В. Анализ результатов летных испытаний БИНС на вертолете МИ–8/ В. В. Акишин, А. А. Козлов, А. М. Шамлицкий. // Труды московского института электромеханики и автоматики. – 2016. – №12. – С.43.
10. Фомичев, А.В. Результаты совершенствования программно-математического обеспечения системы БИНС-СП-2 по материалам летных испытаний / А. В. Фомичев, С. Е. Кухтевич, Е. А. Измайлов. // Труды московского института электромеханики и автоматики. – 2013. – №7. – С.19-30.
11. Тань Лиго, Планирование маршрута полёта беспилотного летательного аппарата на основе метода частично-целочисленного линейного программирования : дис. ... канд. техн. наук. : 05.13.01/ Тань Лиго. – М., 2016. – 209 с.
12. Вавилова, Н.Б. Определение погрешностей бескарданной инерциальной навигационной системы в режиме рулежки и разгона / Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, А.О. Кальченко. // Труды московского института электромеханики и автоматики. – №84. – С.1-16.
13. Пат. 2486472 Российская Федерация, МПК G01C 21/20. Способ калибровки чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы в полете / Ф.И. Макаrenchенко. – № 2012102723/28; заявл. 26.01.12; опубл. 27.06.13. – 9 с.
14. Пат. 2406973 Российская Федерация, МПК G01C 25/00. Способ калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / А.Г. Андреев, В.С. Ермаков, С.Г. Николаев, А.П. Колеватов. – № 2009104034/28; заявл. 05.02.2009; опубл. 20.12.2010. – 8 с.
15. Кузнецов А.Г., Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы двух классов точности / А.Г. Кузнецов,

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

- Б.И. Портнов, Е.А. Измайлов. – ОАО «московский институт электромеханики и автоматики». – 2014. – № 8. – С. 24-32.
16. Ермаков, В.С. Автоматизация калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем на волоконно-оптических гироскопах; дис... канд. тех. наук / В.С. Ермаков. – Пермь, 2007. – 136 с.
17. Николаев, С.Г. Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем по выходным сигналам модели ошибок / С.Г. Николаев, Ю.В. Ившина. / Научно-технические ведомости СПбГПУ серия “Информационные, управляющие и измерительные системы”. – 2014. – Вып. 4. – С.95-105.
18. Попов, Г.В. Измерение параметров и калибровка микромеханических инерциальных измерительных блоков / Г.В. Попов, О.А. Перлина. / Авиакосмическое приборостроение. – 2014. – №12. – С.38-47.
19. Наинг, М.Х. Метод калибровки блока акселерометров инерциальной навигационной системы на испытательном стенде / М.Х. Наинг. / Научное издание МГТУ ИМ. Н.Э. Баумана серия “Наука и образование”. – 2014. – № 1. – С.38-54.
20. Николаев, С.Г. Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем / С.Г. Николаев. / Изв. ВУЗОВ Приборостроение. – 2009. – Т.52.№7 – С. 50-55.
21. Тювин, А.В. Аналитическая юстировка и калибровка инерциального измерительного блока бесплатформенной инерциальной навигационной системы / А.В. Тювин. / Электронный журнал “Труды МАИ”. – 2012. – №71. – С.1-17.

					24.04.02.2017.469.00 ПЗ	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		