

На правах рукописи



**Королёв Михаил Николаевич**

**Информационно-измерительная система на основе  
гиростабилизатора с волновым твердотельным гироскопом**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие  
системы

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Тула 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

- Научный руководитель:** Кандидат технических наук, доцент  
**Малютин Дмитрий Михайлович**
- Официальные оппоненты:** **Бабичев Виктор Ильич,**  
доктор технических наук, АО «Конструкторское бюро приборостроения им. Академика А.Г. Шипунова», главный конструктор по направлению, г. Тула;  
**Мамон Юрий Иванович,**  
доктор технических наук, АО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения», главный специалист отдела перспективных разработок, г. Тула.
- Ведущая организация:** ПАО «Ростовский оптико-механический завод»

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_\_\_ час. на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Маслова  
Анна Александровна



## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Обзорно-поисковые информационно-измерительные системы (ОПИИС) на базе индикаторных гиросtabilизаторов (ГС) осуществляют: обзор наземного и воздушного пространства, обнаружение, распознавание объектов, выявление препятствий по курсу полёта летательного аппарата, измерение наклонной дальности до объектов, а также выполнение специальных задач (разведка, поиск), получения информации об угловых параметрах каналов технического зрения в режиме стабилизации и управления.

ОПИИС состоят из каналов технического зрения (видимого спектрального диапазона и инфракрасного диапазона) и индикаторного ГС. ОПИИС широко используются на объектах гражданского назначения (проведение поисково-спасательных работ, охрана правопорядка и борьба с преступностью, выполнение геодезических и картографических исследований, реализация рекламных и бизнес-идей, фото- и видеосъемка спортивных мероприятий и т.д.).

Анализ литературных источников свидетельствует, что сегодня достаточно подробно рассмотрены вопросы устойчивости и синтеза ОПИИС, но, несмотря на это, актуальными остаются задачи исследования динамики ОПИИС на основе индикаторных ГС в связи с успешным развитием новых типов гироскопов и совершенствованием следящих систем.

Анализ технических характеристик ОПИИС показал, что данные системы имеют широкие углы проочки, обладают высокой точностью стабилизации платформы (25 – 250 мкрад). Большинство ГС ОПИИС строятся на динамически настраиваемых гироскопах (ДНГ), волоконно-оптических гироскопах (ВОГ), а системы класса «мини» - на микромеханических гироскопах (ММГ). Разработкой подобных систем занимаются следующие фирмы и организации: «Пергам» (Москва, Россия), ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» (Красногорск, Россия), кафедра «Приборы управления» (Тульский Государственный университет) АО ПО УОМЗ (Екатеринбург, Россия), фирма «iXBlue Photonics» (Франция), фирма «DST CONTROL» (Швеция), фирма «JOHO» (Китай), фирма «Ascent Vision Technologies» (США), фирма «Nortrop» (Германия) и т.д.

Решение задачи увеличения ресурса, снижения стоимости ОПИИС, при обеспечении высоких точностных характеристик и малого времени готовности может быть решена путем использования в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) волнового твердотельного гироскопа (ВТГ).

ВТГ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами гироскопов: высокий рабочий ресурс, малые весогабаритные характеристики, малая энергоёмкость, сохранение работоспособности при кратковременном отключении питания, малое время готовности, слабая температурная зависимость выходного сигнала, стойкость к ионизирующему излучению с высокой энергией, высокое отношение точность/цена. При этом, у ВТГ имеются сле-



дующий недостаток: необходима поддержка высокой степени вакуума в приборе.

В настоящее время вопрос достижения потенциально возможных метрологических характеристик ОПИИС на базе индикаторных ГС на ВТГ не является полностью решенным. Решение данного вопроса требует разработки математической модели ОПИИС, которая отличается от известных описанием особенностей функционирования системы на основе сигналов ВТГ в совмещенном режиме стабилизации и управления, получение аналитических выражений для анализа устойчивости и динамической точности ОПИИС на ВТГ. Кроме того, необходима разработка структур построения усилительно-преобразующих трактов (УПТ) контуров стабилизации ОПИИС на ВТГ, обеспечивающих высокие точностные характеристики. На основании вышеуказанного сформулированы цели и задачи работы.

**Объектом исследования** является обзорно-поисковая информационно-измерительная система на волновом твердотельном гироскопе.

**Предметом исследования** являются математическое описание обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе в совмещенном режиме стабилизации и управления и исследование особенностей функционирования обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является повышение ресурса системы, уменьшение стоимости обзорно-поисковой информационно-измерительной системы при обеспечении высокой точности функционирования и малого времени готовности за счет применения в качестве чувствительного элемента волнового твердотельного гироскопа и эффективной структуры построения контуров стабилизации и управления системы.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

1) Рассмотрены обзорно-поисковые информационно-измерительные системы, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью.

2) Проведен анализ чувствительных элементов индикаторных гироскопических стабилизаторов обзорно-поисковых информационно-измерительных систем отечественных и зарубежных производителей; выявлены их достоинства, недостатки, отмечены области их применения.

3) Разработана математическая модель гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе, отличающаяся от известных описанием особенностей функционирования системы на основе сигналов волнового твердотельного гироскопа в совмещенном режиме стабилизации и управления.

4) С помощью имитационной модели получено численное решение нелинейной системы уравнений, включающей уравнения движения стабилизированной платформы, волнового твердотельного гироскопа и дифференциальные уравнения кинематики движения карданова подвеса.

5) Разработана структура построения усилительно-преобразующих трактов контуров стабилизации обзорно-поисковой информационно-



измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе, обеспечивающая высокие точностные характеристики.

б) Выполнен анализ динамики обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана математическая модель гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе, отличающаяся от известных описанием особенностей функционирования системы на основе сигналов волнового твердотельного гироскопа в совмещенном режиме стабилизации и управления, получены аналитические выражения для анализа устойчивости и точности гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе.

2. Разработана структура построения усилительно-преобразующих трактов контуров стабилизации и управления гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе.

3. С помощью имитационной модели решена сложная нелинейная система дифференциальных уравнений, описывающая функционирование гироскопического стабилизатора на волновом твердотельном гироскопе, даны прогнозные оценки точности функционирования системы в реальных условиях эксплуатации на борту подвижного объекта.

**Теоретическая значимость работы:** разработана имитационная модель обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе, развивающая теорию гироскопических систем.

**Практическая значимость работы:** математическое описание, имитационная модель являются базой для проектирования и модернизации двухосных обзорно-поисковых информационно-измерительных систем на волновом твердотельном гироскопе, позволяют сократить затраты и время на проектирование.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовался комплексный метод исследования, который характеризуется применением методов математического моделирования, математического анализа, теории автоматического управления.

Теоретические предпосылки к разработке таких систем были созданы трудами отечественных и зарубежных ученых: Пельпор Д.С., Матвеев В.А., Подчерзцев В.П., Берлин И.Б., Распопов В.Я., Брозгуль Л.И., Мелешко В.В., Степанковский Ю.В., Власов Ю.Б., Северов Л.А., Филимонов О.М., Кацай Д.А., Фатеев В.В., Клюев В.Ю., Лысов А.Н., Неусыпин А.К., Родионов В.И., Малютин Д.М., Engelder P.D., Fosster W.C., Burdess J.S., Ebner R.E. др.

**Личный вклад автора** определяется общей формулировкой и обоснованием целей и задач исследований, выбором методов их решения; разработкой рекомендаций по использованию волнового твердотельного гироскопа в качестве чувствительного элемента индикаторных гироскопических ста-



билизаторов обзорно-поисковых информационно-измерительных систем; разработкой математической модели гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе.

**Достоверность результатов** и выводов диссертационной работы подтверждена экспериментальной частью исследования. Результаты работы внедрены на:

1. ПАО «Красногорский механический завод им. С. А. Зверева» в отделе унифицированных систем стабилизации.

2. Кафедре «Приборы управления» Тульского Государственного университета при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам: «Современные проблемы систем управления и навигации», «Следящие системы с оптико-электронными координаторами».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе в совмещенном режиме стабилизации и управления и аналитические выражения для анализа устойчивости и точности гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе.

2. Модель в среде Matlab-Simulink системы в совмещенных режимах стабилизации и управления.

3. Результаты исследования динамики гироскопического стабилизатора обзорно-поисковой информационно-измерительной системы на волновом твердотельном гироскопе.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования (п. 6 «Исследование возможностей и путей совершенствования и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических, эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений») специальности 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических и практических конференциях:

- IX региональная молодежная научно-практическая конференция Тульского Государственного Университета «Молодежные инновации», 2015 г., г. Тула;

- Научно-техническая конференция «Оптико-электронные приборы и системы. Прием, обработка и получение оптической информации. Аппаратура, режимы, алгоритмы», 2015г., г. Красногорск;

- 10-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2017», 2017 г., г. Минск, Респ. Беларусь;

- 12-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2019», 2019 г., г. Минск, Респ. Беларусь;



- XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2020 г., г. Санкт-Петербург, Россия.

**Публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 8 печатных работах, из них: 4 работы в изданиях, вошедших в перечень рекомендованных ВАК РФ, 3 работы в сборниках трудов международных научно-технических конференций, 1 статья в сборнике, представленном в базе данных Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения. Работа изложена на 133 страницах основного текста и иллюстрируется 77 рисунками и 12 таблицами, 118 наименований используемых источников. Отдельные выводы даны в конце каждого раздела, основные теоретические и практические результаты – в заключении диссертации.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы и сформулирована цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведены структурные и конструктивные особенности ОПИИС на базе индикаторных ГС: приводятся технические характеристики ОПИИС отечественных и зарубежных исполнителей, показано в каких областях они применяются.

На основании анализа литературных источников показано, что точность ОПИИС определяется, как точностью системы стабилизации, обеспечивающей совмещение платформы с опорной системой координат, так и точностью самой опорной системы, где гироскоп играет роль ЧЭ, моделирующего опорную систему координат.

Проведенный анализ ЧЭ, используемых в индикаторных ГС, показал, что перспективным ЧЭ является ВТГ. Данный гироскоп относится гироскопам среднего класса точности, однако имеет меньшую стоимость и небольшие размеры по сравнению с гироскопами высокого класса точности, имеет высокий рабочий ресурс, малую энергоемкость, малое время готовности, слабую зависимость выходного сигнала от температуры (следовательно, возможность функционирования в широком диапазоне температур), высокое отношение точность/цена, малое число функциональных элементов, и, следовательно, повышенную надежность. Отмечается, что перечисленные выше факторы обуславливают достоинства ОПИИС на ВТГ.

Выявлено, что на сегодняшний день математическая модель ОПИИС на ВТГ, учитывающая особенности функционирования системы в совмещенном режиме стабилизации и управления разработана недостаточно.

**Во второй главе** разработана математическая модель ГС ОПИИС на ВТГ: выводятся дифференциальные уравнения (1), описывающие движения двухосного ГС с учетом особенностей функционирования ВТГ.



$$\begin{aligned}
& \frac{\omega_{x2} J_\alpha}{\cos \beta} + \frac{d_\alpha \omega_{x2}}{\cos \beta} = M_\alpha^{ds} + d_\alpha (\omega_\xi - \omega_{z1} \operatorname{tg} \beta) - M_{\alpha l} \operatorname{sign} \left( \frac{\omega_{x2}}{\cos \beta} + \omega_{z1} \operatorname{tg} \beta - \omega_\xi \right) - k_\alpha^{TT} \alpha + \\
& + (m_{II} \Delta_{II} + m_P \Delta_P) (a_y - a_z) - J_\alpha^{pom} \omega_{x1} + \omega_{x2} \omega_{y1} \sin \beta \left( \frac{J_\alpha}{\cos^2 \beta} + (J_{z2}^{II} - J_{x2}^{II}) \right) - \\
& - \omega_{x2} \omega_{y2} \sin \beta \left( \frac{J_\alpha}{\cos^2 \beta} + 2(J_{z2}^{II} - J_{x2}^{II}) \right) - \omega_{z1} \operatorname{tg} \beta (J_{x1}^P + J_{z2}^{II}) - \\
& - \omega_{y2} \omega_{z1} \left( \frac{(J_{x1}^P + J_{z2}^{II})}{\cos^2 \beta} - J_{y2}^{II} \right) + \omega_{y1} \omega_{z1} \left( \frac{J_{x1}^P}{\cos^2 \beta} + J_{z2}^{II} \operatorname{tg}^2 \beta - J_{z1}^P + J_{y1}^P \right) \\
& J_{y2}^{II} \omega_{y2} + d_\beta \omega_{y2} = M_\beta^{ds} + d_\beta \omega_{y1} - M_{\beta r} \operatorname{sign} (\omega_{y2} - \omega_{y1}) - k_\beta^{TT} \beta + (m_{II} \Delta_{II} + m_P \Delta_P) (a_z - a_x) - \\
& - J_\alpha^{pom} \omega_{x1} - \omega_{x2} \omega_{z2} (J_{x2}^{II} - J_{z2}^{II}) \\
& \begin{cases} \omega_{x1} \\ \omega_{y1} \\ \omega_{z1} \end{cases} = \begin{pmatrix} \omega_\xi + \alpha \\ \omega_\eta \cos \alpha + \omega_\zeta \sin \alpha \\ -\omega_\eta \sin \alpha + \omega_\zeta \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} \omega_{x2} \\ \omega_{y2} \\ \omega_{z2} \end{cases} = \begin{pmatrix} \omega_{x1} \cos \beta - \omega_{z1} \sin \beta \\ \omega_{y1} + \beta \\ \omega_{z1} \cos \beta + \omega_{x1} \sin \beta \end{pmatrix} \quad (1) \\
& U_{\alpha x1}(p) \left( \frac{1}{k_{wig2} k_{wig3}} p^2 + \frac{T_{wig} k_{wig1} k_{wig3} + 1}{T_{wig} k_{wig2} k_{wig3}} p + 1 \right) = \omega_{x2}(p) K_b U_{\alpha x1} \left( \frac{k_{wig1}}{k_{wig2}} p + 1 \right) \\
& U_{\alpha x2}(p) \left( \frac{1}{k_{wig2} k_{wig3}} p^2 + \frac{T_{wig} k_{wig1} k_{wig3} + 1}{T_{wig} k_{wig2} k_{wig3}} p + 1 \right) = \omega_{y2}(p) K_b U_{\alpha x2} \left( \frac{k_{wig1}}{k_{wig2}} p + 1 \right) \\
& u_\alpha(p) = U_{\alpha x1}(p) \cdot \frac{k_{kz1} (T_{kz1} p + 1)}{p}, \quad u_\beta(p) = U_{\alpha x2}(p) \cdot \frac{k_{kz2} (T_{kz2} p + 1)}{p} \\
& M_\alpha^{ds} = \frac{k_{ds} u_\alpha(p) - M_\alpha^{ds}}{T_{ds}}, \quad M_\beta^{ds} = \frac{k_{ds} u_\beta(p) - M_\beta^{ds}}{T_{ds}} \\
& \alpha = \int_0^t \left( \frac{\omega_{x2}}{\cos \beta} + \omega_{z1} \operatorname{tg} \beta - \omega_\xi \right) dt, \quad \beta = \int_0^t (\omega_{y2} - \omega_{y1}) dt, \quad \varepsilon_x = \int_0^t \omega_{x2} dt, \quad \varepsilon_y = \int_0^t \omega_{y2} dt,
\end{aligned}$$

где:  $J_{x1}^P, J_{y1}^P, J_{z1}^P$  и  $J_{x2}^{II}, J_{y2}^{II}, J_{z2}^{II}$  - моменты инерции рамы и платформы относительно главных осей;  $J_\alpha$  - приведенный момент инерции платформы;  $M_{\alpha l}, M_{\beta r}$  - амплитуды моментов сил сухого трения в осях подвеса платформы;  $d_\alpha, d_\beta$  - коэффициенты демпфирования;  $m_P, m_{II}$  - масса рамы и платформы;  $\Delta_P, \Delta_{II}$  - смещения центра масс рамы и центра масс платформы;  $a_x, a_y, a_z$  - проекции вектора линейного ускорения;  $k_\alpha^{TT}, k_\beta^{TT}$  - коэффициенты упругости токоподводов;  $J_\alpha^{pom}, J_\beta^{pom}$  - приведенные моменты инерции роторов, создаваемые двигателем стабилизации (ДС) в безредукторном варианте;  $\alpha, \beta$  - относительные угловые скорости платформы,  $\alpha, \beta$  - интегралы от относительных угловых скоростей платформы;  $\omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{z2}$  - абсолютные угловые скорости платформы;  $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$  - угловые скорости рамы;  $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$  - угловые скорости основания;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  - погрешности стабилизации, определяемые как интегралы от абсолютных угловых скоростей платформы;  $k_{ds}, T_{ds}$  - коэффициент



передачи и постоянная времени ДС;  $u_{\alpha, \beta}$  – управляющий сигнал на выходе усилителя мощности,  $M_{\alpha}^{ds}$ ,  $M_{\beta}^{ds}$  – моменты разгрузки ДС;  $U_{ex1}$ ,  $U_{ex2}$  – входное напряжение ВТГ1 и ВТГ2 соответственно;  $U_{вых1}$ ,  $U_{вых2}$  – выходное напряжение ВТГ1 и ВТГ2 соответственно;  $K_b$  – коэффициент Брайана;  $k_{wtg1}$ ,  $k_{wtg2}$ ,  $k_{wtg3}$  – коэффициенты передачи в контурах регулирования ВТГ,  $T_{wtg}$  – постоянная времени ЧЭ ВТГ;  $k_{kz1}$ ,  $k_{kz2}$  – коэффициенты усиления контуров стабилизации;  $T_{kz1}$ ,  $T_{kz2}$  – постоянные времени издромных звеньев.

Система полученных уравнений позволяет провести анализ и синтез контуров управления, разработать имитационную модель ГС на ВТГ.

Основная задача **третьей главы** – анализ и синтез контуров управления ГС ОПИИС на ВТГ. Проведена линеаризация системы дифференциальных уравнений (1), описывающих динамику ГС ОПИИС на ВТГ. Приведены структурные схемы каналов стабилизации и управления. Получены передаточные функции разомкнутой и замкнутой цепи контура стабилизации и управления (рис. 1).

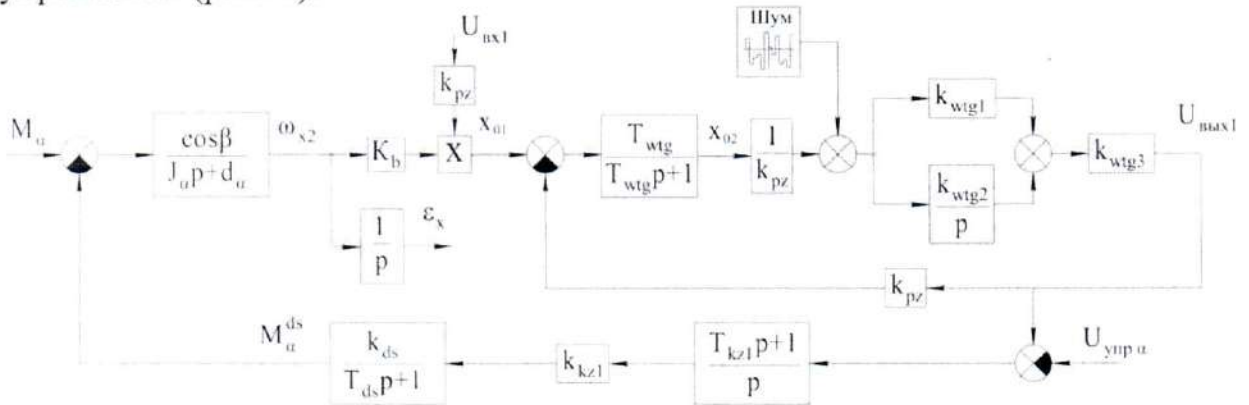


Рисунок 1 – Структурная схема одного канала стабилизации и управления ГС ОПИИС

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $U_{ex1}$  – входное напряжение ВТГ,  $U_{вых1}$  – выходное напряжение ВТГ;  $U_{упр \alpha}$  – напряжение управления по каналу  $\alpha$ ;  $k_{pz}$  – коэффициент передачи пьезоэлементов;  $x_{01}$ ,  $x_{02}$  – деформация кромки резонатора ВТГ1;  $M_{\alpha}$  – возмущающий момент.

Для определения параметров контуров регулирования ВТГ в режиме датчика угловой скорости (ДУС) использовалась передаточная функция разомкнутой системы ВТГ с пропорционально-интегральным регулятором по огибающей выходного сигнала (2).

$$W_{раз}(p) = \frac{K_b U_{ex} k_{pz} T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3} \left( \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{(T_{wtg} p + 1) p}. \quad (2)$$

Для определения полосы пропускания и динамической точности ГС использована передаточная функция замкнутой схемы ВТГ в режиме ДУС с пропорционально-интегральным регулятором по огибающей выходного сигнала:



$$W_{зам}(p) = \frac{U_1(p)}{\omega_{y2}(p)} = \frac{K_b U_{ax} \left( \frac{k_{w1g1}}{k_{w1g2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{w1g2} k_{w1g3}} p^2 + \frac{T_{w1g} k_{w1g1} k_{w1g3} + 1}{T_{w1g} k_{w1g2} k_{w1g3}} p + 1} \quad (3)$$

На основании передаточных функций (3), (4) построены логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) разомкнутой (рис. 2) и замкнутой (рис. 3) систем ВТГ в режиме ДУС с пропорционально - интегральным регулятором.

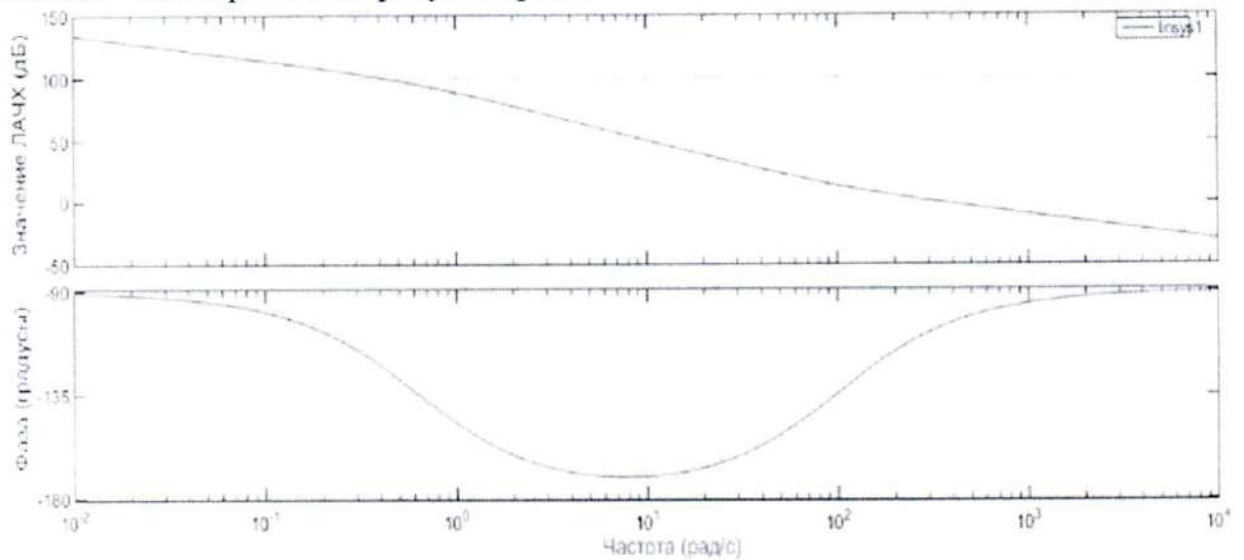


Рисунок 2 - ЛАФЧХ разомкнутой системы ВТГ с пропорционально - интегральным регулятором.

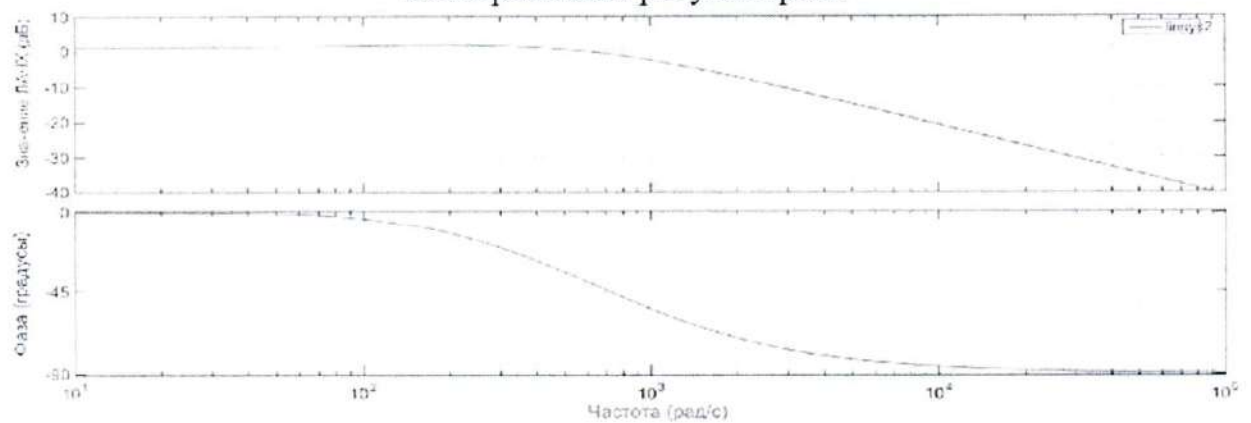


Рисунок 3 - ЛАФЧХ замкнутой системы ВТГ с пропорционально - интегральным регулятором

Согласно рис. 2 система устойчива, запас по фазе в разомкнутой системе составляет  $73,4^0$ , а из рис. 3 видно, что полоса пропускания ВТГ равна 140 Гц.

На рис. 4 приведен график переходного процесса выходного сигнала ВТГ, как реакция на ступенчатое входное воздействие с амплитудой 500 град/с. Величина перерегулирования составляет 8%, а время переходного процесса 0,02 с.



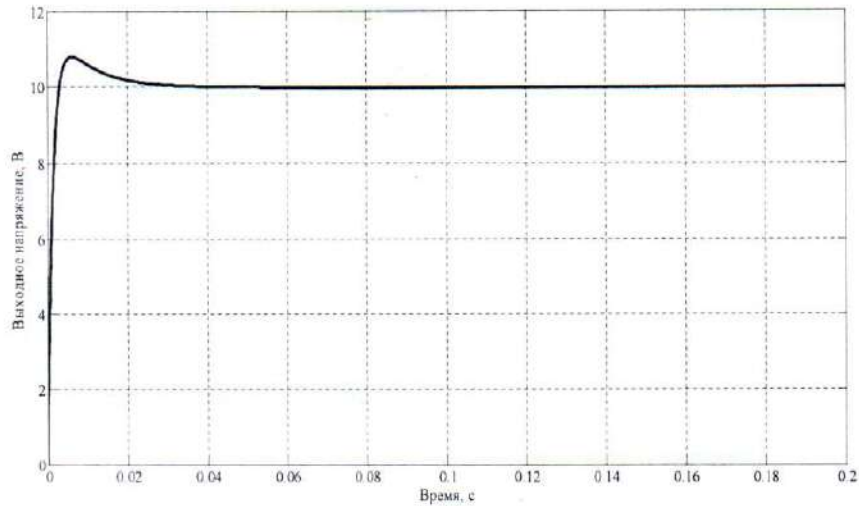


Рисунок 4 - График выходного напряжения ВТГ, как реакция на ступенчатое воздействие

Передаточная функция разомкнутой цепи контура стабилизации имеет вид

$$W_{раз}(p) = \frac{K_3(T_1 p + 1)(T_{kz1} p + 1)}{p(J_\alpha p + d_\alpha)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)(T_{ds} p + 1)}. \quad (4)$$

Передаточная функция замкнутой цепи (5) контура стабилизации имеет вид

$$W_{зам}(p) = \frac{\varepsilon_x(p)}{M(p)} = \frac{p(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)(T_{ds} p + 1)}{p(J_\alpha p + d_\alpha)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)(T_{ds} p + 1) + K_2 k_{kz1} k_{ds} (T_1 p + 1)(T_{ds} p + 1)}, \quad (5)$$

где  $T_1$  – постоянная времени, определяемая следующим образом:

$$T_1 = \frac{k_{wig1}}{k_{wig2}}. \quad (6)$$

На рис. 5, 6 приведены ЛАФЧХ разомкнутой и замкнутой системы контура стабилизации.

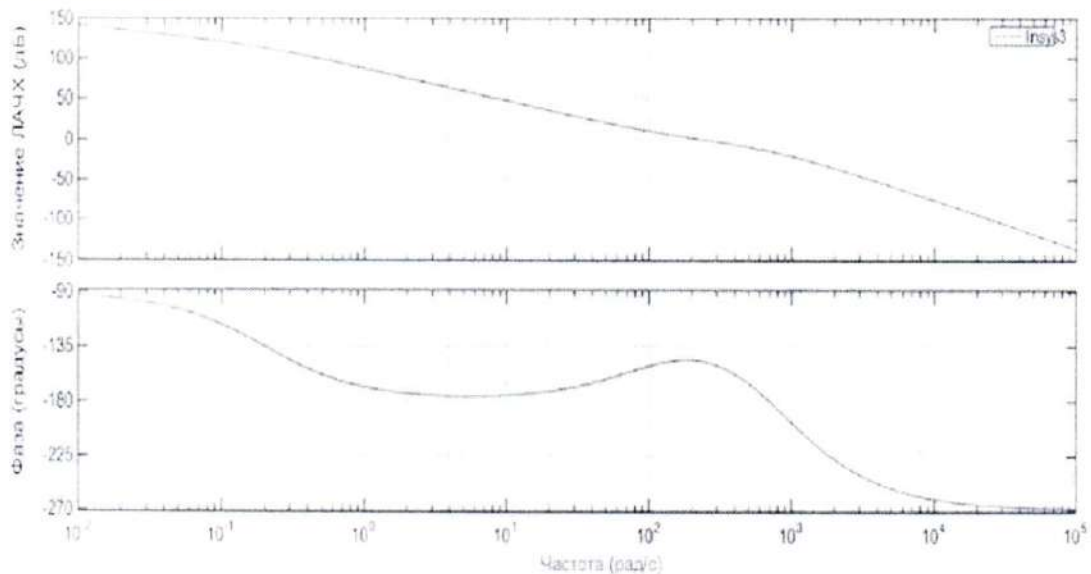


Рисунок 5 – ЛАФЧХ разомкнутой системы контура стабилизации



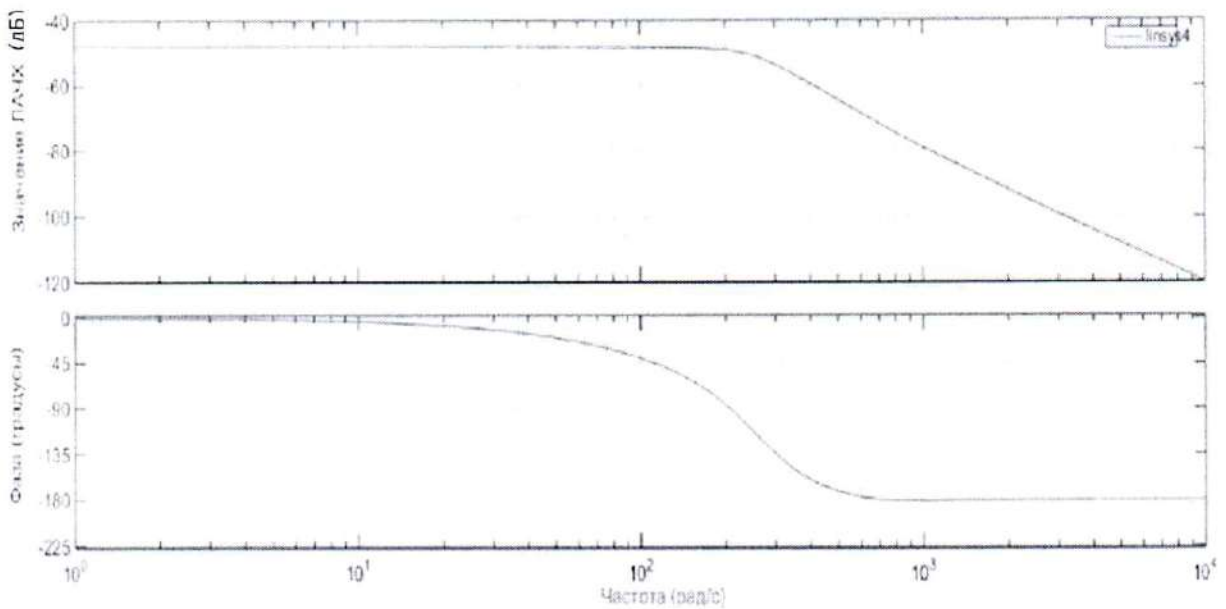


Рисунок 6 – ЛАФЧХ замкнутой системы контура стабилизации

Анализ рис.5, рис.6 показывает, что система устойчива. Запас по фазе составляет  $33,2^{\circ}$ , а запас по амплитуде составляет  $-14,4$  дБ, полоса пропускания ГС равна  $40$  Гц. Значение ЛАЧХ в полосе пропускания  $-42$  дБ.

Передаточная функция контура управления:

$$W(p) = \frac{\varepsilon_x(p)}{U_{упр}(p)} = \frac{k_{kz1} k_{ds} (T_{kz1} p + 1) (T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}{p [p (T_{ds} p + 1) (J_a p + d_a) (T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1) + K_3 (T_{kz1} p + 1) (T_1 p + 1)]} \quad (9)$$

ЛАФЧХ одного канала контура управления приведена на рис. 7.

Полученные передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем контуров стабилизации и управления ГС на ВТГ позволяют проводить анализ устойчивости и динамической точности одного канала ОПИИС.

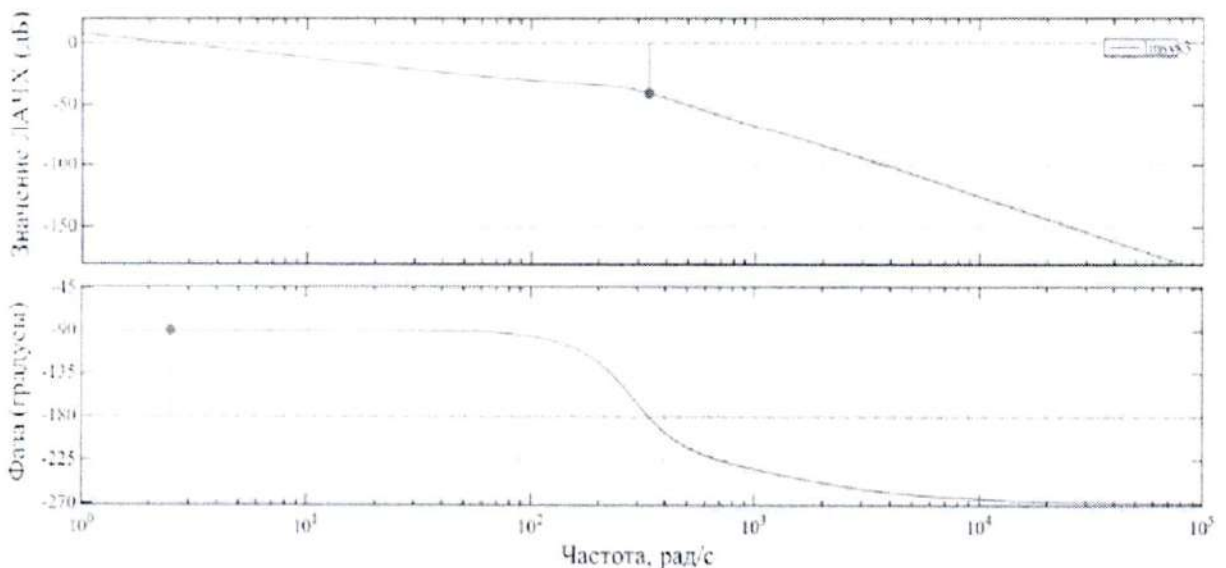


Рисунок 7 – ЛАФЧХ замкнутой системы контура управления

На рис. 8 показан график погрешности стабилизации при единичном ступенчатом воздействии. Значение погрешности стабилизации не превышает  $3,6 \cdot 10^{-3}$  рад, что соответствует характеристикам современных ОПИИС.



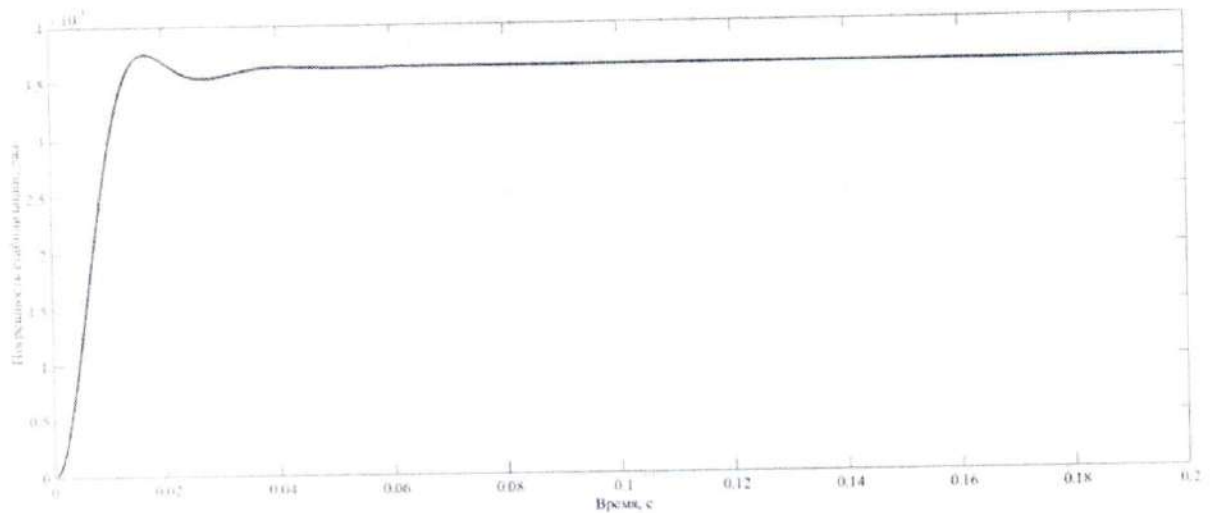


Рисунок 8 – График погрешности стабилизации при единичном ступенчатом воздействии

На структурной схеме рис. 9 учитывается влияние перекрестных связей между каналами системы. Полученная структурная схема позволяет построить имитационную модель ОПИИС.

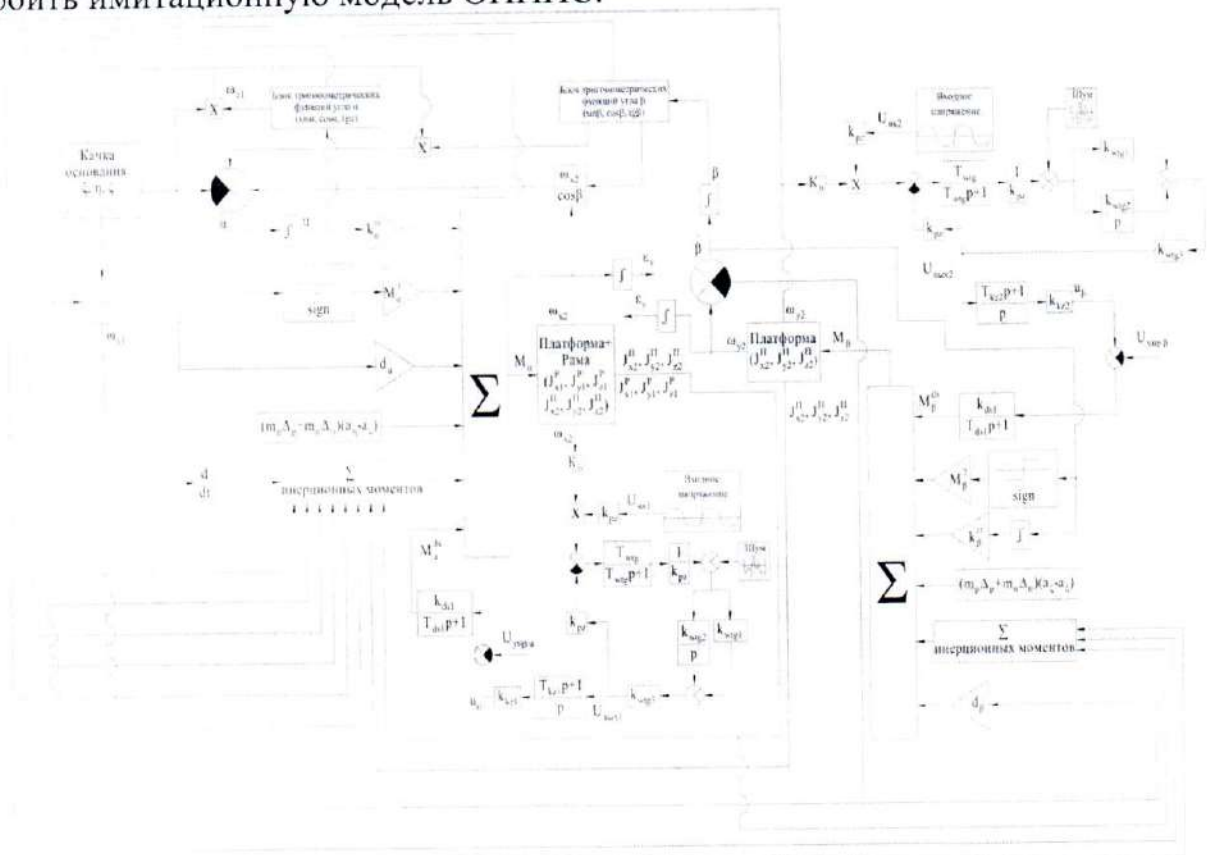


Рисунок 9 – Структурная схема каналов ОПИИС с учетом перекрестных связей

В четвертой главе разработана имитационная модель ГС ОПИИС (рис.10), соответствующая структурной схеме рис. 9, позволяющая получить численное решение сложной, нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающих функционирование ГС на ВТГ при трехкомпонентной качке основания, и приведены результаты динамических исследований ОПИИС на ВТГ.

На основании структурной схемы (рис. 9) выполнена модель ОПИИС системы в среде Matlab-Simulink.

Моделирование контура стабилизации проведено при следующих параметрах: момент инерции платформы  $J_{\alpha}=0,01$  кг·м<sup>2</sup>, коэффициент демпфирования  $d_{\alpha}=0,002$  Н·м·с, постоянная времени корректирующего звена  $T_{kz1}=0,008$  с, коэффициент усиления корректирующего звена  $k_{kz1}=1575$ , постоянная времени ДС  $T_{ds}=0,001$  с, коэффициент передачи по моменту ДС  $k_{ds}=0,438$  Н·м/В.

Имитационная модель позволяет вводить (и изменять в ходе моделирования) следующие данные:

- 1) Параметры качки основания;
- 2) Значения моментов инерции рамы и платформы.
- 3) Параметры возмущающих моментов, действующих по оси вращения рамы и платформы.
- 4) Характеристики ВТГ (входное напряжение, постоянная времени, шумовая составляющая, коэффициент передачи пьезоэлементов).
- 5) Параметры ДС (постоянная времени, коэффициент усиления).

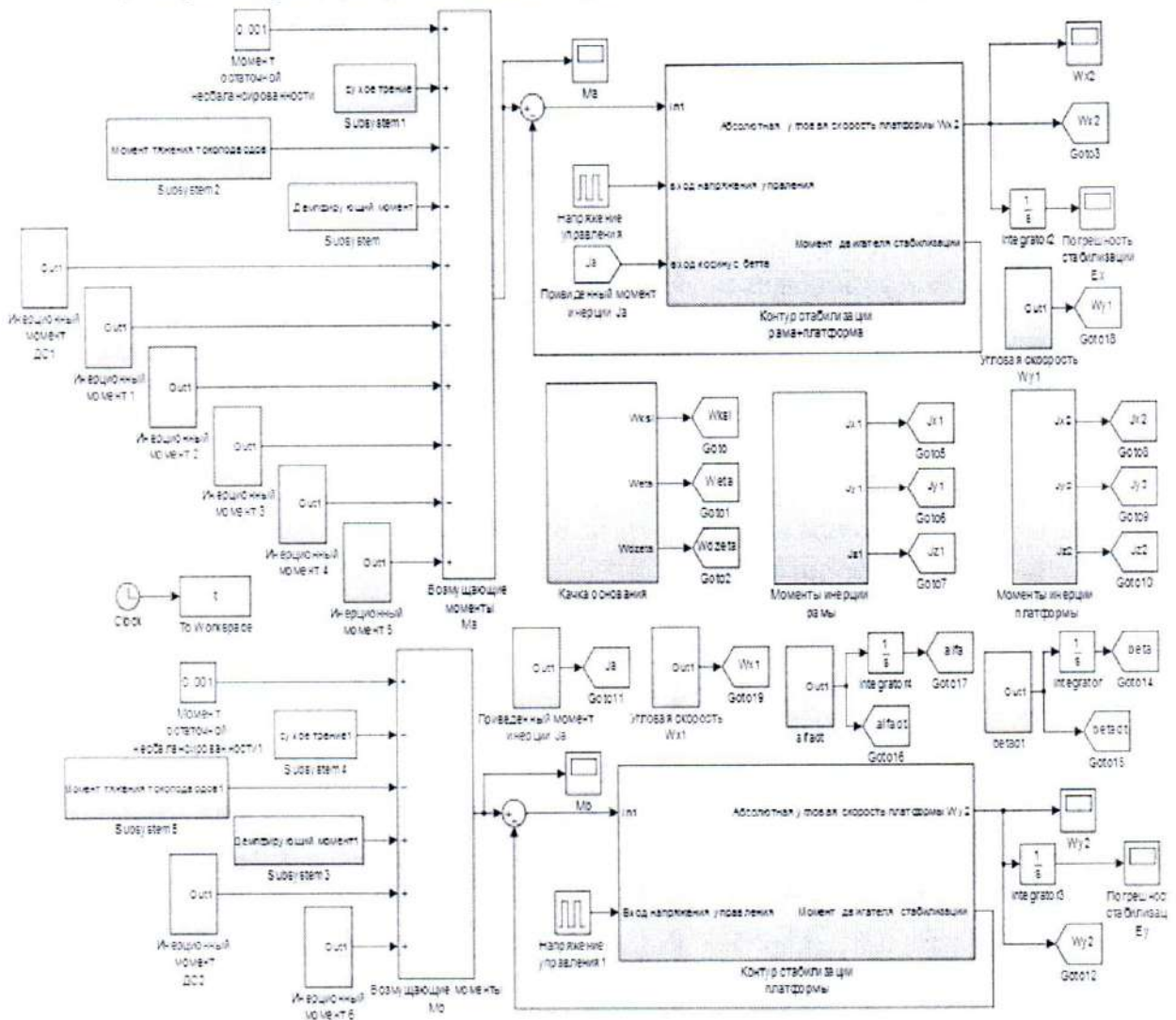


Рисунок 10 – Модель каналов ОПИИС с учетом перекрестных связей в среде Matlab-Simulink



В табл. 2 приведены результаты моделирования с учетом шумовой составляющей ВТГ в нескольких режимах (1-4) при трехкомпонентной качке основания, параметры которой представлены в табл. 1. Режим « - » (табл. 2) соответствует значению угловой скорости качки основания равной 0.

Таблица 1 – Параметры трехкомпонентной качки основания

Качка основания	$\omega_{\xi}$	$\omega_{\eta}$	$\omega_{\zeta}$
Синусоидальное воздействие (режим 1)	$\frac{\pi^2}{30} \sin(2\pi t)$		
Полигармоническое воздействие (режим 2)	$\frac{\pi^2}{30} \sin\left(\frac{7\pi}{2} t\right) + \frac{\pi}{20} \sin\left(\frac{7\pi}{4} t + \frac{\pi}{2}\right)$	$\frac{\pi^2}{20} \sin\left(\frac{7\pi}{2} t\right) - \frac{\pi}{20} \sin\left(\frac{7\pi}{3} t\right)$	$\frac{\pi^2}{20} \sin\left(\frac{11\pi}{4} t\right) - \frac{\pi}{15} \sin(5\pi t)$
	(режим 2)	(режим 3)	(режим 4)

Таблица 2 – Результаты моделирования работы ОПИС

№ опыта	Режим качки основания			Результаты опыта					
	$\omega_{\xi}$	$\omega_{\eta}$	$\omega_{\zeta}$	$M_{\omega}$ , Н·м	$\omega_{x2}$ , рад/с	$\epsilon_x$ , рад	$M_{\beta}$ , Н·м	$\omega_{y2}$ , рад/с	$\epsilon_y$ , рад
1	1	-	-	0,083	0,008	0,00045	0,33	0,22	0,0003
2	-	1	-	0,033	0,02	0,00047	0,34	0,22	0,0003
3	-	-	1	0,034	0,02	0,00047	0,34	0,22	0,0003
4	1	1	-	0,084	0,0079	0,00044	0,34	0,22	0,0003
5	1	-	1	0,081	0,0081	0,00043	0,36	0,2	0,00029
6	-	1	1	0,033	0,02	0,00047	0,31	0,21	0,0003
7	1	1	1	0,081	0,008	0,00043	0,036	0,02	0,00029
8	2	-	-	0,076	0,0089	0,0004	0,033	0,021	0,0003
9	2	1	-	0,076	0,0089	0,00039	0,034	0,022	0,0003
10	2	-	1	0,074	0,0089	0,00038	0,037	0,021	0,0003
11	2	1	1	0,0725	0,0089	0,00038	0,038	0,021	0,0003
12	-	3	-	0,032	0,02	0,00047	0,034	0,022	0,0003
13	1	3	-	0,084	0,0076	0,00044	0,034	0,021	0,0003
14	-	3	1	0,034	0,02	0,00048	0,034	0,021	0,0003
15	1	3	1	0,081	0,0077	0,00042	0,035	0,02	0,00028
16	-	-	4	0,041	0,02	0,0005	0,033	0,021	0,00029
17	1	-	4	0,083	0,0083	0,00043	0,035	0,021	0,00028
18	-	1	4	0,04	0,02	0,00049	0,034	0,021	0,0003
19	1	1	4	0,083	0,0083	0,00043	0,034	0,021	0,00028
20	2	3	4	0,083	0,093	0,00042	0,037	0,021	0,0003

Согласно результатам табл. 2 определено математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение погрешностей стабилизации  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$ :

$$M_{\varepsilon_x} = 0,00044 \text{ рад}, M_{\varepsilon_y} = 0,00030 \text{ рад},$$

$$\sigma_{\varepsilon_x} = 3,52 \cdot 10^{-5} \text{ рад}, \sigma_{\varepsilon_y} = 7,64 \cdot 10^{-6} \text{ рад}.$$

График погрешности стабилизации, как реакция на возмущающий момент при трехкомпонентной качки (опыт №20 табл. 1) показан на рис. 11, 12.

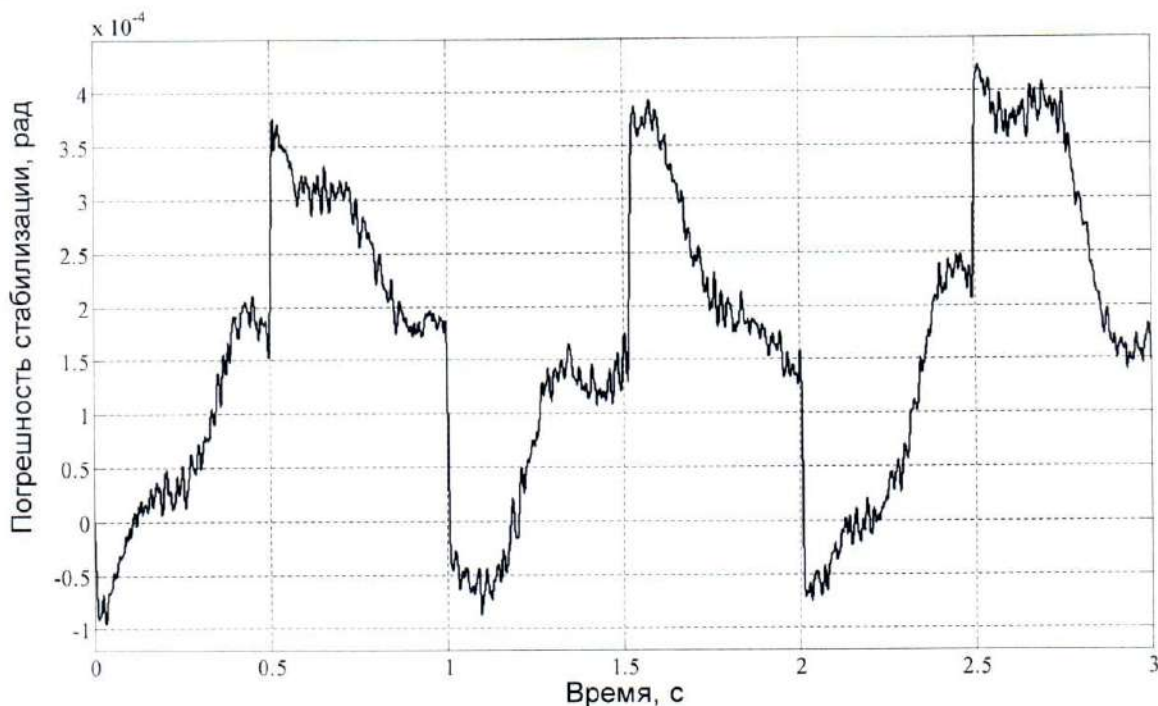


Рисунок 11 – График погрешности стабилизации  $\varepsilon_x$ , как реакция на возмущающий момент

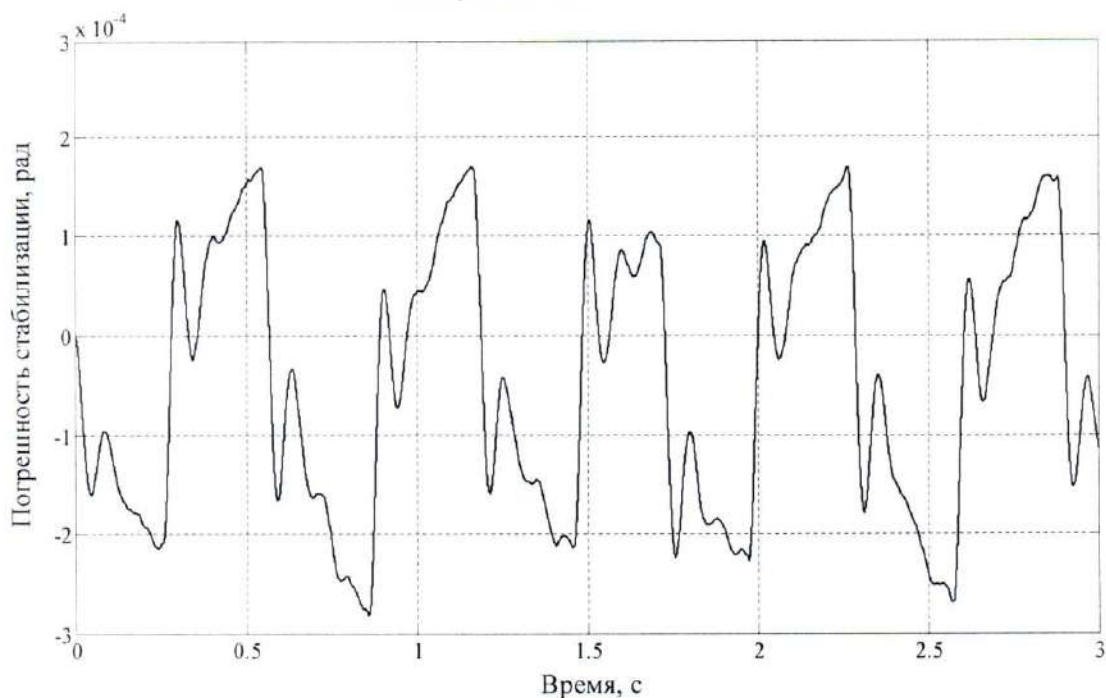


Рисунок 12 – График погрешности стабилизации  $\varepsilon_y$ , как реакция на возмущающий момент



При подаче на вход контура управления управляющего воздействия (рис. 13) график отклонения угла платформы имеет вид (рис. 14).

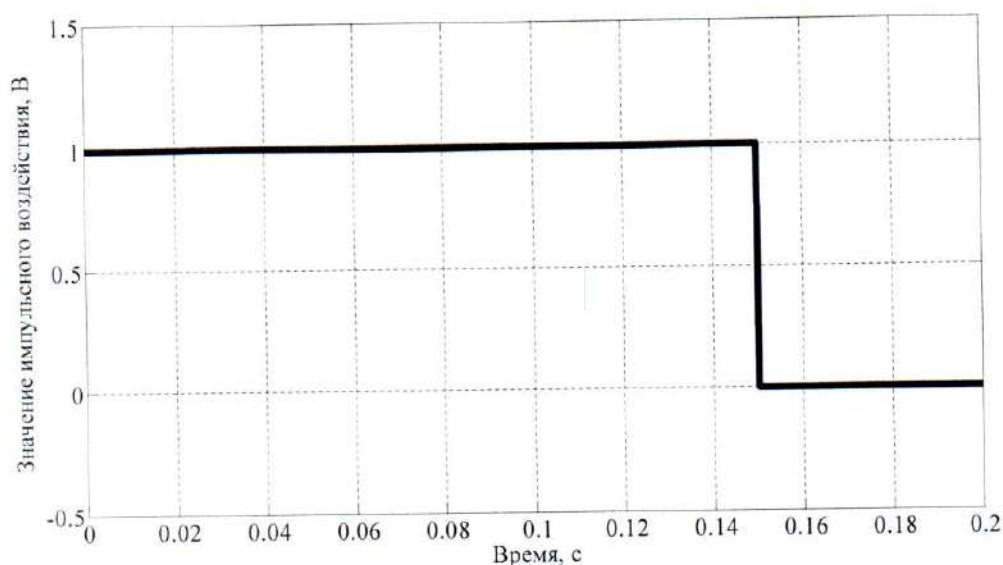


Рисунок 13 – Управляющее входное воздействие

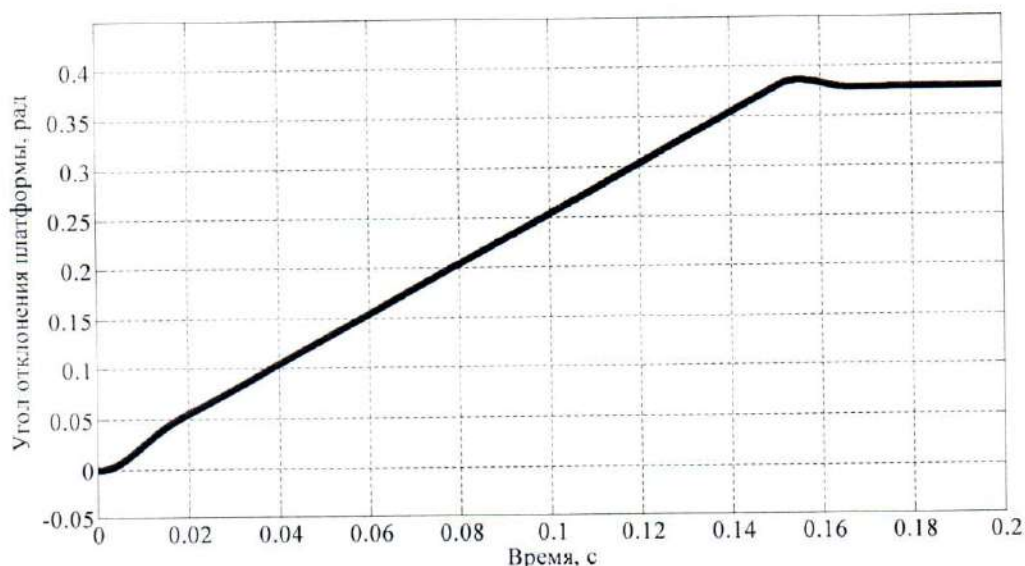


Рисунок 14 – График угла отклонения платформы, как реакция на управляющее воздействие

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Приведен обзор существующих ОПИИС на основе индикаторных ГС, показаны их области применения.

2. Показана актуальность исследования ОПИИС.

3. Приведены достоинства и недостатки современных ЧЭ индикаторных ГС ОПИИС, их технические характеристики. Показано, что перспективным ЧЭ является ВТГ.

3. Рассмотрены вопросы состояния теории и практики индикаторных ГС.

4. Разработано математическое описание ГС ОПИИС на ВТГ в совмещенном режиме стабилизации и управления при многокомпонентной качке основания.

5. Получены передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем контуров стабилизации и управления ГС ОПИИС на ВТГ, позволяющие проводить анализ устойчивости и динамической точности системы.

6. На основании системы дифференциальных уравнений получены структурная схема ГС ОПИИС, а также модель ГС ОПИИС в среде Matlab-Simulink, позволяющая исследовать динамику системы, произведено численное решение сложной, нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающих функционирование ГС ОПИИС на ВТГ при трехкомпонентной качке основания.

7. Подтверждена работоспособность ГС ОПИИС на ВТГ при высоких точностных характеристиках (в контуре стабилизации система является устойчивой, при этом запас по фазе составляет  $33,2^0$ , а запас по амплитуде составляет  $-14,4$  дБ; полоса пропускания ГС равна  $40$  Гц; значение ЛАЧХ в полосе пропускания  $-42$  дБ.). Подтверждена работоспособность контура управления ГС ОПИИС на ВТГ.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. **Королев М.Н.**, Малютин Д.М., Погорелов М.Г., Харламов М.Р. Полупроводниковый генератор оптических сигналов для коллимационных систем // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 216-218.

2. **Королев М.Н.**, Малютин Д.М. Анализ технических характеристик чувствительных элементов индикаторных гироскопических стабилизаторов // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 30-46.

3. **Королев М.Н.**, Малютин Д.М. Исследование динамических характеристик гироскопического стабилизатора на волновом твердотельном гироскопе // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 129-135.

4. **Королев М.Н.**, Малютин Д.М. Динамика гироскопического стабилизатора с волновым твердотельным гироскопом // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2021. Вып. 10. С. 249-255.

### **Публикации в научных журналах и изданиях, индексируемых в наукометрической базе Scopus**

5. D.M. Malyutin, **M.N. Korolyev** Gyroscopic system based on wave solid-state gyros // 27 th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Proceedings. Saint Petersburg, Russia, 2020. – P. 196-198.



**Публикации в иных изданиях:**

6. **Королев М.Н.** Способ уменьшения ошибки стабилизации оси визируемого наблюдаемого объекта на движущемся основании за счет оптимизации конструкции головного зеркала // Электронный научно-технический журнал «Контенант», Электрон. журн. 2015. №4. С.36-44.

7. **Королёв, М. Н.** Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловой скорости / М. Н. Королёв // Приборостроение-2019 : материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 21-23.

8. **Королев, М. Н.** Особенности построения электрической принципиальной схемы двухосного гироскопического стабилизатора на базе волоконно-оптических гироскопов / М. Н. Королев // Приборостроение - 2017 : материалы 10-й Международной научно-технической конференции, 1-3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. - Минск : БНТУ, 2017. - С. 374-375.