

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ 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»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_/ В.И. Ширяев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Авиационная система оптического наблюдения на базе гиросtabilизированной платформы  
типа "шар"

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 24.03.02.2019.360.00 ПЗ ВКР

Консультант

вед. инж.-констр.

АО «НПО электромеханики»

\_\_\_\_\_/ А.В. Губернаторов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Руководитель работы

доцент каф. ИнИТ

\_\_\_\_\_/ А.А. Лысова

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор работы

студент группы КЭ-466

\_\_\_\_\_/ А.В. Григорьева

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер

доцент каф. ИнИТ

\_\_\_\_\_/ А.А. Лысова

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Григорьева А.В. Авиационная система оптического наблюдения на базе гиросtabilизированной платформы типа "шар". – Челябинск: ЮУрГУ, ВШ ЭКН; 2019, 53 с., 26 ил., библиогр. список – 12 наим., 16 листов слайдов презентации ф.А4, 3 приложения, 2 листа чертежей ф. А1, 4 листа чертежей ф. А3, 15 листов слайдов презентации.

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке двухосного гиросtabilизатора на базе роторного-вибрационного гироскопа для системы оптического наблюдения.

В работе предложена кинематическая схема двухосного гиросtabilизатора (ДГС) для построения системы оптического наблюдения. Составлены уравнения движения и получены передаточные функции канала стабилизации гиросtabilизатора. Произведен расчет параметров ГС, а также цепи стабилизации и коррекции. Для исследования динамики двухосного гиросtabilизатора выполнено моделирование в программе Matlab прикладной пакет Simulink.

Разработана конструкция двухосной гиросtabilизирующей платформы и роторного-вибрационного гироскопа (чувствительного элемента ГС). В результате выполнено 3D – моделирование системы оптического наблюдения. Представлена конструкторская документация ДГС: сборочный чертеж ГС и ЧЭ; рабочие чертежи основных деталей ГС и ЧЭ; принцип работы и исследования ГС изложены в пояснительной записке.

Для построения 3D – модели использовался ПО КОМПАС v17.0. Использование разработанной гиросtabilизированной автономной ОЭС может быть использована на пилотных и беспилотных летательных объектах для круглосуточного наблюдения в любых погодных условиях. Под наблюдением понимается видение неба, окружающего ландшафта и объектов.

					<b>24.03.02.2019.360.00 ПЗ</b>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
Разраб.		Григорьева А.В.			Лит.	Лист	Листов
Провер.		Лысова А.А.			Д	4	53
Н. Контр.		Лысова А.А.			<b>ЮУрГУ Кафедра САУ</b>		
Утверд.		Ширяев В.И.					

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ПРИНЦИП РАБОТЫ ДГС	
1.1 Анализ технического задания.....	7
1.2 Принцип работы РВГ.....	7
1.3 Выбор кинематической схемы ДГС.....	9
1.4 Уравнения движения РВГ в невращающейся системе координат.....	12
1.5 Вывод уравнений движения ДГС.....	18
2 РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ДГС	
2.1 Конструирование ДГС.....	25
2.2 Расчет двигателя стабилизации ДГС.....	35
2.3 Расчет подшипников РВГ.....	38
2.4 Расчет датчика момента РВГ.....	40
2.5 Расчет погрешностей РВГ.....	41
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДГС.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	48
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДГС.....	49
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. 3D модель РВГ.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ В. 3D модель двухосного гростабилизатора.....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Приборы, основанные на использовании свойств гироскопа, называют гироскопическими приборами. Гироскопические приборы рассматриваются в разделе приборостроения, посвящённом построению приборов ориентации, стабилизации и навигации. Гироскопические приборы широко применяются на различных подвижных объектах, таких как самолеты, корабли, ракеты, космические корабли, спутники и т.д., для которых требуется сохранять ориентацию отдельных приборов (акселерометры, системы видеонаблюдения, астродатчики и т.п.) при любых допустимых манёврах объекта. Одно из технических решений, позволяющих решить эту задачу, основано на гироскопической стабилизации. Такие системы сокращенно принято называть гиростабилизаторами. Гиростабилизированные платформы применяются в бортовых системах и в инерциальных системах управления подвижными объектами.

В данном проекте разработан двухосный гиростабилизатор (ДГС) на базе роторного-вибрационного гироскопа (РВГ). Рассмотрено влияние перекрестных связей на динамику ДГС.

Цель выпускной квалификационной работы: проектирование авиационной системы оптического наблюдения на базе гиростабилизированной платформы типа «шар», построенного на базе роторно-вибрационного гироскопа.

Задачи выпускной квалификационной работы:

- 1) принцип работы двухосного гиростабилизатора и роторного-вибрационного гироскопа;
- 2) моделирование динамики ДГС;
- 3) выбор основных элементов конструкции ДГС;
- 4) разработка конструкторской документации.

										Лист
										6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.03.02.2019.360.00 ПЗ					

# 1 ПРИНЦИП РАБОТЫ ДГС

## 1.1 Анализ технического задания

Технические требования:

- диапазон вращения по азимуту, °:.....360
- диапазон вращения по углу места (мин), °:.....-115
- диапазон вращения по углу места (макс), °:.....10
- диапазон рабочих температур (мин), °С:.....-40
- диапазон рабочих температур (макс), °С:.....55
- угловая скорость дрейфа, °/ час:.....± 0.1
- частота колебаний объекта, Гц:.....1
- точность стабилизации, ' :.....2
- линейные перегрузки, g:.....3

Исходя, из технических требований необходимо выбрать кинематическую схему ДГС, кинематическую схему чувствительного элемента, составить математическую модель и провести моделирование.

## 1.2 Принцип работы РВГ

Разрабатываемый ГС построен на базе РВГ. Вибрационные гироскопы объединяют устройства, различные по характеру собственного движения чувствительного элемента и принципу действия, в которых возникающий момент (сила) вызывает отклонения чувствительного элемента относительно основания, совершающего переносное движение.

Отличительным признаком вибрационных гироскопов является связь чувствительного элемента с основанием, на котором он установлен.

Кинематическая схема РВГ представлена на рисунке 1.1.

На основании установлен приводной двигатель, на валу которого с помощью торсионов укреплен ротор. Торсионы, образующие подвес, имеют конечную жесткость на кручение вокруг оси  $Ox$  и большую жесткость на изгиб, почти бесконечную. Ротор имеет две степени свободы относительно основания – вращается вместе с валом приводного двигателя с угловой скоростью  $\Omega$  и может поворачиваться относительно вала вокруг поворачивающейся оси торсионов  $Ox$  на угол  $\alpha$ .

Выходными сигналами РВГ являются падения напряжения на эталонных резисторах, включенных последовательно с управляющими обмотками преобразователей моментов, или управляющие напряжения  $U_1$  и  $U_2$  этих преобразователей.



- высокая статическая точность (отсутствие на выходе измерителя угла нулевого сигнала, синхронного с полезным сигналом и превышающего заданный уровень);
- динамическая точность, заключающаяся в том, что формирование сигнала должно производиться с минимальными искажениями в пределах рабочей полосы частот прибора;
- чувствительность;
- надежность.

### 1.3 Выбор кинематической схемы ДГС

В тех случаях, когда необходимо обеспечить стабилизацию платформы с установленными на ней объектами относительно двух осей (например, стабилизировать положение соответствующих осей платформы в плоскости местного горизонта), применяются двухосные гиростабилизаторы (ГС). На платформе такого ГС устанавливаются два двухстепенных гироскопа или один трехстепенный гироскоп.

В выпускной квалификационной работе необходимо разработать двухосный гиростабилизатор для авиационной системы оптического наблюдения. На основе гиростабилизированной платформы разработаны многоканальные системы для обнаружения объектов в широком диапазоне. В новых системах повышена помехозащищенность оптических каналов, снижена масса изделия за счет применения цифровой техники.

Система оптического наблюдения обеспечивает:

- круглосуточный поиск, обнаружение и распознавание наземных, надводных подвижных и неподвижных объектов (автомобиль, человек, животное);
- при проведении спасательных операций;
- дистанционное обнаружение очагов лесных и подземных пожаров, в том числе в условиях задымленности и полной темноты.

К ДГС предъявляется ряд требований:

- высокая точность стабилизации;
- минимально возможные габариты и масса;
- минимально возможное энергопотребление т.к. для работы часто используются автономными источниками питания;
- технологичность;
- простота обслуживания и регулировка.

На основе технических требований необходимо выбрать кинематическую схему двухосного ГС, чувствительного элемента, а также составить

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

математическую модель, выполнить конструирование. Проведем анализ кинематических схем ДГС. Двухосные гиростабилизаторы обеспечивают стабилизацию платформы с установленными на ней объектами относительно двух осей. Двухосные гиростабилизаторы могут быть использованы для силовых гировертикалей самолетов или для построения гиростабилизаторов в системах самонаведения зенитных ракет. Гировертикали силового типа применяются для опеределения углов крена и тангажа.

Кроме силовых ГС также применяются индикаторные. Такие стабилизаторы можно рассматривать как систему автоматического регулирования, в которых гироскопические устройства, установленные на платформе, являются чувствительными элементами, определяющими положением объекта, а также управляющими следящими системами. В процессе стабилизации чувствительный элемент не оказывает силового воздействия на платформу.

Чувствительным элементом двухосного индикаторного стабилизатора могут быть трехстепенный, динамически настраиваемый или роторный-вибрационный гироскоп, т.к. гироскопы с упругим подвесом обладают рядом достоинств, которые определили их успешное применение в качестве чувствительного элемента в навигационных системах и в гиростабилизаторах. К этим достоинствам следует отнести характеристики точности, сопоставленные с оптическими гироскопами, малую массу, габариты и потребляемую мощность, работоспособность в широком диапазоне температур. Кинематическая схема двухосного гиростабилизатора изображена на рисунке 1.2.

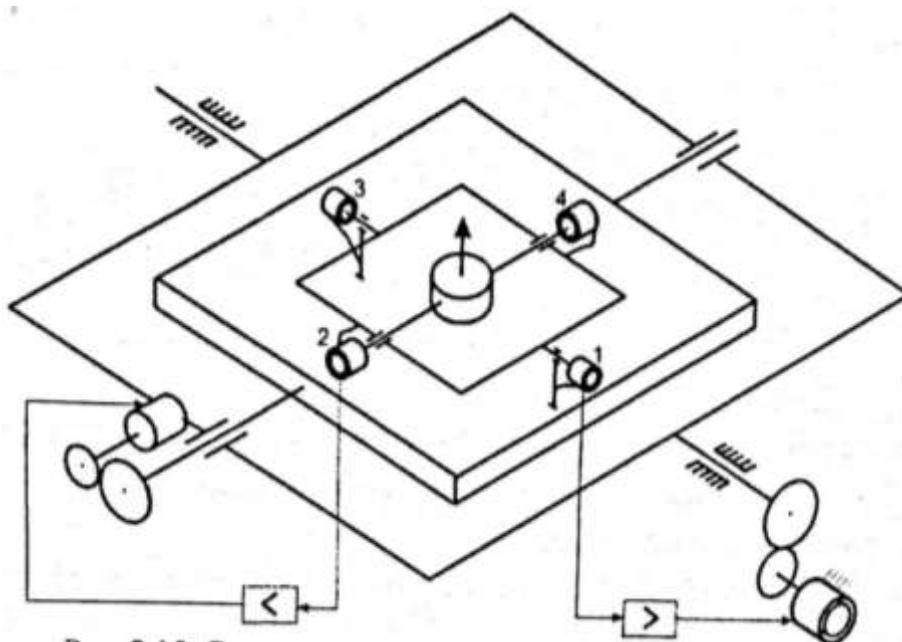


Рисунок 1.2 – Кинематическая схема индикаторного ДГС:

1– платформа; 2– гироскоп; 3,4– датчик угла; 5,6– датчик момента; 7–рама;  
8,9– двигатель стабилизации.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

Лист

10



Для того чтобы построить ДГС для системы оптического наблюдения, необходимо разработать кинематическую схему ГС, представленную на рисунке 1.3 с одним чувствительным элементом РВГ.

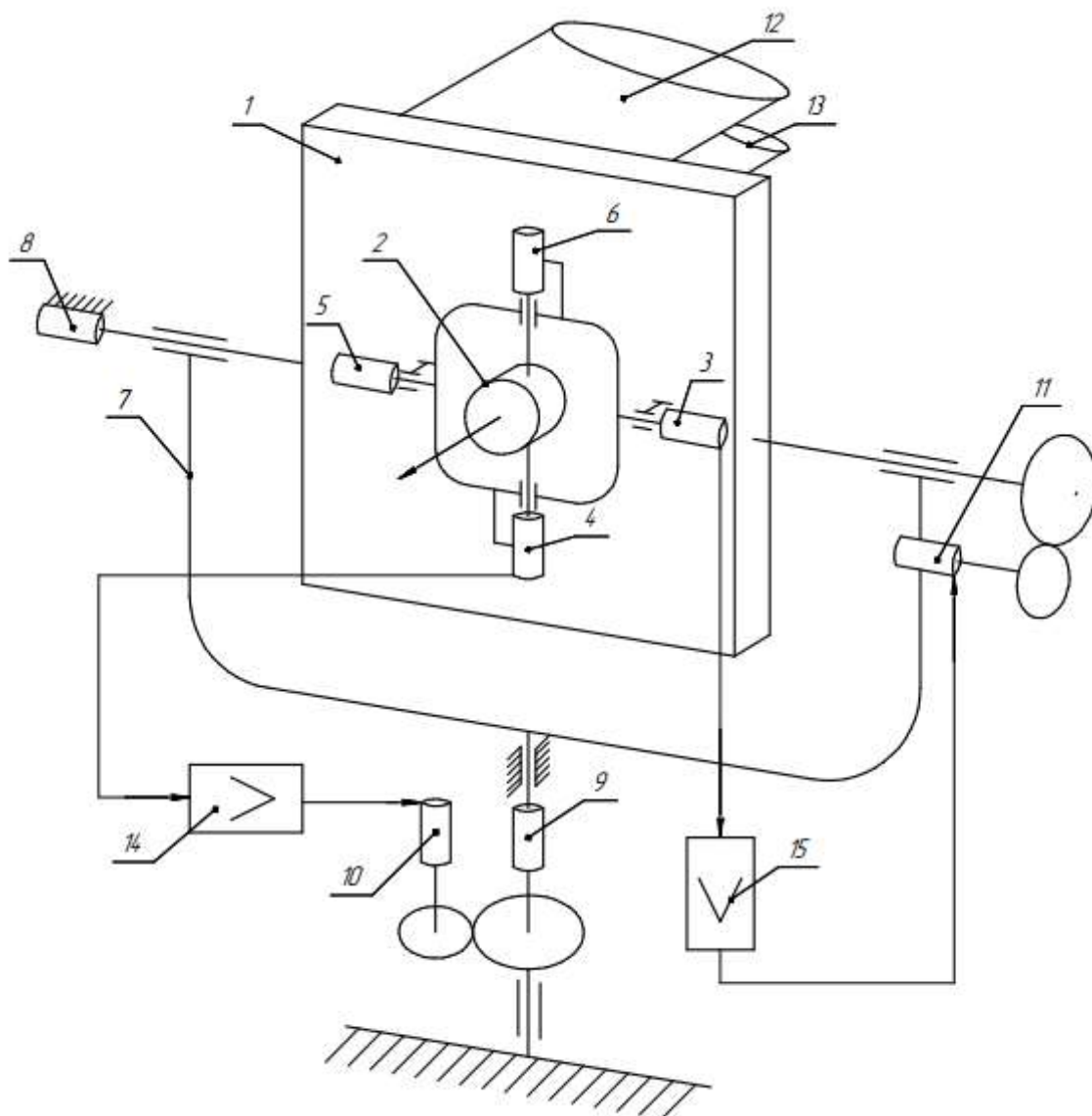


Рисунок 1.3 – Кинематическая схема:

1 – платформа; 2 – РВГ; 3,4 – датчик угла; 5,6 – датчик момента; 7 – рама; 8,9 – датчик команд; 10,11 – двигатель стабилизации, 12 – оптический глаз; 13 – дальномер; 14,15 – усилитель.

Гироскоп устанавливается на платформу таким образом, чтобы вектор кинетического момента  $H$  был направлен вдоль стабилизируемой оси платформы. Это положение гироскопа соответствует нулевым сигналам с датчиков углов.

Выбор чувствительного элемента в индикаторных гиросtabilизаторах имеет большое значение, т.к. существенно влияет на динамику гиросtabilизатора и его точностные характеристики. Для того чтобы характеристики гиросtabilизатора были более точными и стабильными, необходим большой кинетический момент

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

Лист

11

гироскопа, но с другой стороны из-за большой массы чувствительного элемента, увеличиваются габариты конструкции.

На платформе 1 установлен РВГ 2. Платформа укреплена в раме, опоры которой располагаются в корпусе. На осях наружной рамки гироскопа имеются датчики углов 3 и 4, которые через усилитель 14 и 15 управляют двигателями стабилизации 10 и 11, обеспечивающими стабилизацию платформы относительно осей  $O_y$  и  $O_z$ . Датчики моментов 5, 6 используются в режиме приведения стабилизатора. Съём сигналов, пропорциональных углам тангажа и рыскания, производится с помощью датчиков углов (команд) 16, 17.

Основное достоинство наружного подвеса ГС является компактность и жесткость самой стабилизированной площадки.

Двигателем стабилизации обеспечивается стабилизация платформы, а гироскоп измеряет только отклонение платформы от требуемого положения.

Платформа ДГС имеет две степени свободы относительно объекта, вращение платформы вокруг оси, перпендикулярной плоскости, заключающей оси стабилизации, происходит вместе с объектом.

Также большую роль играет выбор чувствительного элемента т.к. он влияет на динамику гиростабилизатора и его точностные характеристики.

Разрабатываемый ГС построен на базе РВГ. Разрабатываемый ГС построен на базе РВГ. Преимуществом гиростабилизатора, построенного на основе РВГ, является отсутствие гироскопических моментов, действующих по оси стабилизации. В то же время в выходных каналах РВГ присутствуют перекрестные связи по угловым скоростям и ускорениям. Влияние таких связей можно увидеть в случае углового движения.

Гироскоп – основная часть таких приборов, как указатель курса, поворота, горизонта, сторон света, гирокомпас. Внутри этих приборов вращаются со скоростью в несколько десятков тысяч оборотов в минуту небольшие роторы-волчки, укрепленные в кардановом подвесе. Корпус прибора можно поворачивать как угодно, при этом ось вращающегося гироскопа будет сохранять неизменное положение в пространстве.

#### 1.4 Уравнения движения РВГ в невращающейся системе координат

На рисунке 1.4 представлена система координат РВГ, по которой запишем уравнения движения РВГ.

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.03.02.2019.360.00 ПЗ					

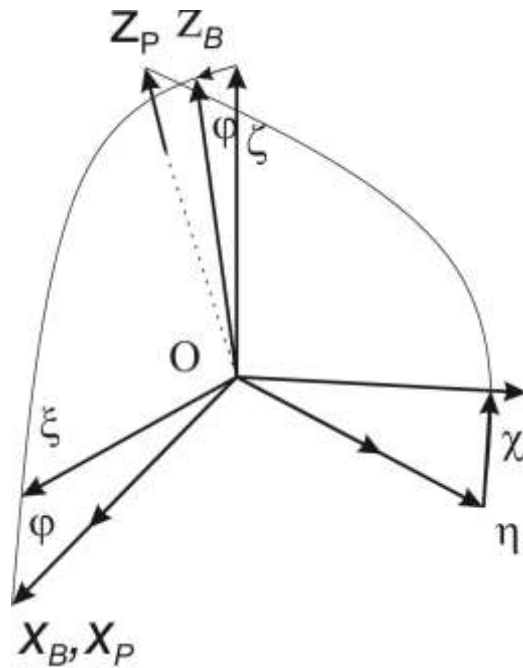


Рисунок 1.4 – Система координат РВГ

Введем систему координат  $O\xi\eta\zeta$ , связанную с основанием;  $Ox_By_Bz_B$  система координат, связанная с валом;  $Ox_Py_Pz_P$  система координат, связанная с ротором.

Введем некоторые обозначения:  $\dot{\varphi} = \Omega$  - угловая скорость вала;  $J_{x_P}, J_{y_P}, J_{z_P}$  - моменты инерции ротора относительно соответствующих осей;  $c_T$  - жесткость торсионов на кручение;  $k_\partial$  - коэффициент демпфирования.

Для того чтобы получить уравнения движения необходимо найти проекции абсолютных угловых скоростей вала и ротора на связанные с ними оси.

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{x_B} = \omega_\xi \cos\varphi - \omega_\zeta \sin\varphi, \\ \omega_{y_B} = \Omega + \omega_\eta, \\ \omega_{z_B} = \omega_\zeta \cos\varphi + \omega_\xi \sin\varphi, \\ \omega_{x_P} = \dot{\chi} + \omega_{x_B} = \dot{\chi} \omega_\xi \cos\varphi - \omega_\zeta \sin\varphi, \\ \omega_{y_P} = \omega_{y_B} \cos\chi + \omega_{z_B} \sin\chi \approx \omega_{y_B} + \chi \omega_{z_B} \\ \omega_{z_P} = \omega_{z_B} \cos\chi - \omega_{y_B} \sin\chi \approx \omega_{z_B} - \chi \omega_{y_B}. \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Для вывода уравнения движения гироскопа воспользуемся уравнением кинетостатики:

$$\sum \text{mom} x_P = 0. \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.2) имеем:

$$-J_{xP} \dot{\omega}_{xP} + J_{yP} \omega_{yP} \omega_{zP} - J_{zP} \omega_{zP} \omega_{yP} - c_T \chi - k_{\partial} \dot{\chi} + M_{xP\text{ВОЗМ}} = 0. \quad (1.3)$$

Упростим выражение (1.3):

$$J_{xP} \dot{\omega}_{xP} - (J_{yP} - J_{zP}) \omega_{zP} \omega_{yP} + c_T \chi + k_{\partial} \dot{\chi} = M_{xP\text{ВОЗМ}}. \quad (1.4)$$

Из выражения (1.1) имеем:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{xP} &= \ddot{\chi} + \dot{\omega}_{\xi} \cos \Omega t - \omega_{\xi} \Omega \sin \Omega t - \dot{\omega}_{\zeta} \sin \Omega t - \omega_{\zeta} \Omega \cos \Omega t; \\ \omega_{zP} \omega_{yP} &= (\omega_{yB} + \chi \omega_{zB})(\omega_{zB} - \chi \omega_{yB}) = \omega_{yB} \omega_{zB} + \chi(\omega_{zB}^2 - \omega_{yB}^2) - \chi^2 \omega_{yB} \omega_{zB} \approx \\ &\approx (\Omega + \omega_{\eta})(\omega_{\zeta} \cos \Omega t + \omega_{\xi} \sin \Omega t) + \chi((\omega_{\zeta} \cos \Omega t + \omega_{\xi} \sin \Omega t)^2 - (\Omega + \omega_{\eta})^2). \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\Omega \gg \omega_{\xi}, \omega_{\zeta}, \omega_{\eta}$ , получим:

$$\omega_{zP} \omega_{yP} \approx \Omega(\omega_{\zeta} \cos \Omega t + \omega_{\xi} \sin \Omega t) - \chi \Omega^2.$$

После подставления, выражения для  $\dot{\omega}_{xP}$  и  $\omega_{zP} \omega_{yP}$  в уравнение (1.1) получим:

$$\begin{aligned} J_{xP} \ddot{\chi} + ((J_{yP} - J_{zP}) \Omega^2 + c_T) \chi + k_{\partial} \dot{\chi} &= (J_{yP} - J_{zP} + J_{xP}) \Omega (\omega_{\xi} \sin \Omega t + \omega_{\zeta} \cos \Omega t) - \\ &- J_{xP} (\dot{\omega}_{\xi} \cos \Omega t + \dot{\omega}_{\zeta} \sin \Omega t). \end{aligned}$$

Преобразовав данное выражение и полагая, что  $M_{xP\text{ВОЗМ}} = 0$ , получим:

$$\begin{aligned} J_{xP} \ddot{\chi} + J_{xP} \dot{\omega}_{\xi} \cos \Omega t - J_{xP} \omega_{\xi} \Omega \sin \Omega t - J_{xP} \dot{\omega}_{\zeta} \sin \Omega t - J_{xP} \omega_{\zeta} \Omega \cos \Omega t - \\ (J_{yP} - J_{zP}) \Omega (\omega_{\xi} \sin \Omega t + \omega_{\zeta} \cos \Omega t) + (J_{yP} - J_{zP}) \chi \Omega^2 + k_{\partial} \dot{\chi} + c_T \chi = M_{xP\text{ВОЗМ}}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Разделим все члены уравнения (1.5) на  $J_{xP}$ :

$$\ddot{\chi} + 2d \omega_0 \dot{\chi} + \omega_0^2 \chi = \lambda \Omega (\omega_{\xi} \sin \Omega t + \omega_{\zeta} \cos \Omega t) - (\dot{\omega}_{\xi} \cos \Omega t - \dot{\omega}_{\zeta} \sin \Omega t), \quad (1.6)$$

$$\text{где } 2d \omega_0 = \frac{k_{\partial}}{J_{xP}};$$

$$\omega_0^2 = \frac{(J_{yP} - J_{zP}) \Omega^2 + c_T}{J_{xP}};$$

$$\lambda = \frac{J_{yP} - J_{zP} + J_{xP}}{J_{xP}}.$$

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рассмотрим частный случай, когда  $\omega_\xi = const$ ,  $\omega_\zeta = const$ . Тогда уравнение движения (1.6) будет выглядеть следующим образом:

$$\ddot{\chi} + 2d\omega_0\dot{\chi} + \omega_0^2\chi = \lambda\Omega(\omega_\xi\sin\Omega t + \omega_\zeta\cos\Omega t) \quad (1.7)$$

Частное решение (1.7) запишется так:

$$\chi = D_1\sin\Omega t + D_2\cos\Omega t. \quad (1.8)$$

Определим  $D_1$  и  $D_2$ , а также найдем  $\dot{\chi}$  и  $\ddot{\chi}$ :

$$\begin{aligned} \dot{\chi} &= D_1\Omega\cos\Omega t - D_2\Omega\sin\Omega t, \\ \ddot{\chi} &= -D_1\Omega^2\sin\Omega t - D_2\Omega^2\cos\Omega t. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Подставив производные в уравнение движения (1.7):

$$-D_1\Omega^2\sin\Omega t - D_2\Omega^2\cos\Omega t + 2d\omega_0D_1\Omega\cos\Omega t - 2d\omega_0D_2\Omega\sin\Omega t + \omega_0^2D_1\sin\Omega t + \omega_0^2D_2\cos\Omega t = \lambda\Omega\omega_\xi\sin\Omega t + \lambda\Omega\omega_\zeta\cos\Omega t. \quad (1.10)$$

Следуя, из выражения (1.10) можно записать систему алгебраических выражений:

$$\begin{aligned} (\omega_0^2 - \Omega^2)D_1 - 2d\omega_0\Omega D_2 &= \lambda\Omega\omega_\xi; \\ 2d\omega_0\Omega D_1 + (\omega_0^2 - \Omega^2)D_2 &= \lambda\Omega\omega_\zeta. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Запишем главный определитель и определители замещения системы (1.11):

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} \omega_0^2 - \Omega^2 & -2d\omega_0\Omega \\ 2d\omega_0\Omega & \omega_0^2 - \Omega^2 \end{vmatrix} = ((\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4d^2\omega_0^2\Omega^2); \\ \Delta_{D_1} &= \begin{vmatrix} \omega_\xi & -2d\omega_0\Omega \\ \omega_\zeta & \omega_0^2 - \Omega^2 \end{vmatrix} = \lambda\Omega((\omega_0^2 - \Omega^2)\omega_\xi + 2d\omega_0\Omega\omega_\zeta); \\ \Delta_{D_2} &= \begin{vmatrix} \omega_0^2 - \Omega^2 & \omega_\xi \\ 2d\omega_0\Omega & \omega_\zeta \end{vmatrix} = \lambda\Omega(-2d\omega_0\Omega\omega_\xi + (\omega_0^2 - \Omega^2)\omega_\zeta). \end{aligned}$$

Из вышеперечисленных выражений для  $D_1$  и  $D_2$ , подставим их в частное решение, получим:

$$\chi = \frac{\lambda\Omega}{\Delta} \left( (\omega_0^2 - \Omega^2) \omega_\xi \sin\Omega t + 2d\omega_0\Omega\omega_\zeta \sin\Omega t \right) + \frac{\lambda\Omega}{\Delta} \left( -2d\omega_0\omega_\xi \cos\Omega t + (\omega_0^2 - \Omega^2) \omega_\zeta \cos\Omega t \right).$$

Обозначим  $\omega_0^2 - \Omega^2 = A\cos\varepsilon$ ;  $2d\omega_0\Omega = A\sin\varepsilon$ ;

Тогда выражение примет вид:

$$\chi = \frac{\lambda\Omega}{\Delta} A \left( \omega_\xi \sin(\Omega t - \varepsilon) + \omega_\zeta \cos(\Omega t - \varepsilon) \right),$$

где  $A = \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4d^2\omega_0^2\Omega^2}$ ;

$$\operatorname{tg}\varepsilon = \frac{2d\omega_0\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}.$$

С учетом найденных выражений, получим:

$$\chi = \frac{\lambda\Omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4d^2\omega_0^2\Omega^2}} \left( \omega_\xi \sin(\Omega t - \varepsilon) + \omega_\zeta \cos(\Omega t - \varepsilon) \right).$$

При выполнении условия  $\omega_0 = \Omega$ ,  $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$ , получим:

$$\chi = \frac{\lambda}{2d\omega_0} \left( \omega_\zeta \sin\Omega t - \omega_\xi \cos\Omega t \right).$$

Из условия, что  $\omega_0^2 = \Omega^2$ , получим:

$$\frac{(J_{yP} - J_{zP})\Omega^2 + c_T}{J_{xP}} = \Omega^2,$$

где  $c_T = \Omega^2(-J_{yP} + J_{zP} + J_{xP})$ .

В случае симметричного ротора:

$$c_T = \Omega^2(2J_\Omega - J_0) \quad (1.12)$$

где  $J_\Omega, J_0$  - экваториальный и осевой момент инерции ротора.

Условие (1.12) называется условием резонансной настройки.

В программе КОМПАС-3D получены моменты инерции колец:

$$J_x=0.522 \text{ Г}\cdot\text{см}^2, J_y=0.987 \text{ Г}\cdot\text{см}^2, J_z=0.534 \text{ Г}\cdot\text{см}^2.$$

Проведем расчет параметров:

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

$$2d\omega_0 = \frac{0.707}{0.000522} = 1354.4,$$

$$c_T = 2512^2(-0.987 + 0.000535 + 0.000522),$$

$$\omega_0^2 = \frac{(0,000987-0,000535)2512^2+c_T}{0,000522} = 6310124.7,$$

$$\lambda = \frac{0,000987-0,000535+0,000522}{0,000522} = 1.86..$$

Для того, чтобы получить уравнения движения РВГ в невращающейся системе координат, необходимо ввести переменные  $\alpha = -\chi \sin \Omega t$ ,  $\beta = \chi \cos \Omega t$  (Рисунок 1.5).

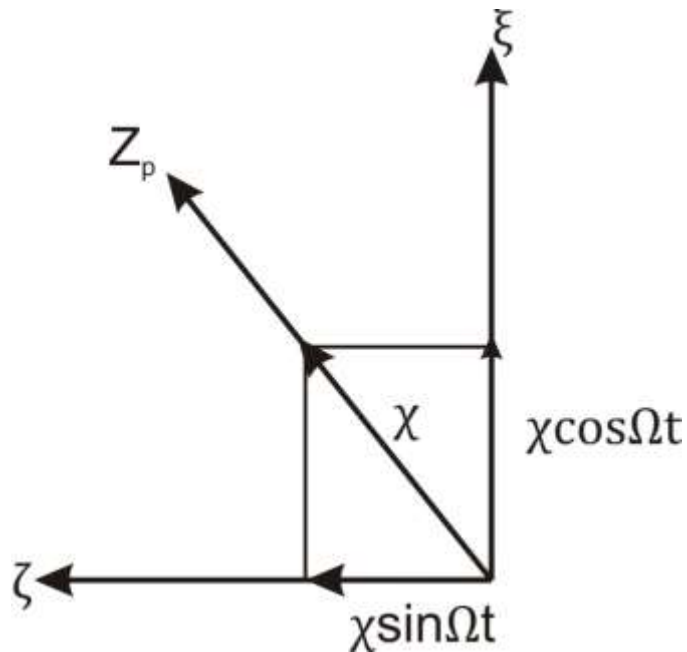


Рисунок 1.5 – Переменные в невращающейся системе координат

Правую и левую часть (1.6) умножим на  $\sin \Omega t$  и  $\cos \Omega t$ , получим:

$$\ddot{\chi} \sin \Omega t + 2d\omega_0 \dot{\chi} \sin \Omega t + w_0^2 \chi \sin \Omega t = \ddot{\chi} \sin \Omega t + 2d\omega_0 \dot{\chi} \sin \Omega t + w_0^2 \chi \sin \Omega t.$$

$$\frac{\lambda \Omega}{2} (\omega_\xi - \omega_\xi \cos 2\Omega t + \omega_\zeta \sin 2\Omega t) - \frac{\dot{\omega}_\xi}{2} \sin 2\Omega t + \frac{\dot{\omega}_\zeta}{2} - \frac{\dot{\omega}_\zeta}{2} \cos 2\Omega t. \quad (1.13)$$

$$\ddot{\chi} \cos \Omega t + 2d\omega_0 \dot{\chi} \cos \Omega t + w_0^2 \chi \cos \Omega t = \frac{\lambda \Omega}{2} (\omega_\xi \cos 2\Omega t + \omega_\zeta + \omega_\zeta \cos 2\Omega t - \frac{\dot{\omega}_\xi}{2} - \frac{\dot{\omega}_\xi}{2} \cos 2\Omega t + \frac{\dot{\omega}_\zeta}{2} \sin 2\Omega t). \quad (1.14)$$

Уравнения (1.13) и (1.14) запишем в переменных  $\alpha = -\chi \sin \Omega t$  и  $\beta = \chi \cos \Omega t$ :

$$\ddot{\alpha} = -\dot{\chi} \sin \Omega t - \chi \Omega \cos \Omega t;$$

					Лист
					17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.03.02.2019.360.00 ПЗ

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} &= -\ddot{\chi}\sin\Omega t - 2\dot{\chi}\Omega\cos\Omega t + \chi\Omega^2\sin\Omega t; \\ \dot{\beta} &= \dot{\chi}\cos\Omega t - \chi\Omega\sin\Omega t; \\ \ddot{\beta} &= \ddot{\chi}\cos\Omega t - 2\dot{\chi}\Omega\sin\Omega t - \chi\Omega^2\cos\Omega t.\end{aligned}$$

Далее имеем:

$$\begin{aligned}\dot{\chi}\sin\Omega t &= -\dot{\alpha} - \Omega\beta; \\ \ddot{\chi}\sin\Omega t &= -\ddot{\alpha} + \Omega^2\alpha - 2\Omega\dot{\beta}; \\ \dot{\chi}\cos\Omega t &= \dot{\beta} - \Omega\alpha; \\ \ddot{\chi}\cos\Omega t &= \ddot{\beta} - \Omega^2\beta - 2\Omega\dot{\alpha}.\end{aligned}\tag{1.15}$$

Подставив, (1.15) в (1.13) и (1.14), получим:

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} + 2\Omega\dot{\beta} + 2dw_0\dot{\alpha} + 2dw_0\Omega\beta + (\omega_0^2 - \Omega^2)\alpha - \frac{\lambda\Omega}{2}(\omega_\xi - \omega_\xi\cos 2\Omega t + \\ \omega_\zeta\sin 2\Omega t) + \frac{\dot{\omega}_\xi}{2}\sin 2\Omega t - \frac{\dot{\omega}_\zeta}{2}\cos 2\Omega t.\end{aligned}\tag{1.16}$$

$$\begin{aligned}\ddot{\beta} - 2\Omega\dot{\alpha} + 2dw_0\dot{\beta} - 2dw_0\Omega\alpha + (\omega_0^2 - \Omega^2)\beta - \frac{\lambda\Omega}{2}(\omega_\xi\sin 2\Omega t + \omega_\zeta + \\ \omega_\zeta\cos 2\Omega t) - \frac{\dot{\omega}_\xi}{2} - \frac{\dot{\omega}_\zeta}{2}\cos 2\Omega t + \frac{\dot{\omega}_\zeta}{2}\sin 2\Omega t.\end{aligned}$$

Т.к. сигнал на двойной частоте вращения ротора фильтруется, то уравнение (1.16) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} + 2dw_0\dot{\alpha} + (\omega_0^2 - \Omega^2)\alpha + 2\Omega\dot{\beta} + 2dw_0\Omega\beta &= -\frac{\lambda\Omega}{2}\omega_\xi - \frac{\dot{\omega}_\zeta}{2}; \\ \ddot{\beta} + 2dw_0\dot{\beta} + (\omega_0^2 - \Omega^2)\beta - 2\Omega\dot{\alpha} - 2dw_0\Omega\alpha &= \frac{\lambda\Omega}{2}\omega_\zeta - \frac{\dot{\omega}_\xi}{2}.\end{aligned}$$

Получена система уравнений, которая называется системой дифференциальных уравнений с линейными перекрестными связями.

### 1.5 Вывод уравнений движения ДГС

Для описания расположения рамы и платформы относительно друг друга и относительно основания ГС введем в рассмотрение следующие системы координат:

$O\xi\eta\zeta$  – система координат, связанная с объектом (основание).

$Ox_p y_p z_p$  – система координат, связанная с рамой.

$Ox_{п} y_{п} z_{п}$  – система координат, связанная с платформой.



$Ox_{yz}$  – система координат, связанная с гиروزлом (ГУ).

Введем некоторые обозначения:

$\alpha_1$  – угол поворота рамы стабилизатора относительно основания;

$\alpha_2$  – угол поворота платформы относительно рамы;

$\alpha_r, \beta_r$  – углы поворота гиروزла вокруг осей наружной и внутренней рамок относительно платформы.

$J_{x_p}, J_{y_p}, J_{z_p}$  – моменты инерции рамы относительно осей  $x_p, y_p, z_p$ ;

$J_{x_{\pi}}, J_{y_{\pi}}, J_{z_{\pi}}$  – моменты инерции платформы относительно осей  $x_{\pi}, y_{\pi}, z_{\pi}$ ;

$H$  – вектор кинетического момента гироскопа;

При составлении дифференциальных уравнений движения, учтем, что все элементы ДГС являются абсолютно жесткими, люфты отсутствуют, скорость вращения ротора гироскопа постоянна.

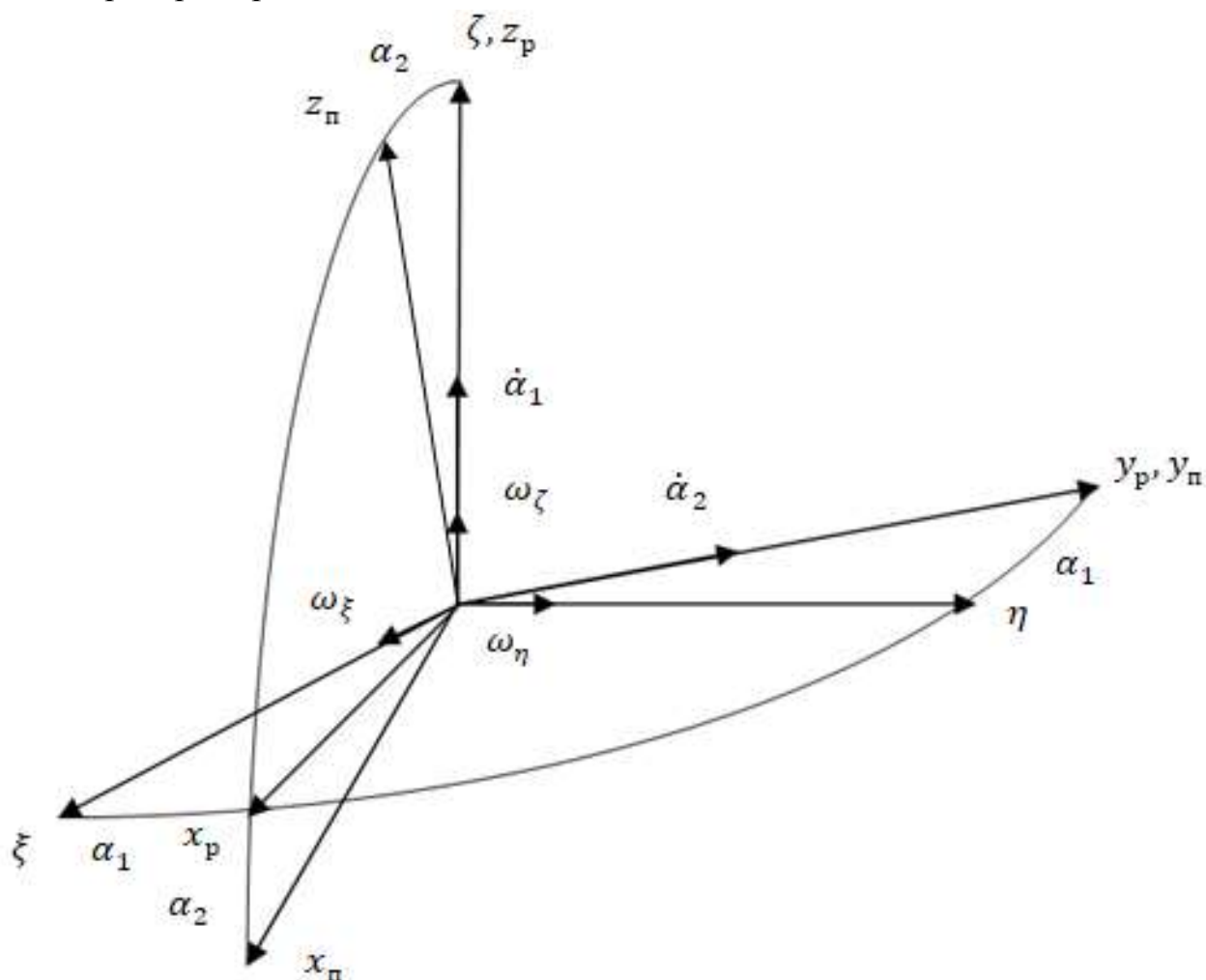


Рисунок 1.6 – Системы координат, связанные с основанием, рамой и платформой

Под действием угловых скоростей  $\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2$  система совершает повороты на углы  $\alpha_1, \alpha_2$ . Таким образом, получены системы координат связанные с рамой и платформой.

Пусть объект движется с угловой скоростью  $\vec{\omega} = (\vec{\omega}_\xi, \vec{\omega}_\eta, \vec{\omega}_\zeta)$ . Тогда проекции абсолютных угловых скоростей рамы и платформы на связанные оси имеют вид

$$\begin{aligned} \omega_{x_{pm}} &= \omega_\xi \cos \alpha_1 + \omega_\eta \sin \alpha_1; \\ \omega_{y_{pm}} &= \omega_\eta \cos \alpha_1 - \omega_\xi \sin \alpha_1; \\ \omega_{z_{pm}} &= \omega_\zeta + \dot{\alpha}_1; \\ \\ \omega_{x_n} &= \omega_{x_{pm}} \cos \alpha_2 - \omega_{z_{pm}} \sin \alpha_2; \\ \omega_{y_n} &= \omega_{y_{pm}} + \dot{\alpha}_2; \\ \omega_{z_n} &= \omega_{z_{pm}} \cos \alpha_2 + \omega_{x_{pm}} \sin \alpha_2. \end{aligned} \tag{1.17}$$

Уравнения движения гиросtabilизатора на подвижном основании:

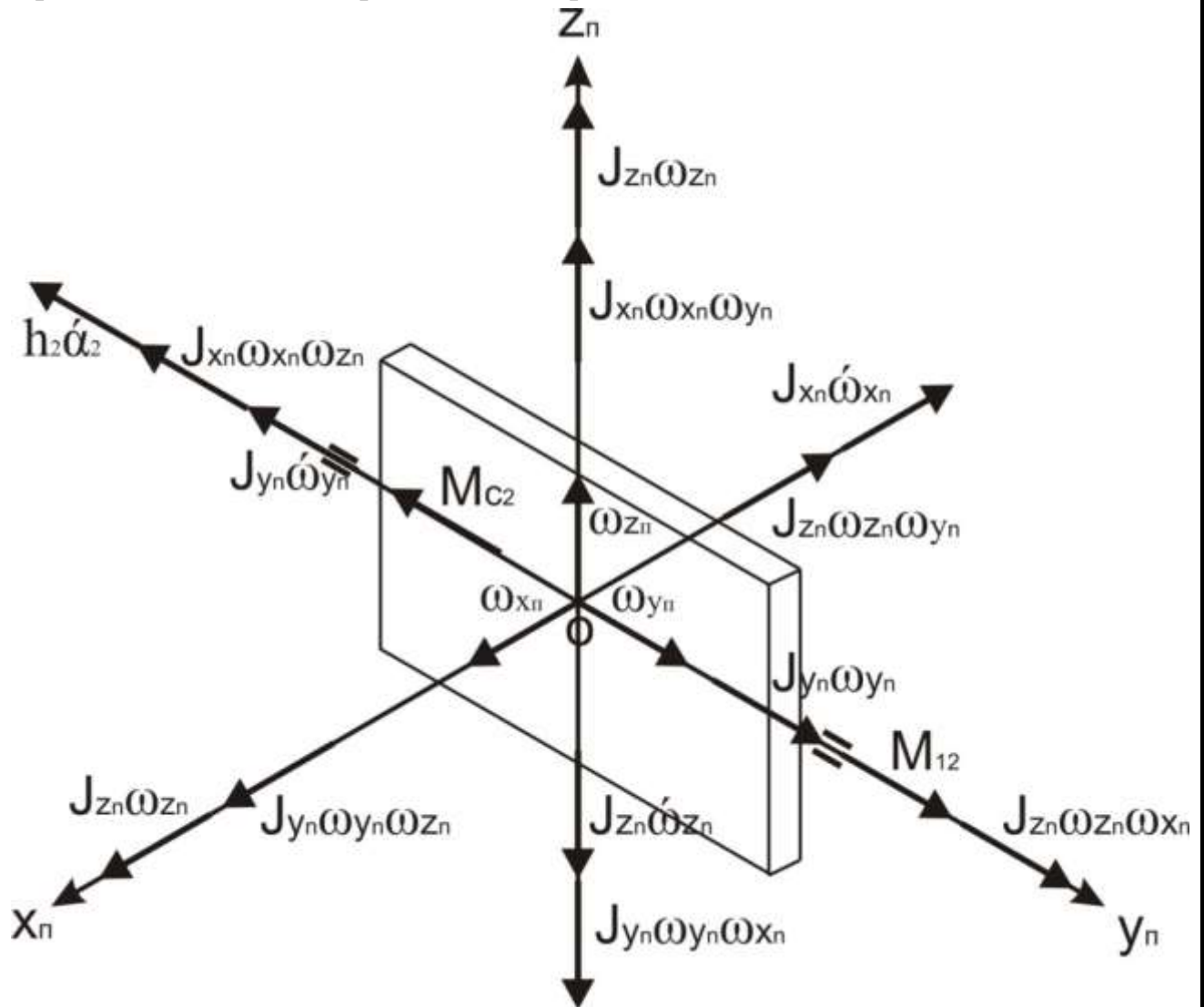


Рисунок 1.7 – Моменты относительно осей платформы

$$M_{x_n} = -J_{x_n} \dot{\omega}_{x_n} + (J_{y_n} - J_{z_n}) \omega_{y_n} \omega_{z_n}$$

$$M_{y_{\Pi}} = -J_{y_{\Pi}} \dot{\omega}_{y_{\Pi}} + (J_{z_{\Pi}} - J_{x_{\Pi}}) \omega_{z_{\Pi}} \omega_{x_{\Pi}}$$

$$M_{z_{\Pi}} = -J_{z_{\Pi}} \dot{\omega}_{z_{\Pi}} + (J_{x_{\Pi}} - J_{y_{\Pi}}) \omega_{x_{\Pi}} \omega_{y_{\Pi}}$$

Сумма моментов относительно оси платформы  $Oy_{\Pi}$ :

$$\sum \text{mom } y_{\Pi} = 0;$$

$$M_{y_{\Pi}} + M_{12} - M_{c2} - h_2 \dot{\alpha}_2 = 0$$

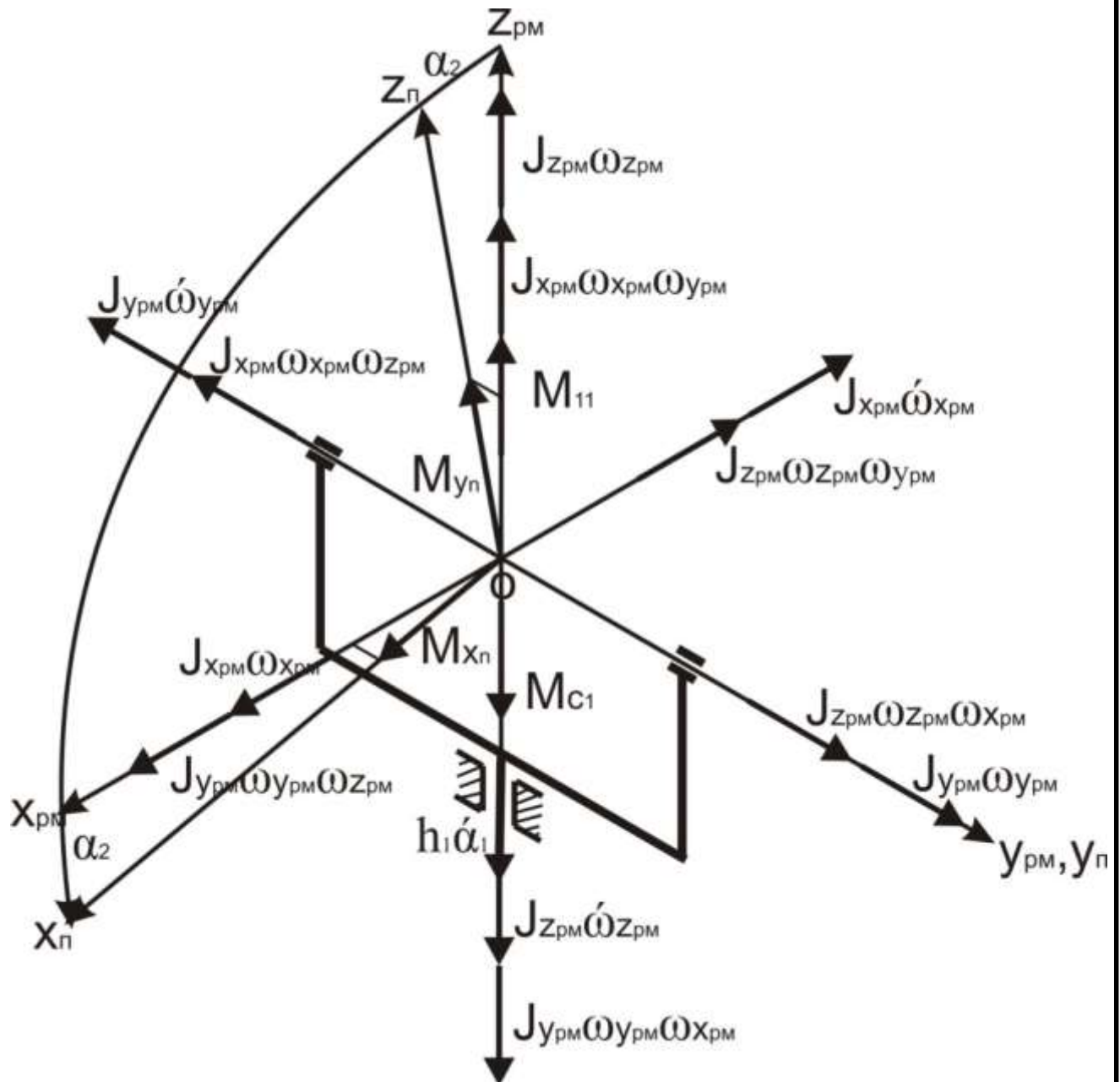


Рисунок 1.8 – Моменты инерции относительно осей рамы

$$M_{x_{\text{рм}}} = -J_{x_{\text{рм}}} \dot{\omega}_{x_{\text{рм}}} + J_{y_{\text{рм}}} \omega_{y_{\text{рм}}} \omega_{z_{\text{рм}}} - J_{z_{\text{рм}}} \omega_{z_{\text{рм}}} \omega_{y_{\text{рм}}} + M_{x_{\Pi}} \sin \alpha_2 + M_{z_{\Pi}} \cos \alpha_2;$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$M_{y_{pm}} = -J_{y_{pm}} \dot{\omega}_{y_{pm}} - J_{x_{pm}} \omega_{x_{pm}} \omega_{z_{pm}} + J_{z_{pm}} \omega_{z_{pm}} \omega_{x_{pm}};$$

$$M_{z_{pm}} = -J_{z_{pm}} \dot{\omega}_{z_{pm}} + J_{x_{pm}} \omega_{y_{pm}} \omega_{x_{pm}} - J_{y_{pm}} \omega_{x_{pm}} \omega_{y_{pm}} - M_{x_{п}} \sin \alpha_2 + M_{z_{п}} \cos \alpha_2;$$

Сумма моментов относительно оси  $z_{pm}$  рамы (Рисунок 1.8)

$$\sum mom z_p = 0;$$

$$M_{z_{pm}} = -J_{z_{pm}} \dot{\omega}_{z_{pm}} + J_{x_{pm}} \omega_{y_{pm}} \omega_{x_{pm}} - J_{y_{pm}} \omega_{x_{pm}} \omega_{y_{pm}} - M_{x_{п}} \sin \alpha_2 + M_{z_{п}} \cos \alpha_2 - h_1 \dot{\alpha}_1 - M_{c1} + M_{11} = 0.$$

Добавим уравнения движения РВГ:

$$-(J_{z_{pm}} + J_{z_{п}}) \ddot{\alpha}_1 - h_1 \dot{\alpha}_1 - M_{c1} + M_{11} = 0,$$

$$\ddot{\alpha} + 2\Omega \dot{\beta} + 2dw_0 \dot{\alpha} + 2dw_0 \Omega \beta + (w_0^2 - \Omega^2) \alpha = \lambda \Omega \frac{w_{zп}}{2} - \frac{w_{yп}}{2},$$

$$-J_{y_{п}} \dot{w}_{y_{п}} + (J_{z_{п}} - J_{x_{п}}) w_{zп} w_{xп} - h_2 \dot{\alpha}_2 - M_{c2} + M_{12} = 0,$$

$$\ddot{\beta} - 2\Omega \dot{\alpha} + 2dw_0 \dot{\beta} - 2dw_0 \Omega \alpha + (w_0^2 - \Omega^2) \beta = \lambda \Omega \frac{w_{yп}}{2} - \frac{w_{zп}}{2}.$$

Найдем передаточные функции стабилизатора:

$$\Delta = \begin{vmatrix} J_{z_p} p^2 + h_1 p & K_1 & 0 \\ 0 & p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2) & -(2\Omega p + 2dw_0 \Omega) \\ 0 & 2\Omega p + 2dw_0 \Omega & p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2) \end{vmatrix} =$$

$$(J_{z_p} p^2 + h_1 p) \left[ (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0 \Omega)^2 \right];$$

$$\Delta_{\alpha_1} = \begin{vmatrix} M_{11} & K_1 & 0 \\ \lambda \Omega \frac{w_{zп}}{2} - \frac{p}{2} w_{yп} & p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2) & -(2\Omega p + 2dw_0 \Omega) \\ \lambda \Omega \frac{w_{yп}}{2} - \frac{p}{2} w_{zп} & 2\Omega p + 2dw_0 \Omega & p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2) \end{vmatrix}$$

$$= M_{11} \left[ (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0 \Omega)^2 \right]$$

$$- \left[ \frac{\lambda \Omega}{2} K_1 (2\Omega p + 2dw_0 \Omega) - \frac{p}{2} K_1 (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 \right] w_{yп}$$

$$- \left[ \frac{\lambda \Omega}{2} K_1 (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2)) - \frac{p}{2} K_1 (2\Omega p + 2dw_0 \Omega) \right] w_{zп};$$

$$\Delta_{\alpha} = \begin{vmatrix} J_{z_p} p^2 + h_1 p & M_{11} & 0 \\ 0 & \lambda \Omega \frac{w_{z\Pi}}{2} - \frac{p}{2} w_{y\Pi} & -(2\Omega p + 2dw_0 \Omega) \\ 0 & \lambda \Omega \frac{w_{y\Pi}}{2} - \frac{p}{2} w_{z\Pi} & p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2) \end{vmatrix}$$

$$= (J_{z_p} p^2 + h_1 p) \left[ -\frac{1}{2} \left( \lambda \Omega (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2)) - p(2\Omega p + 2dw_0 \Omega) \right) w_{z\Pi} - \frac{1}{2} \left( p(p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2)) - \lambda \Omega (2\Omega p + 2dw_0 \Omega) w_{y\Pi} \right) \right];$$

$$\Delta_{\beta} = \begin{vmatrix} J_{z_p} p^2 + h_1 p & K_1 & M_{11} \\ 0 & p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2) & \lambda \Omega \frac{w_{z\Pi}}{2} - \frac{p}{2} w_{y\Pi} \\ 0 & (2\Omega p + 2dw_0 \Omega) & \lambda \Omega \frac{w_{y\Pi}}{2} - \frac{p}{2} w_{z\Pi} \end{vmatrix}$$

$$= (J_{z_p} p^2 + h_1 p) \left[ \frac{1}{2} (\lambda \Omega (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2)) + p(2\Omega p + 2dw_0 \Omega) w_{y\Pi} - \frac{1}{2} (p(p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2)) + \lambda \Omega (2\Omega p + 2dw_0 \Omega) w_{z\Pi}) \right];$$

Передаточные функции стабилизатора:

$$W_{\alpha_1, M_{11}}(p) = \frac{\left[ (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0 \Omega)^2 \right] - \left[ \frac{\lambda \Omega}{2} K_1 (2\Omega p + 2dw_0 \Omega) - \frac{p}{2} K_1 (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 \right] w_{y\Pi} - \left[ \frac{\lambda \Omega}{2} K_1 (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2)) - \frac{p}{2} K_1 (2\Omega p + 2dw_0 \Omega) \right] w_{z\Pi}}{(J_{z_p} p^2 + h_1 p) \left( (p^2 + 2dw_0 p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0 \Omega)^2 \right)}$$

$$W_{\alpha, M_{11}}(p) = \frac{-\frac{1}{2} \left( \lambda \Omega (p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2)) - \frac{p}{2} K_1 (2\Omega p + 2dw_0\Omega) \right) w_{z\Pi} -}{(p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0\Omega)^2}$$

$$\frac{-\frac{1}{2} \left( p(p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2)) - \lambda \Omega (2\Omega p + 2dw_0\Omega) \right) w_{y\Pi}}{(p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0\Omega)^2};$$

$$W_{\beta, M_{11}}(p) = \frac{\frac{1}{2} \left( \lambda \Omega (p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2)) + p(2\Omega p + 2dw_0\Omega) \right) w_{y\Pi} -}{(p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0\Omega)^2}$$

$$\frac{-\frac{1}{2} \left( p(p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2)) + \lambda \Omega (2\Omega p + 2dw_0\Omega) \right) w_{z\Pi}}{(p^2 + 2dw_0p + (w_0^2 - \Omega^2))^2 + (2\Omega p + 2dw_0\Omega)^2}.$$

**Вывод по разделу 1:** выполнен анализ ТЗ и выбрана кинематическая схема, рассмотрен принцип действия ДГС, выведены уравнения движения.

## 2 РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ДГС

### 2.1 Конструирование ДГС

Задачей двухосного гиросtabilизатора является сохранение требуемого положения платформы или объекта, находящегося на этой платформе в указанной системе координат.

В качестве чувствительного элемента используется РВГ. Он имеет ряд достоинств: точность, малую массу, габариты и потребляемую мощность, сохранение работоспособности в широком температурном диапазоне.

Гироскоп устанавливается на платформу так, чтобы одна его ось была параллельна стабилизируемой оси платформы. Такое положение гироскопа соответствует нулевым сигналам с датчиков углов – режим свободного гироскопа. Данный режим используется для проверки скорости ухода гироскопа под действием возмущающих моментов. На оси наружной рамы установлен датчик угла, сигнал с которого через усилитель подается на ДС. Кроме системы стабилизации гиросtabilизатор имеет систему приведения, датчик моментов которой расположен на оси внутренней рамки гироскопа. ГС работает в двух режимах – стабилизации и слежение за целью.

Основной задачей проектирования гироскопических систем ориентации или навигации, является выбор и разработка ее принципиальной схемы, когда следует определять возможность ее технической реализации, с характеристиками, необходимыми при эксплуатации данной системы.

На основе кинематической схемы ДГС, необходимо выбрать основные элементы гиросtabilизатора.

ДГС состоит из:

- платформа с чувствительными элементами;
- рамы;
- полуосей;
- двигателей стабилизации;
- датчика команд (поворотный трансформатор);
- опор;
- корпуса ДГС.

Рассмотрим каждый элемент.

Основной частью ДГС является платформа с чувствительными элементами такими как, РВГ, ТВ-камера, тепловизер и лазерный дальномер.

Рассмотрим конструкцию РВГ. Ранее была выбрана кинематическая схема РВГ.

РВГ состоит из элементов таких, как ротор, ротор и статор электродвигателя, датчик угла, датчик момента, корпус и опоры.

										Лист
										25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.03.02.2019.360.00 ПЗ					

Основным элементом РВГ является ротор, который задает направление кинетического момента. Материал, из которого изготавливается ротор, должен быть жаропрочным, немагнитным, хорошо обрабатываемым. Сталь 20Х13 подходит под эти параметры. Данный материал позволяет достичь нужный кинетический момент ротора. На рисунке 2.1 представлена 3D модель ротора с ленточным подвесом.

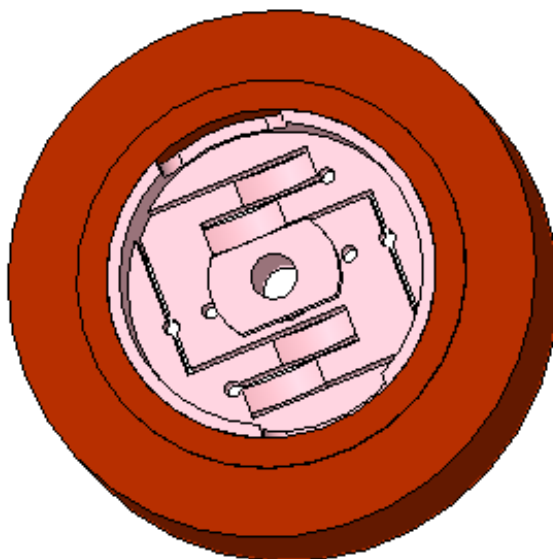


Рисунок 2.1 – 3D модель ротора РВГ с ленточным подвесом

В РВГ используется синхронный двигатель с постоянными магнитами (Рисунок 2.2).

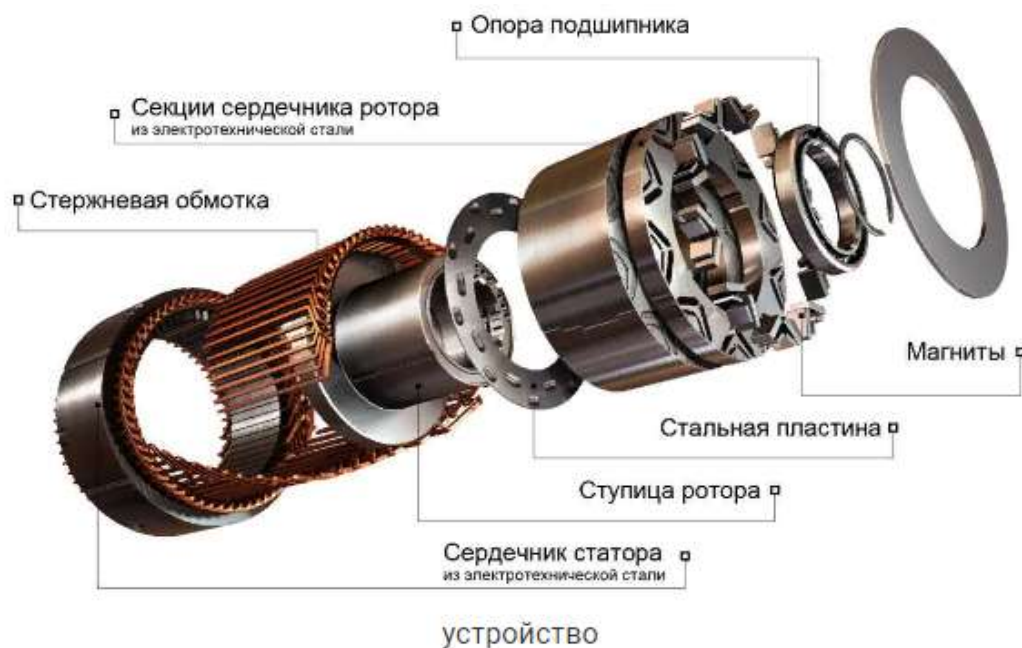


Рисунок 2.2 – Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (СДПМ)



Рассмотрим принцип его работы. Синхронный двигатель с постоянными магнитами – это синхронный электродвигатель, индуктор которого состоит из постоянных магнитов.

Главное отличие между синхронным двигателем с постоянными магнитами и асинхронным электродвигателем заключается в роторе. При этом синхронные электродвигатели с постоянными магнитами имеют ряд преимуществ:

- мощность;
- объем;
- момент;

Ротор состоит из постоянных магнитов. В качестве постоянных магнитов используются материалы с высокой коэрцитивной силой. В данном случае используется, синхронный двигатель со встроенными (инкорпорированными) магнитами (Рисунок 2.3).

 **Постоянные магниты**



Рисунок 2.3 – Ротор синхронного двигателя со встроенными магнитами

Статор состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Наиболее распространены конструкции с двух- и трехфазной обмоткой.

В данной конструкции используется статор с распределенной обмоткой (Рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Статор электродвигателя с распределенной обмоткой

Принцип действия синхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора.

Магнитное поле ротора, взаимодействуя с синхронным переменным током обмоток статора, согласно закону Ампера, создает крутящий момент, заставляя ротор вращаться.

Постоянные магниты, расположенные на роторе СДПМ, создают постоянное магнитное поле. При синхронной скорости вращения ротора с полем статора, полюса ротора сцепляются с вращающимся магнитным полем статора.

Преимущества и недостатки:

- оптимальный режим работы можно получить при воздействии реактивной энергии, что возможно при автоматической регулировке тока. Эта особенность обуславливает возможность работы электродвигателя без потребления и отдачи реактивной энергии в сеть. В отличие от асинхронного двигателя, синхронный имеет небольшие габаритные размеры при той же мощности, но при этом КПД значительно выше;
- колебания напряжения в сети в меньшей степени воздействуют на синхронный двигатель. Максимальный момент пропорционален напряжению сети;
- высокая перегрузочная способность. Путем повышения тока возбуждения, можно провести значительное повышение перегрузочной способности. Это

происходит на момент резкого и кратковременного возникновения дополнительной нагрузки на выходном валу;

- скорость вращения выходного вала остается неизменной при любой нагрузке, если она не превышает показатель перегрузочной способности.

К недостаткам рассматриваемой конструкции можно отнести более сложную конструкцию и вследствие этого более высокую стоимость, чем у асинхронных двигателей. Однако в некоторых случаях, обойтись без данного типа электродвигателя невозможно.

В данной конструкции РВГ используется магнитоэлектрический датчик момента. 3D модель представлена на рисунке 2.5.

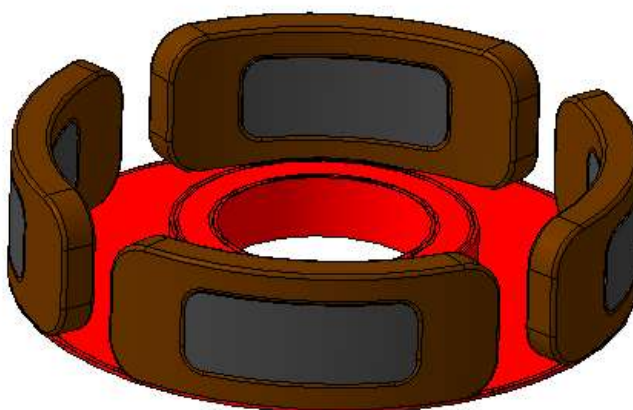


Рисунок 2.5 – Магнитоэлектрический датчик момента

Все эти датчики работают, на принципе дифференциального трансформатора с воздушными зазорами в магнитопроводе. Когда ротор датчика поворачивается относительно статора, то изменяется площадь воздушных зазоров под полюсами статора. За счет этого происходит перераспределение магнитных потоков и в выходных обмотках датчика, которые расположены на полюсах статора, трансформируется ЭДС, которая пропорциональна углу поворота ротора.

Согласно выше изложенному на рисунке 2.6 представлена конструкция РВГ.

Разработанный гироскоп с упругим ленточным подвесом. Подвес обеспечивает ротору свободу вращения относительно двух осей. При вращении ротора и подвеса, ось вращения ротора и ось подвеса всегда остаются взаимно перпендикулярными. Сила тяжести не влияет на движение оси такого гироскопа и ее уходы при внешних возмущениях могут вызываться лишь моментами сил в осях.

Описание сборочного процесса.

В качестве опор используются радиально–упорные шарикоподшипники. Основными элементами шарикоподшипника: кольца – внутреннее и наружное, шарик и сепаратор. От подшипников требуется не только сохранять свою работоспособность, но и обеспечить целый ряд показателей, одним из которых

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

является стабильное положение центра масс. 3D модель представлена в приложении Б.

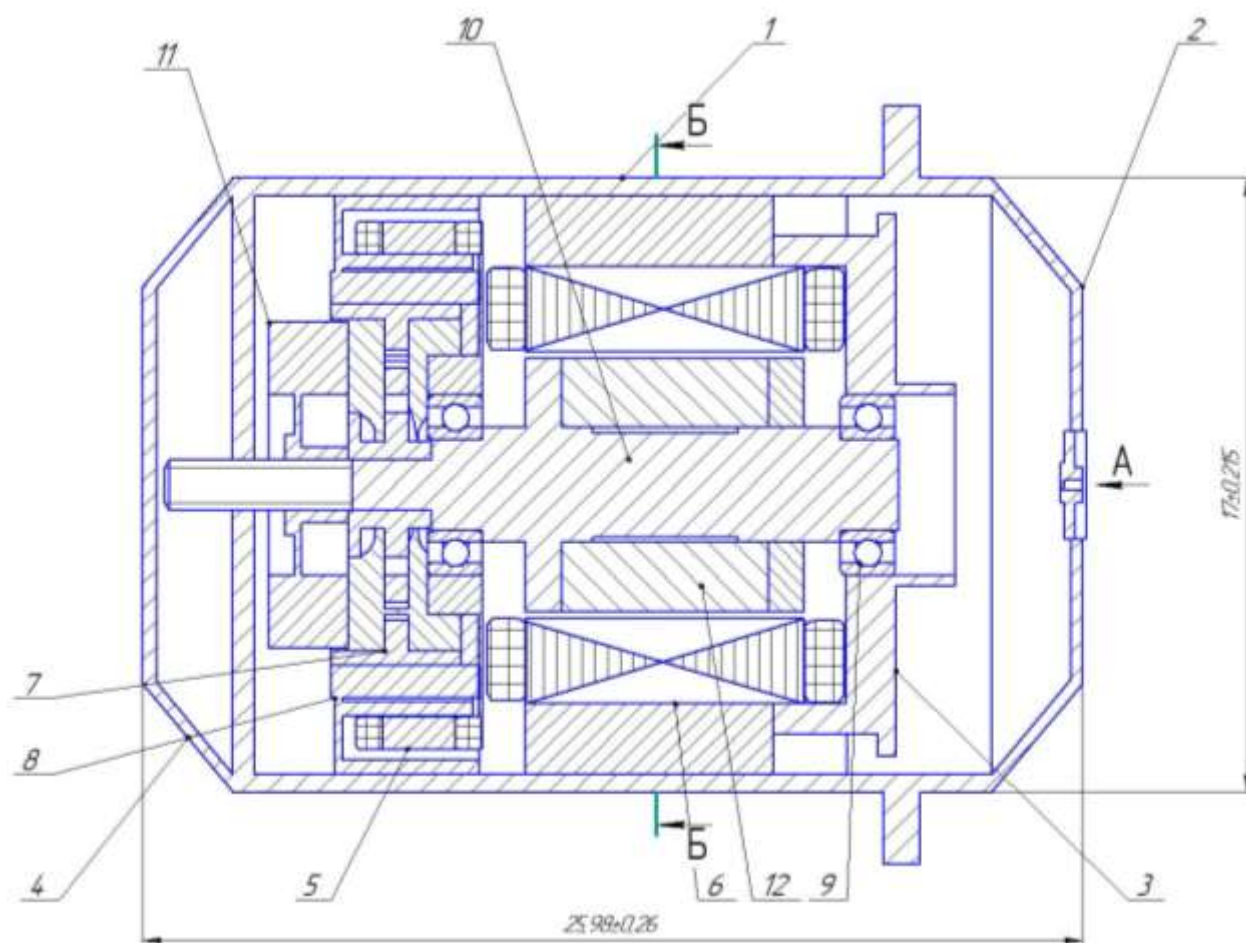


Рисунок 2.6 – Сборочный чертеж РВГ:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – втулка; 4 – крышка ротора РВГ; 5 – Датчик момента; 6 – статор; 7 – ленточный подвес; 8 – ротор; 9 – подшипники; 10 – вал; 11 – гайка.

Сборка прибора производится в два этапа:

1 этап: статор, поз.6, закрепляется на специальное УСП, после на статор крепится ротор поз.6 с постоянными магнитами, далее устанавливаются подшипники поз.9, на наружное кольцо подшипника крепится вал поз.10. Затем на вал поз.10, крепится втулка поз.3.

2 этап: на втором этапе сборки производится сборка ротора поз.8 и подвеса поз.7.

После этого, ротор надевается на вал и закрепляется гайкой поз.11. После сборки основных элементов, прибор окунают в чистый спирт на 10 мин., чтобы удалить жир, стружку, оставшиеся в процессе сборки.

Затем надевается крышка поз.2 и поз.4 и запаивается с двух сторон.

					Лист
					30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

Также на платформу устанавливаются ТВ-камера, тепловизор и лазерный дальномер.

Низкоуровневая ТВ-камера высокого разрешения дает возможность обнаружения малоразмерных целей и их распознавания на больших расстояниях, в том числе при малой освещенности. Их рабочая область спектра 0,4 – 0,9 мкм не является для этого достаточно эффективной при плохой освещенности. Поэтому дополнительно к ТВ-системам используют тепловизоры, работающие в более благоприятной области спектра 3 – 5 или 8 – 14 мкм [9]. Это позволяет сохранить возможность видения как при нормальной, так и при пониженной прозрачности атмосферы, обеспечивая наблюдение даже в дымах. Если дальность видения ТВ-системы зависит от уровня естественной освещенности, то тепловизор реагирует на разницу в температурах наблюдаемого объекта и окружающего его фона (ландшафта). Поэтому тепловизор может работать при любой освещенности, т.е. круглосуточно. Однако качество изображения в тепловизоре ниже, чем в ТВ-системе. Кроме того, его изображение специфично и не обеспечивает той детализации, которую создают телевизионные системы. Для выдачи информации о расстоянии до цели на платформу устанавливается универсальный лазерный дальномер Генезис – ЛД-1[9]. Дальномер обеспечивают высокую точность измерения  $\pm 5$  м ( $\pm 2,5$  м.,  $\pm 1$  м. опционально), малый вес. Так же имеет хорошую адаптивность к окружающей среде, высокую надежность. Специальная следящая система автоматически удерживает лазерный луч на объекте наблюдения в процессе полета.

В качестве датчика команд используется поворотный трансформатор. 3D модель представлена на рисунке 2.7.

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



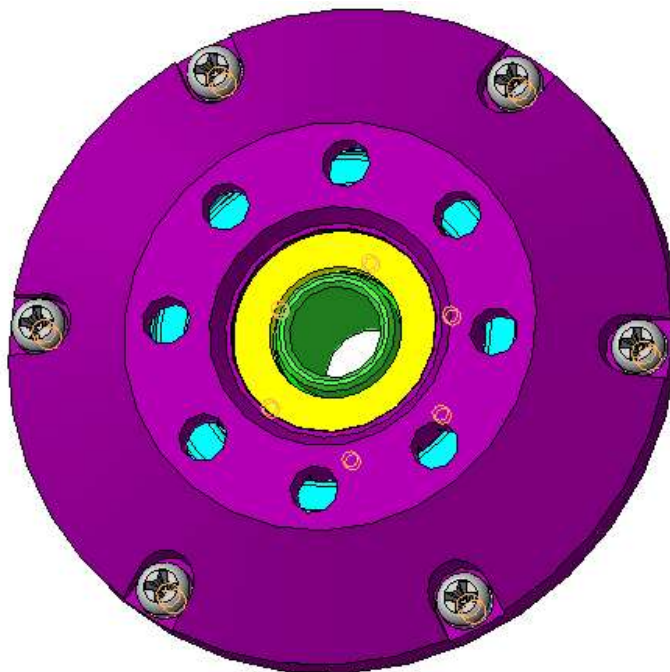


Рисунок 2.7 – Поворотный трансформатор

Конструкция поворотного трансформатора состоит из статора и ротора. Они выполнены из набранных и изолированных между собой пластин из электротехнической стали, в которых сделаны пазы для укладки обмоток: двух взаимно перпендикулярных на роторе, и двух взаимно перпендикулярных на статоре. Пространственный сдвиг обмоток ротора и статора составляет 90 угловых градусов относительно друг друга. Концы обмоток статора закрепляются непосредственно на неподвижных клеммах, а концы обмоток ротора подсоединяются к клеммам через токосъемные щетки или контактные кольца.

В зависимости от способа включения обмоток ротора и статора, поворотный трансформатор может быть:

- синусно – косинусный который позволяет получать переменные напряжения, пропорциональные  $\sin\alpha$  или  $\cos\alpha$ , в зависимости от используемой обмотки ротора. Если используется обе обмотки, то получаем синусно-косинусный поворотный трансформатор;
- линейный тип трансформатора, дает возможность получить переменное напряжение, которое находится в прямолинейной зависимости от угла  $\alpha$ ;
- построитель, такие поворотные трансформаторы применяются в автоматических устройствах для решения геометрических или математических задач, в качестве преобразователя пространственных координат;
- масштабные, вращающиеся трансформаторы этого типа могут использоваться в фазовращателях для согласования напряжений в

отдельных модулях некоторых автоматических устройств, или в качестве датчика или приемника при синхронизации угла поворота ротора.

На сегодняшний день, наиболее востребованными вращающимися трансформаторами являются устройства, основанные на синусно-косинусном подключении обмоток ротора.

Синусно-косинусный поворотный трансформатор (СКПТ) – это информационная электрическая машина, амплитуда выходного напряжения которой является функцией входного напряжения и углового положения ротора (Рисунок 2.8).

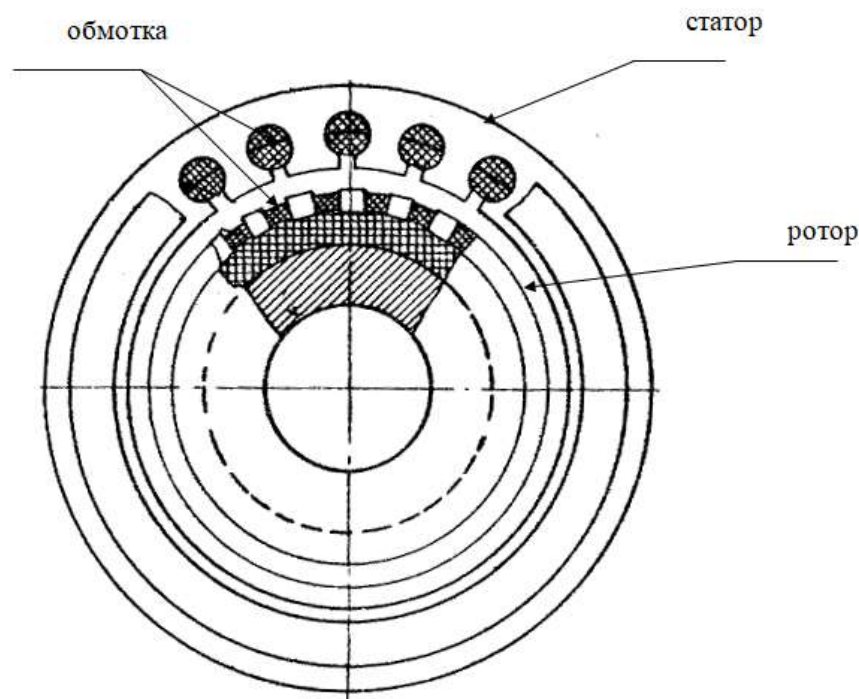


Рисунок 2.8 – Конструкция поворотного трансформатора

Первичная обмотка, расположена на роторе, и две вторичных обмотки, расположены на статоре. При подаче переменного тока с напряжением возбуждения определенного значения на первичную обмотку, вырабатывается пульсирующий магнитный поток, который индуцирует электродвижущую силу в обмотках ротора, значение которой прямо пропорционально углу поворота ротора. Этот угол отсчитывается от положения ротора, когда его обмотка находится перпендикулярно к оси обмотки возбуждения (амплитуда и частота напряжения возбуждения определяется параметрами СКПТ):

$$U_B = U_M \sin \omega t, \quad (2.1)$$

где  $\omega$  – частота напряжения возбуждения;

$U_M$  – амплитудное значение напряжения возбуждения.

Для повышения разрядности преобразования угол-код используются многополюсные СКПТ с электрической редукцией, в которых одному обороту ротора СКПТ соответствует много периодов изменения ЭДС вторичных обмоток. Кроме повышения разрядности в таких СКПТ происходит ослабления влияния технологических погрешностей изготовления, в том числе воздушного зазора между статором и ротором. В этом случае для обеспечения однозначности преобразования использовалась конструкция, состоящая из двух датчиков: грубого и точного отсчета.

Пределы погрешностей наиболее распространенных двухполюсных синусо-косинусных поворотных трансформаторов, варьируются в пределах 0,005 — 0,2%. Погрешность высокоточных ВТ не должна превышать значений 0,01 – 0,03%. Погрешность поворотных трансформаторов, выступающих в качестве синхронизирующих датчиков, составляет 1-10 угловых минут. Прецизионные трансформаторы поворотного типа имеют погрешность не более 1 угловой минуты. Если требуется более высокая точность позиционирования, то в таком случае, чаще всего, применяются многополюсные ВТ. Погрешность такого устройства не превышает 30 угловых секунд.

Такой элемент как корпус состоит из двух частей: фланец с уплотнительным кольцом и сам корпус. 3D модель представлена на рисунке 2.9.

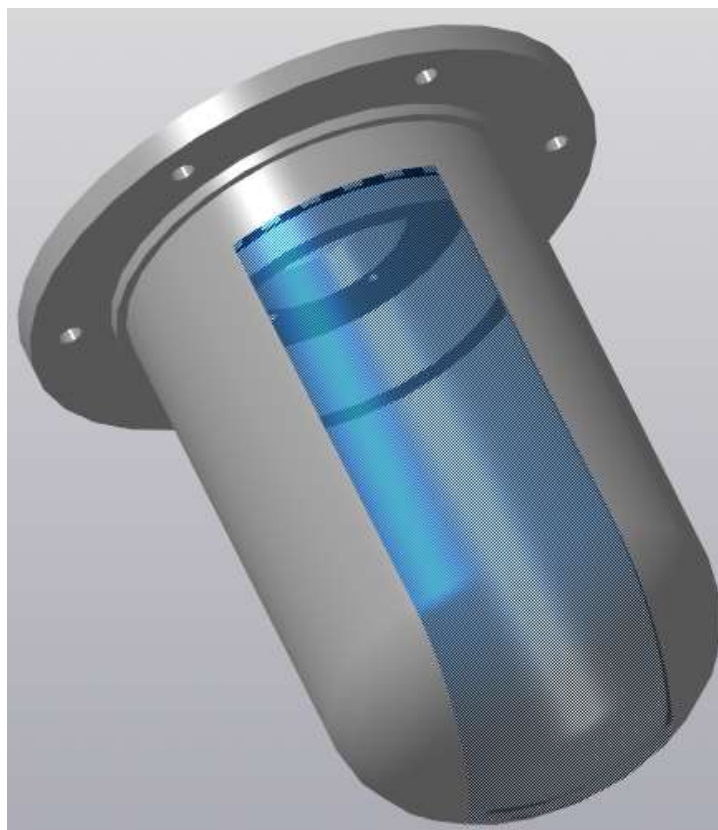


Рисунок 2.9 – Корпус в сборе



Также на корпусе устанавливаются штепсельные разъемы для подачи питания и также имеются посадочные поверхности для крепления ДГС к основанию.

3D модель сборки ДГС представлена на рисунке 2.10.

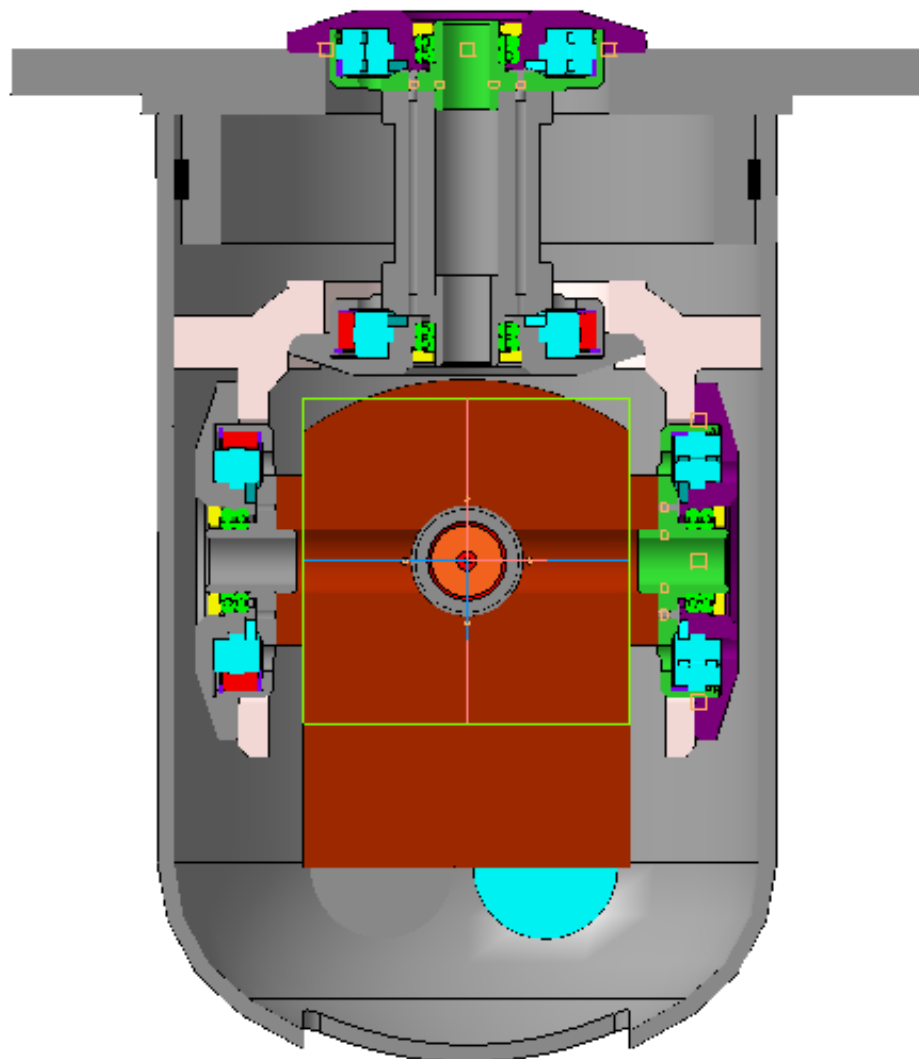


Рисунок 2.10 – Сборка ДГС

## 2.2 Расчет двигателя стабилизации ДГС

В программном пакете КОМПАС 3D v.16 было выполнено построение 3D модели двухосного индикаторного гиросtabilизатора на базе РВГ. С помощью программного обеспечения были получены численные значения массы и моментов инерции гиросtabilизатора.

Масса ГС ( $m$ ), кг:	.....2.5
Масса нагруженной платформы с рамой ( $m$ ), кг:	.....2.0
Момент инерции ГС по оси наружной рамы ( $J_x$ ), ( $\Gamma \cdot \text{см}^2$ ):	.....20184
Момент инерции ГС по оси наружной рамы ( $J_y$ ), ( $\Gamma \cdot \text{см}^2$ ):	.....23361
Момент инерции ГС по оси наружной рамы ( $J_z$ ), ( $\Gamma \cdot \text{см}^2$ ):	.....5102
Момент инерции платформы ( $J_x$ ), ( $\Gamma \cdot \text{см}^2$ ):	.....9205

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

Лист

35

Момент инерции платформы ( $J_y$ ), ( $\Gamma \cdot \text{см}^2$ ):.....6029

Момент инерции платформы ( $J_z$ ), ( $\Gamma \cdot \text{см}^2$ ):.....4297

Выбор шарикоподшипника производился на основе полученной массы и заданного значения перегрузки. Тип шарикоподшипника радиальный. Параметры подшипника.

Номинальный диаметр ( $D_0$ ), см:.....1.32

Диаметр шарика ( $d_{ш}$ ), см:.....1.30

Момент трения в шарикоподшипниках определяется по формуле:

$$M_{\text{тршп}} = 1.3kR \frac{D_0}{d_{ш}}$$

где  $k=0.001$  см – коэффициент трения качения;

$R=3.30$  Н – радиальная нагрузка на подшипник;

$D_0$  – номинальный диаметр;

$d_{ш}$  – диаметр шариков.

Подставив значения, получим:

$$M_{\text{тршп}} = 1.3 \cdot 0.001 \cdot 3.30 \cdot \frac{1.32}{1.30} = 0.00435 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент упругих токоподводов определяется по следующей формуле:

$$M_{\text{тртп}} = k_{\text{тп}} \frac{N}{l_{\text{тп}}} \alpha_1,$$

где  $k_{mn}$  – эмпирический коэффициент для токоподводов;

$\alpha_1=110^\circ=0.61\pi$ ;

$N$  – количество токоподводов;

$l_{mn}$  – длина токоподводов между местами заделки проводников.

Подставим значения:

$$M_{\text{тртп}} = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 0.61 \cdot 3.14 = 0.00076 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты трения, создаваемые безредукторными двигателями стабилизации, имеют величины, сравнимые с моментами трения в опорах. Принимаю момент трения равным  $M_{\text{тр дс}}=0.02$  Н·м.

Найдем суммарный возмущающий момент:

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

$$M_B = M_{тршп} + M_{тртп} + M_{трдс} = 0.025 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Исходя из полученных значений, выбираем двигатель стабилизации ДБ-051А (Рисунок 2.11).

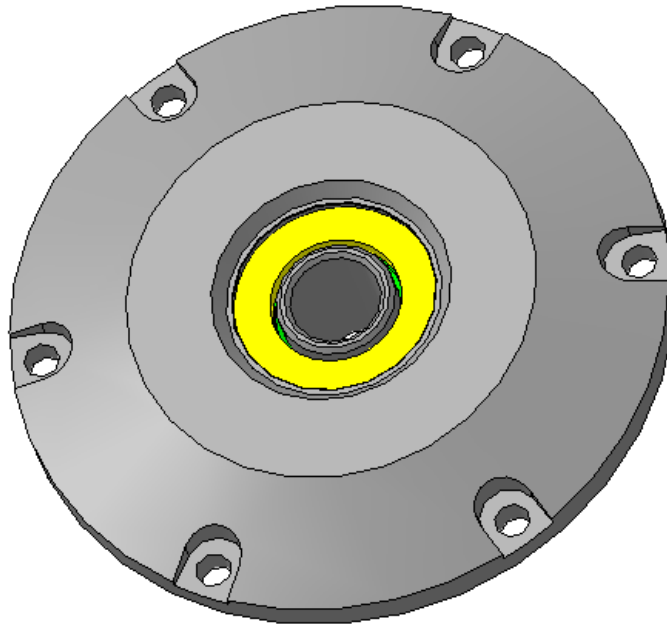


Рисунок 2.11 – Двигатель ДБ-051А

Характеристики двигателя:

Число фаз:.....	2
Число пар полюсов:.....	8
Пусковой момент, Н·м:.....	0.6
Пусковая мощность, Вт:.....	63
Пусковой ток, А:.....	2.6
Скорость холостого хода, об/мин:.....	1000

Используя параметры, выбранного двигателя стабилизации, определим коэффициент демпфирования:

$$h = \frac{M_{max}}{\omega_{xx}} = \frac{0.6}{104.72} = 0.005 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}} = 0.5 \frac{\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

Согласно ТЗ:

$$\alpha_{ст} = 2 \text{ угл} \cdot \text{мин} = 0,00058 \text{ рад}.$$

$$K_2 = \frac{M_{12}}{\alpha_{ст}}$$

$$M_{12} = M_B$$

$$K_2 = \frac{0.25}{0,00058} = 431 \frac{\text{Н} \cdot \text{см}}{\text{рад}}$$

### 2.3 Расчет подшипников РВГ

Представляет собой сочетание контактного кольца и щетки с щёткодержателем.

Обычно в качестве опор вал применяют радиально-упорные шарикоподшипники [6].

Проведем расчет подшипника.

На рисунке 2.12 представлена схема подшипника.

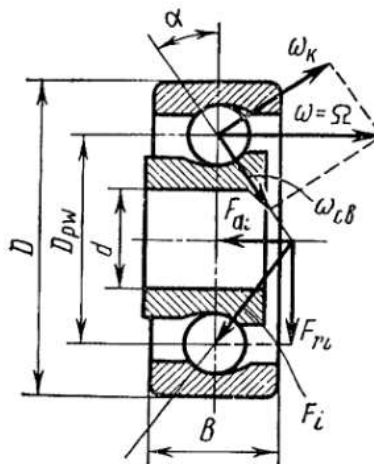


Рисунок 2.12 – Радиально-упорный подшипник

Конструкция опор должна быть такой, чтобы при оптимальном осевом натяге подшипников обеспечивалась минимальная вибрация ротора. В опорах ротора недопустим осевой зазор, т.к. он вызывает произвольное смещение центра масс гидродвигателя. Большой натяг недопустим, т.к. он вызывает повышенный момент трения в опорах, вибрацию, быстрый износ подшипников.

Предварительно подшипники выбирают по формуле (2.2):

$$zd_{ш}^2 \geq \frac{Km_M}{10^5 \sin \beta'} \quad (2.2)$$

где  $K$  – кратность максимально перегрузки;

$m_M$  – масса вращающихся частей, г;

$\beta_0$  – первоначальный угол контакта, выбирается от  $12^0 \dots 35^0$ .

Из формулы (2.2) следует, что:

$$zd_{\text{ш}}^2 \geq \frac{5 \cdot 6}{10^5 \sin 16} \geq 0,001$$

Из соотношения (2.2) следует, что выбираем из таблицы 2.1 [1] шарикоподшипник С1076691Е.

Параметры шарикоподшипника:

внутренний диаметр  $d_{\text{в}}=1.5 \text{ мм} = 0.15 \text{ см}$ ;

наружный диаметр  $d_{\text{н}}=5 \text{ мм} = 0.5 \text{ см}$ ;

$D_0=3.13 \text{ мм} = 0.31 \text{ см}$ ;

ширина  $B=2 \text{ мм} = 0.2 \text{ см}$ ;

число шариков  $z=5$ ;

диаметр шарика  $d_{\text{ш}}=1 \text{ мм} = 0.1 \text{ см}$ ;

$zd_{\text{ш}}^2 = 0,05 \text{ см}^2$ .

Далее необходимо рассчитать предварительную осевую нагрузку на подшипники. Она должна быть такой, чтобы обеспечивать достаточную жесткость пары предварительно нагруженных подшипников и, в то время, чтобы не был велик момент трения. Поэтому предварительно осевая нагрузка на подшипники должна быть равна примерно 15...50% от максимально возможной нагрузки на них, но не меньше удвоенного веса вращающихся частей гидродвигателя.

Предварительная осевая нагрузка на подшипники определяется по формуле (2.3):

$$Az_0 \approx 0,35 K g m_{\text{вр.ч.}} \quad (2.3)$$

$$Az_0 = 0,35 \cdot 6 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,103 \text{ Н}$$

Потери на трение в подшипниках составляют от 20 до 100% от общих механических потерь. Момент на трение пары гироскопических подшипников рассчитывается по формуле (2.4):

$$M_{\text{ТП}} = 0,6 \cdot 10^{-3} Az_0 \frac{D_0}{d_{\text{ш}}} \frac{1}{\sqrt{zd_{\text{ш}}}} + 4,41 \cdot 10^{-6} D_0^3 n, \quad (2.4)$$

$$M_{\text{ТП}} = 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,103 \cdot \frac{0,31}{0,1} \cdot \frac{1}{\sqrt{5 \cdot 0,1}} + 4,41 \cdot 10^{-6} \cdot 0,31^3 \cdot 24000,$$

$$M_{\text{ТП}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

Выбранные подшипники можно считать оптимальными, если у них контактные напряжения во всех режимах меньше допустимых, если обеспечена необходимая жесткость и минимально возможный момент трения. Количество масла в подшипнике, должно быть равно объему одного шарика.

#### 2.4 Расчет датчика момента РВГ

По закону Ампера на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, направление которой определяется по правилу левой руки:

$$F_{эм} = Bl_a I_y \sin \alpha,$$

где  $B$  – магнитная индукция в зазоре;

$l_a$  – активная длина проводника с током;

$I_y$  – ток управления датчиком;

$\alpha$  – угол направления тока и магнитными силовыми линиями.

Индукция в рабочем зазоре распределяется по закону, близкому к гармоническому.

Для увеличения выталкивающей силы в зоне магнитного поля размещается не один проводник, а набор – витки (или их части) плоской катушки. Так как катушка имеет  $\omega$  витков, то электромагнитная сила:

$$F_{эм} = \omega Bl_a I_y \sin \alpha.$$

Момент, создаваемый датчиком момента:

$$M = r n_k F_{эм},$$

где  $r$  – радиус от оси вращения рамки до середины катушки;

$n_k$  – число работающих катушек.

Кольцевой магнит укреплен на магнитопроводе. В зазор между ними вводятся две катушки, прикрепленные к немагнитному каркасу. Применяя правило левой руки можно увидеть, что верхний и нижний датчики создают момент по оси  $Ox$ .

Постоянные магниты изготавливаются из литейных сплавов на основе железа, алюминия, никеля, кобальта. Наиболее часто применяются марки сплавов: ЮНДК25ДА обладающая высокими магнитными свойствами и стабильностью.

Магнитопровод изготавливают из технически чистого железа или низкоуглеродистой стали. Катушки мотают медным проводом диаметром 0,08-0,12 мм, приклеивают к немагнитным каркасам и часто заливают синтетическими

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

смолами. Немагнитные каркасы делают из пластмассы или из алюминиевых сплавов.[4]

Рассчитаем требуемый максимальный момент, развиваемый датчиком момента, необходимый для обеспечения максимальной скорости прецессии, исходя из условия, заданного в техническом задании.

Из технического задания известно, что максимальная скорость прецессии должна быть равна 30 °/ч, а кинетический момент равен 0,075 10<sup>-3</sup> Н·м·с.

Максимальный момент равен:  $M_{max} = 0.075 \cdot 10^{-3} \cdot 14.4 \cdot 10^{-5} = 1.08 \cdot 10^{-6}$  Н·м.

Рассчитаем максимальный момент, развиваемый датчиком момента по формуле:

$$M = \frac{rn_k \omega B}{I_y}$$

$r=6.2$  мм;  $n_k=2$ ;  $\omega=5$ ;  $B=0.2$  Тл;  $l_a=12$  мм;  $d_m=0.08$  мм;

Рассчитаем максимальный ток в витках катушки из условия допустимого значения плотности тока  $q_{доп} < 10$  А/мм<sup>2</sup>:

$$I_m < \frac{q_{доп} \pi d^2}{4} = \frac{10 \cdot 3.14 \cdot 0.08^2}{4} = 0.05 \text{ А.}$$

Примем максимальное значение тока  $I_m=0.04$  А.

Максимальный момент найдем из следующей формулы:

$$M = 6.2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 5 \cdot 0.2 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 0.04 = 5.95 \cdot 10^{-6} \text{ Н·м.}$$

Следовательно, датчик момента с выбранными параметрами вполне удовлетворяет техническим требованиям.

## 2.5 Расчет погрешностей РВГ

Погрешность двухстепенного РВГ, порождаемая вибрацией основания на удвоенной частоте вращения ротора(2Ω).

Методическая погрешность:

$$\begin{aligned} \omega_\xi &= 0; \omega_\eta = 0; \\ \omega_{\eta_{\text{вибр}}} &= \omega_{\eta 0} \sin 2\Omega t. \end{aligned}$$

Рассмотрим движение по α:

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

$$\begin{aligned}
T^2\ddot{\alpha} + \alpha\xi T\dot{\alpha} + \alpha &= -b_1\omega_{\eta \text{ вибр.}} \cos\Omega t - T^2\dot{\omega}_{\eta \text{ вибр.}} \sin\Omega t, \\
\dot{\omega}_{\eta \text{ вибр.}} &= \omega_{\eta 0} 2\Omega \cos 2\Omega t, \\
T^2\ddot{\alpha} + 2\xi T\dot{\alpha} &= -b_1\omega_{\eta 0} \sin 2\Omega t \cos\Omega t - T^2\omega_{\eta 0} 2\Omega \cos 2\Omega t \sin\Omega t. \quad (2.5)
\end{aligned}$$

Уравнение (2.5) описывает движение ротора РВГ при наличии угловой вибрации основания на частоте  $2\Omega$ .

$$\begin{aligned}
T^2\ddot{\alpha} + 2\xi T\dot{\alpha} + \alpha &= -b_1\omega_{\eta 0} \frac{1}{2} (\sin 3\Omega t + \sin\Omega t) - T^2\omega_{\eta 0} - \\
-2\Omega \frac{1}{2} (\sin 3\Omega t - \sin\Omega t) & \quad (2.6)
\end{aligned}$$

Гармоники на частоте  $3\Omega t$  хотя и вызывают дополнительное движение по  $\alpha$ , на выходе синхронного детектора не проходят (фильтр нижних частот). В (2.6) выражении  $\sin\Omega t$  – моменты порождают такие же воздействия, что и измеряемые квазипостоянные угловые скорости.

Из условия отсутствия в правой части уравнения (2.6) возмущений:

$$\begin{aligned}
-b_1\omega_{\eta 0} \frac{1}{2} + T^2\omega_{\eta 0}\Omega &= 0, \\
b_1 \frac{1}{2} &= T^2\Omega,
\end{aligned}$$

где  $b_1 = \frac{J_z\Omega}{c+(J_z-J_x)\Omega^2}$ ;

$$T^2 = \frac{J_x}{c+(J_z-J_x)\Omega^2}.$$

После подстановки получим,

$$\begin{aligned}
J_z\Omega &= 2J_x\Omega, \\
J_z &= 2J_x. \quad (2.7)
\end{aligned}$$

Уравнение (2.7) – условие невозмущаемости гировибрациями на частоте  $2\Omega$ .

Эта погрешность – основанная погрешность препятствующая обеспечению высокой точности этого гироскопа.

**Вывод по разделу 2:** в данном разделе, было произведено конструирование ДГС, выбор и расчет двигателя стабилизации, датчика момента, подшипников РВГ и погрешностей РВГ.

					24.03.02.2019.360.00 ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДГС

Оценить качество работы двухосного гиросtabilизатора можно по его динамическим характеристикам.

Модель канала, построенная в Matlab (прикладной пакет Simulink), представлена в приложении А. С помощью этой модели, предварительно убрав перекрёстные связи получим логарифмические характеристики системы, которые представлены на рисунке 3.1.

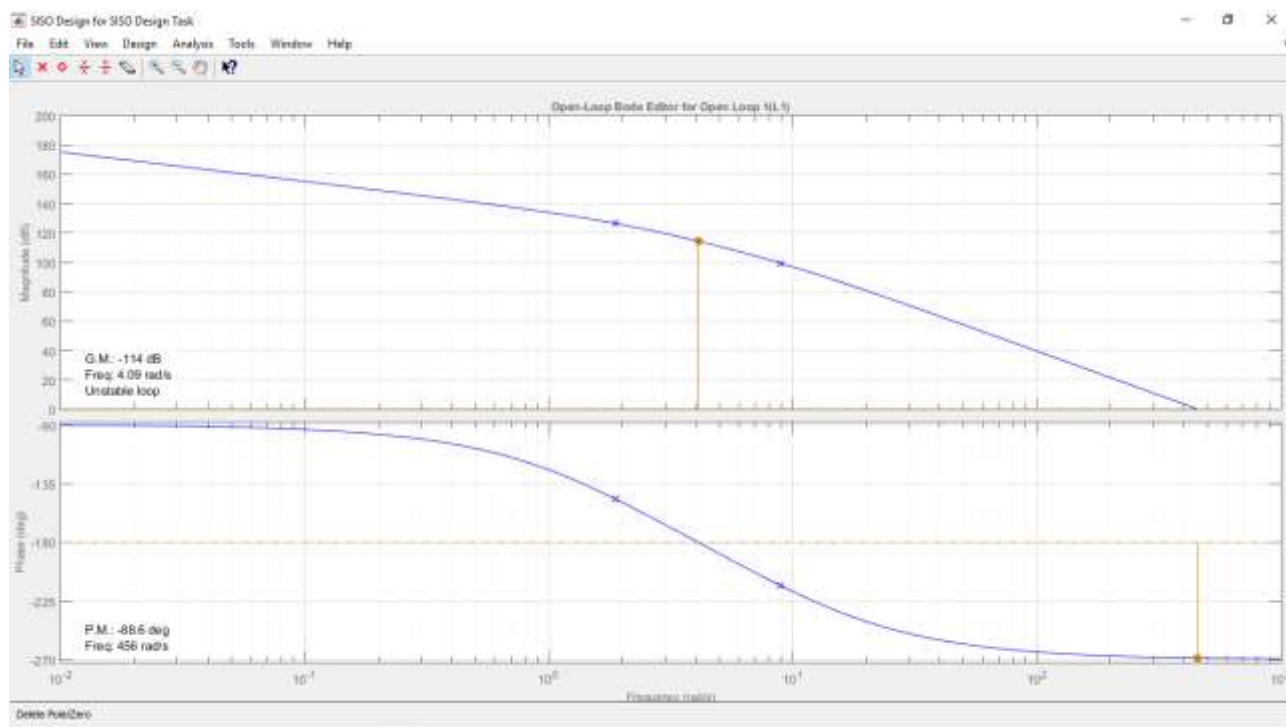


Рисунок 3.1 – ЛАФЧХ канала  $\alpha_1$  без КК

ЛАЧХ пересекает ось частот с наклоном  $-40\text{дБ/дек.}$ , а фазовая частотная характеристика пересекает  $-180^\circ$  из этого следует, что система неустойчива. Это также видно из графика переходного процесса (Рисунок 3.2).

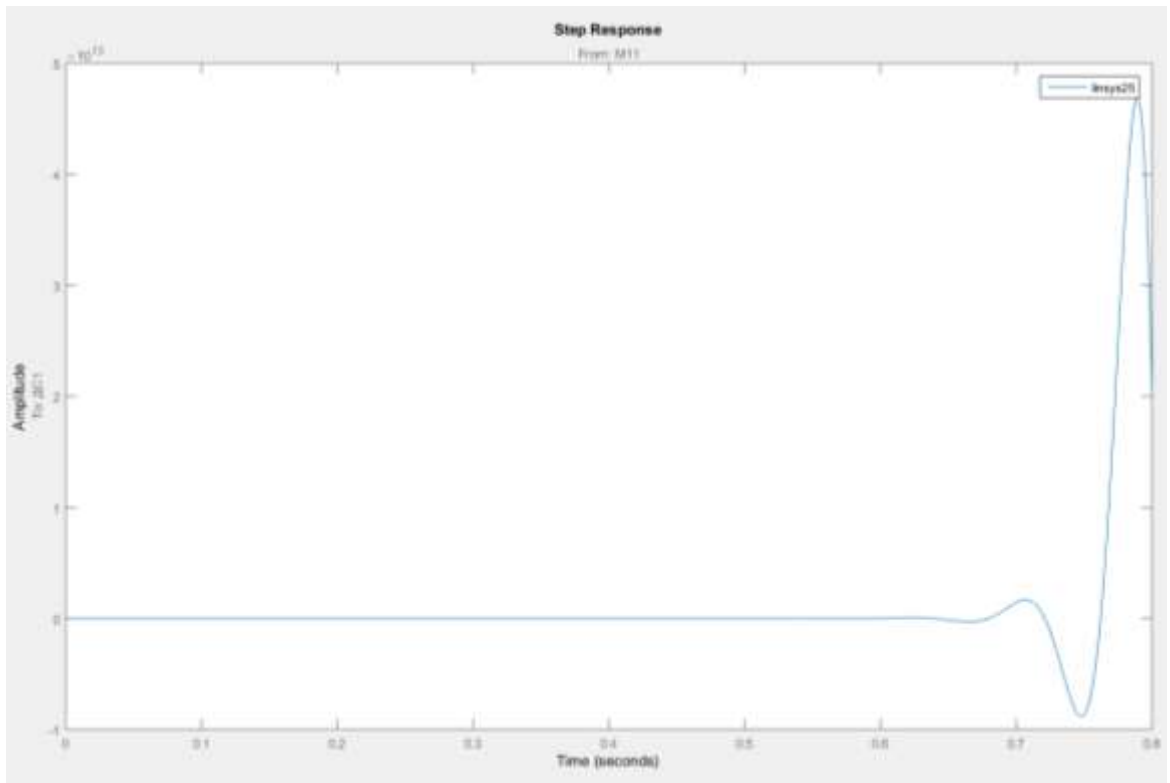


Рисунок 3.2 – Переходный процесс по ДС1 без КК

На рисунке 3.3 представлен график угла  $\alpha_1$  без КК.

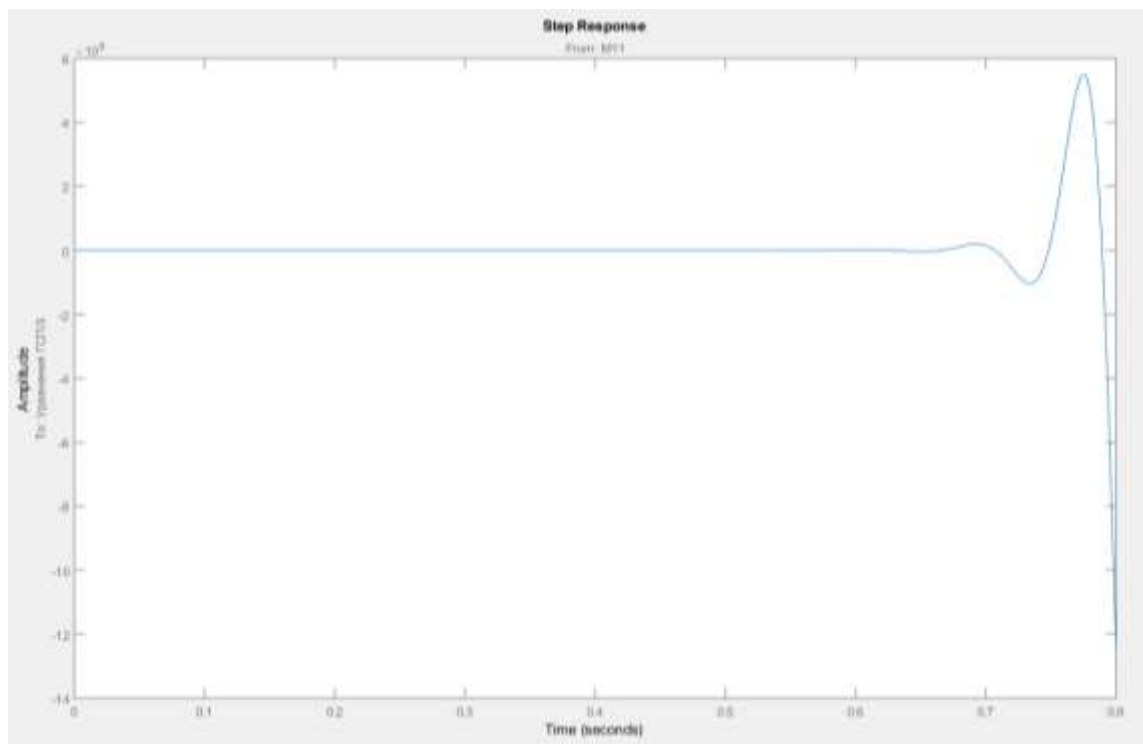


Рисунок 3.3 – Угол  $\alpha_1$  без КК

Для обеспечения необходимых запасов устойчивости ЛАЧХ должна пересекать ось с наклоном  $-20\text{дБ/дек}$ . Введем в систему корректирующий контур.

Для подбора корректирующего контура используем утилиту Control System Designer, входящую в состав Matlab Simulink и Control System Toolbox.

По виду ЛАЧХ без корректирующего контура можно сделать вывод, что для нормальной работы системы стабилизации с частотой среза более 100 рад/с требуется ввести корректирующий контур, содержащий два форсирующих звена, так как на этом участке наклон ЛАЧХ составляет -60 дБ/дек, одно форсирующее звено увеличивает наклон на 20 дБ/дек, а обеспечить требуется наклон в -20 дБ/дек, то есть увеличить наклон на 40 дБ/дек.

Таким образом корректирующий контур примет вид:

$$W_{\text{КК}}(p) = \frac{(1 + 0.033p)^2}{(1 + 0.00125p)^2}$$

Данный корректирующий контур обеспечивает частоту среза  $\omega_{\text{ср}} = 1100$  рад/с. Эту частоту можно уменьшить на порядок, введя в корректирующий контур дополнительные форсирующее и апериодическое звенья вида:

$$W_{\text{КК.доп}}(p) = \frac{1 + 0.033p}{1 + Tp},$$

где  $T > 0,033$ . При этом постоянные времени  $W_{\text{КК}}$  увеличиваются приблизительно в 10 раз. Однако это приводит к существенному ухудшению вида переходного процесса по углу ГСП, поэтому от добавления этих звеньев было решено отказаться.

Построим ЛАФЧХ с КК (Рисунок 3.4).

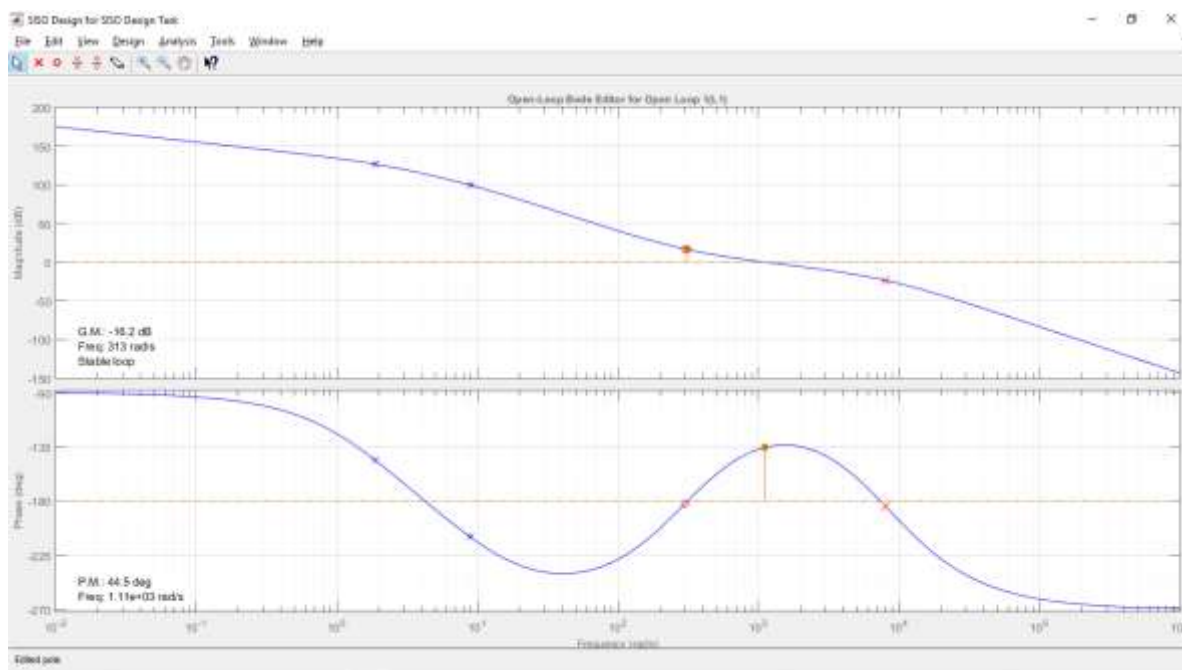


Рисунок 3.4 – ЛАФЧХ канала  $\alpha_1$  с КК

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

Лист

45

Из рисунка 3.5 видно, что система устойчива, т.к. частота среза меньше критической частоты. На рисунке 3.5 представлен график переходного процесса по  $\alpha_1$ .

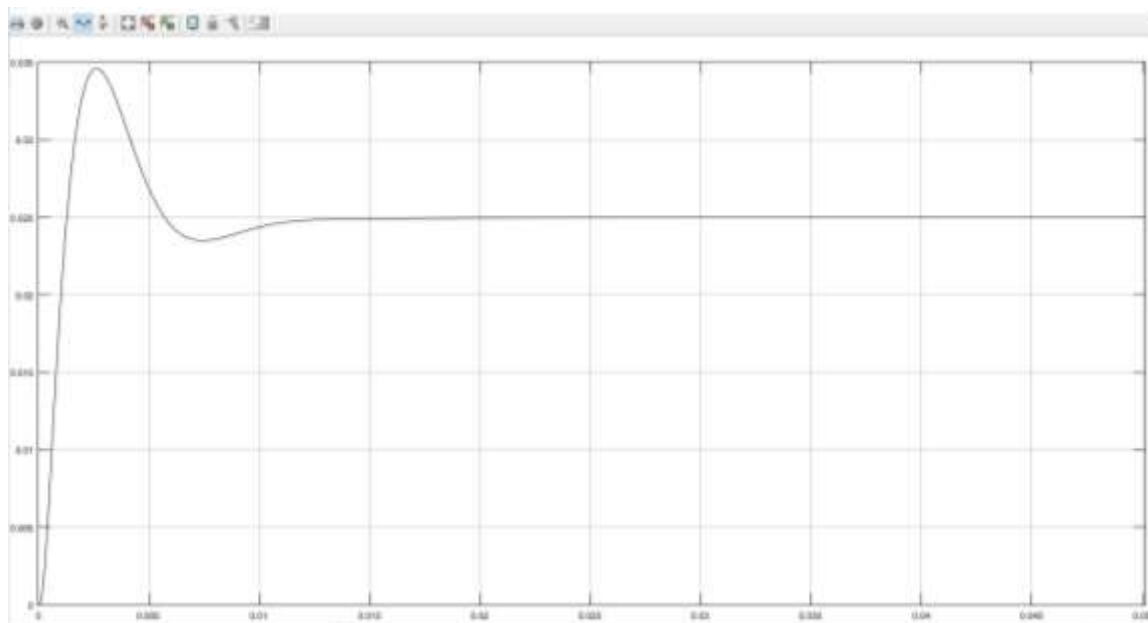


Рисунок 3.5 – Переходный процесс по  $\alpha_1$  с КК

Из рисунка 3.5 видно, что система устойчива.

На рисунке 3.6 представлен график угла  $\alpha_1$  с КК.

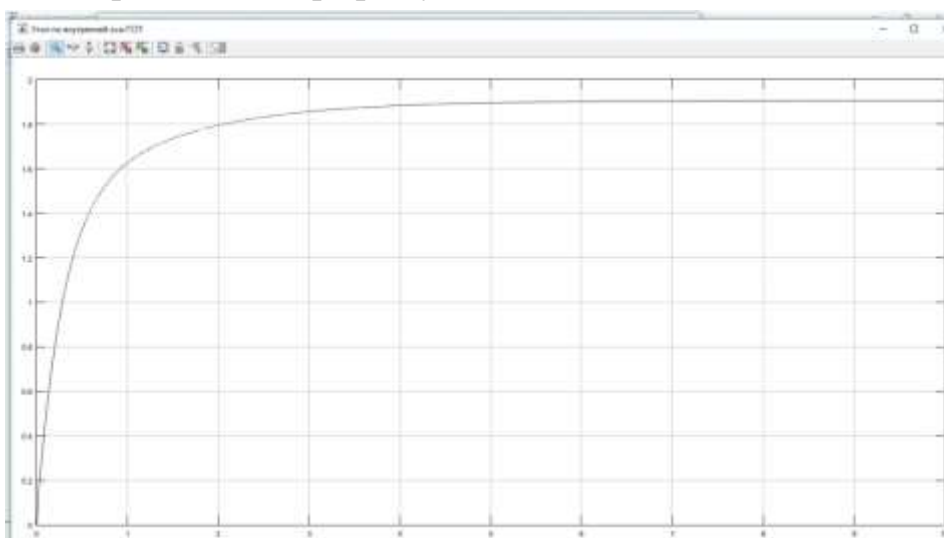


Рисунок 3.6 – Угол  $\alpha_1$  с КК

**Вывод по разделу 3:** используя, полученные параметры ДГС в данном разделе получена ЛАФЧХ, была исследована система на устойчивость, выбран корректирующий контур. Получены динамические характеристики разработанного ДГС. Из графиков видно, что система устойчива и время переходного процесса занимает 0.015 с.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе разработан двухосный гиросtabilизатор для авиационной системы оптического наблюдения. С помощью прикладного пакета КОМПАС – 3D, разработана 3D модель и определены параметры ДГС:

- масса гиросtabilизатора – 2.5 кг;
- габариты гиросtabilизатора – 154.42xØ140мм;
- моменты инерции по оси наружной рамы:  $J_x=20184$  (Г · см<sup>2</sup>);  
 $J_y=23361$  (Г · см<sup>2</sup>);  
 $J_z=5102$  (Г · см<sup>2</sup>);
- моменты инерции платформы:  $J_x=9205$  (Г · см<sup>2</sup>);  
 $J_y=6029$  (Г · см<sup>2</sup>);  
 $J_z=4297$  (Г · см<sup>2</sup>).

Был рассчитан чувствительный элемент и его составляющие. Были выведены уравнения движения гиросtabilизатора, составлена математическая модель ДГС и получены передаточные функции. Также, исходя из условий устойчивости, выбраны структура и параметры корректирующего контура  $W_{\text{кк}}(p) = \frac{(1+0.033p)^2}{(1+0.00125p)^2}$ . Разработанная система может устанавливаться на пилотные и беспилотные летательные аппараты самолетного и вертолетного типов. Она очень компактна - ее вес не превышает 5 килограммов. Прибор содержит два информационных канала и комплектуется набором из лазерного дальномера, телевизионного и тепловизионного каналов. Корпус прибора имеет достаточно высокую степень защиты.

									Лист
									47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	24.03.02.2019.360.00 ПЗ				



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДГС

Jzr	0.0005102	double (auto)
Jzp	9.3900000000000001e-05	double (auto)
Jyp	0.0003553	double (auto)
h1	0.0053955	double (auto)
h2	0.0053955	double (auto)
Om	1570	double (auto)
Jxrt	5.5999999999999997e-08	double (auto)
Jyrt	9.1000000000000001e-08	double (auto)
Jzrt	5.5999999999999997e-08	double (auto)
kd	1.0500000000000001e-07	double (auto)
cT	0.0517629	double (auto)
<b>Kds</b>	<b>45</b>	<b>double (auto)</b>
W0	1570	double (auto)
w	6.28	double (auto)
Ma	30	double (auto)
d	0.01	double (auto)
Lam	1.89	double (auto)

Рисунок А.1 – Исходные данные

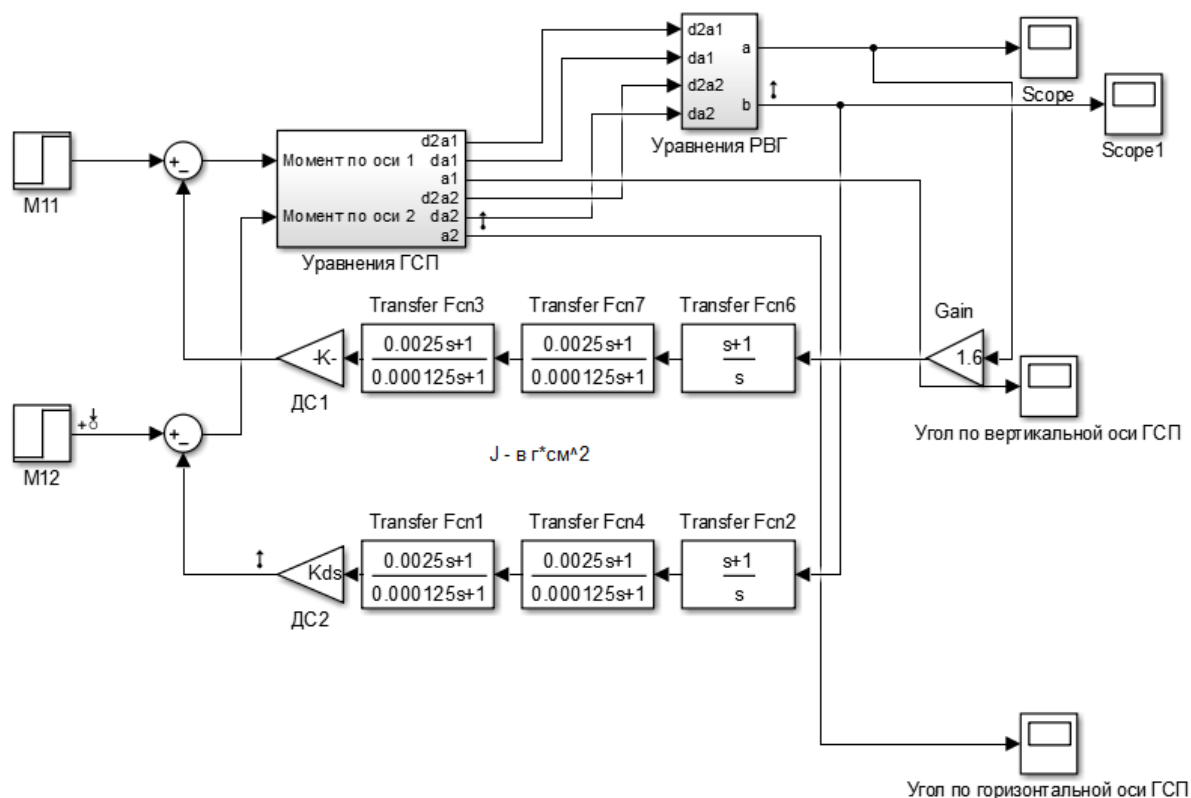


Рисунок А.2 – Схема моделирования ДГС

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

Лист

49

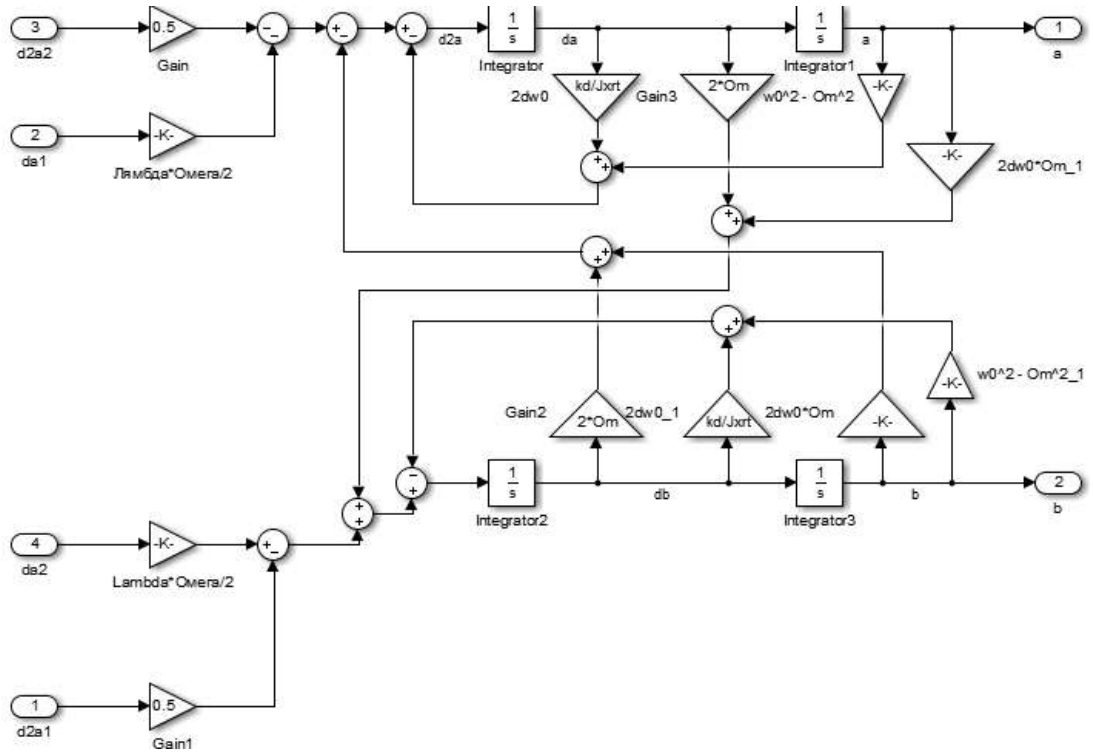


Рисунок А.3 – Структурная схема РВГ

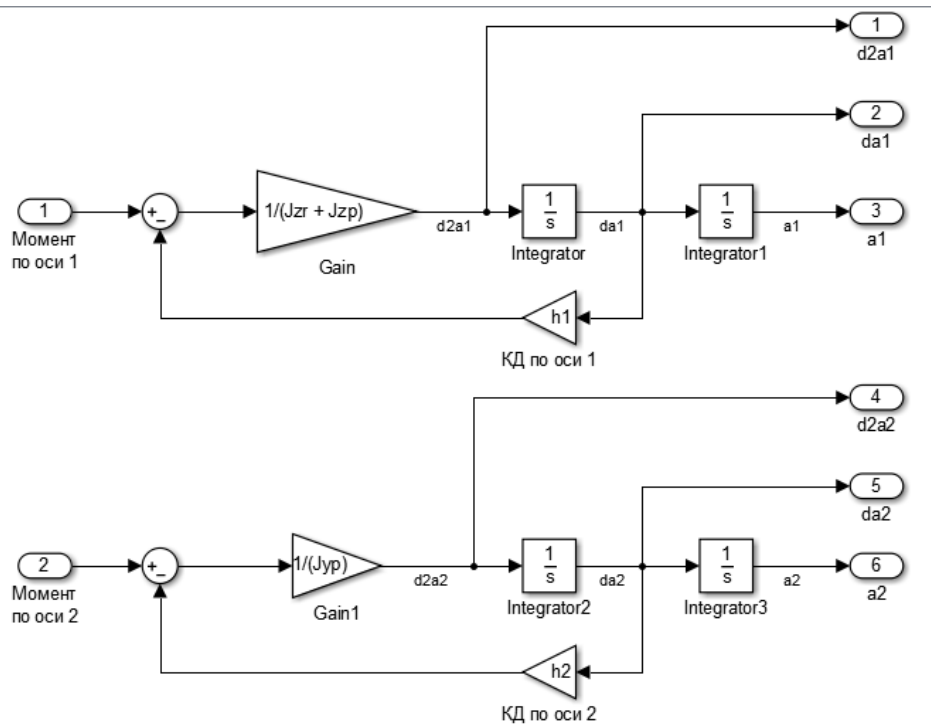


Рисунок А.4 – Структурная схема гиросtabilизатора

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



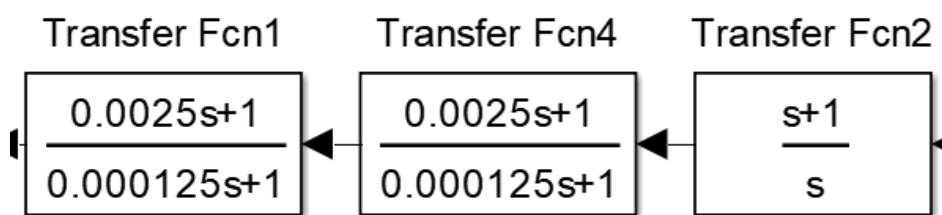
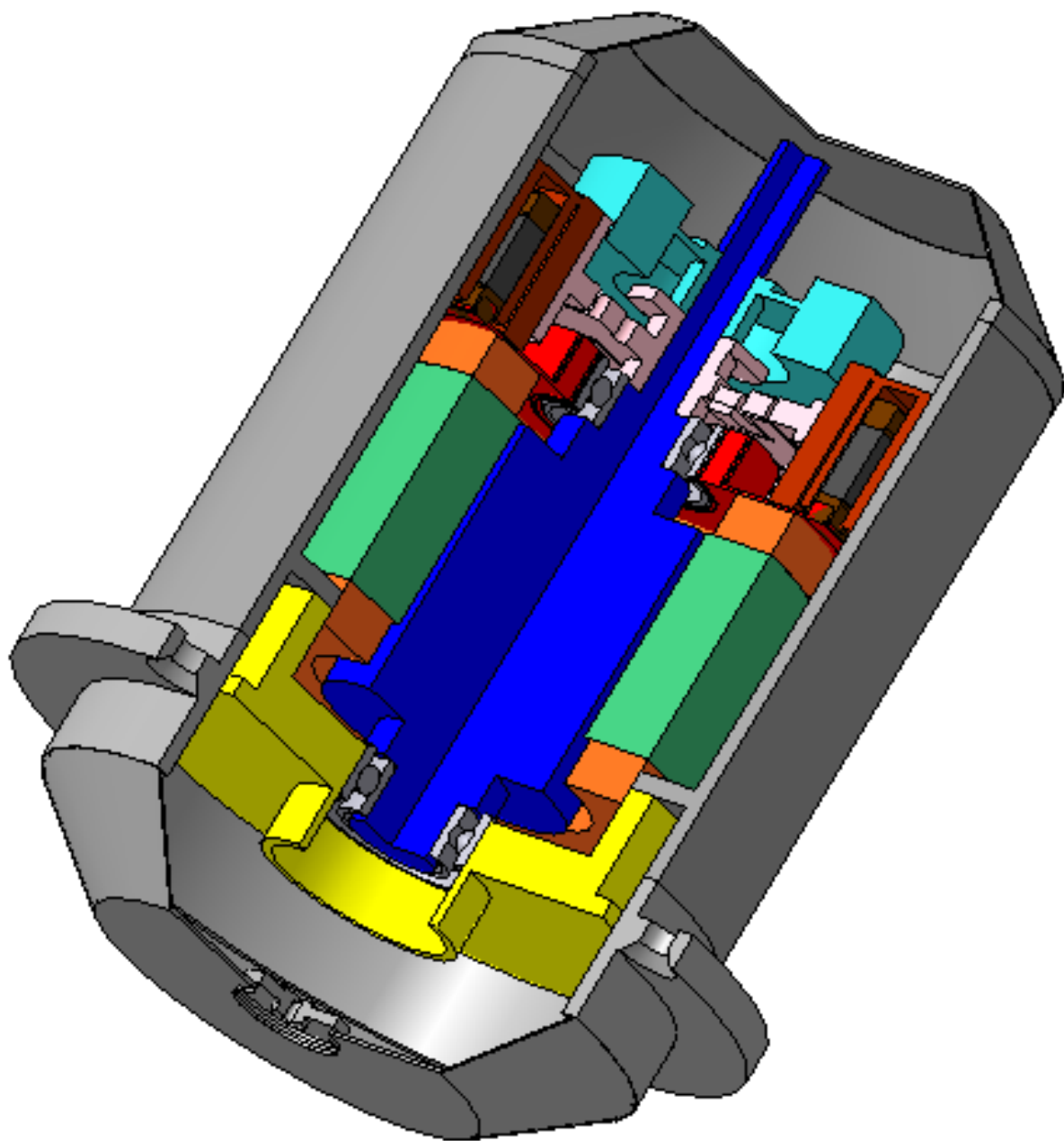


Рисунок А.5 – Передаточная функция КК

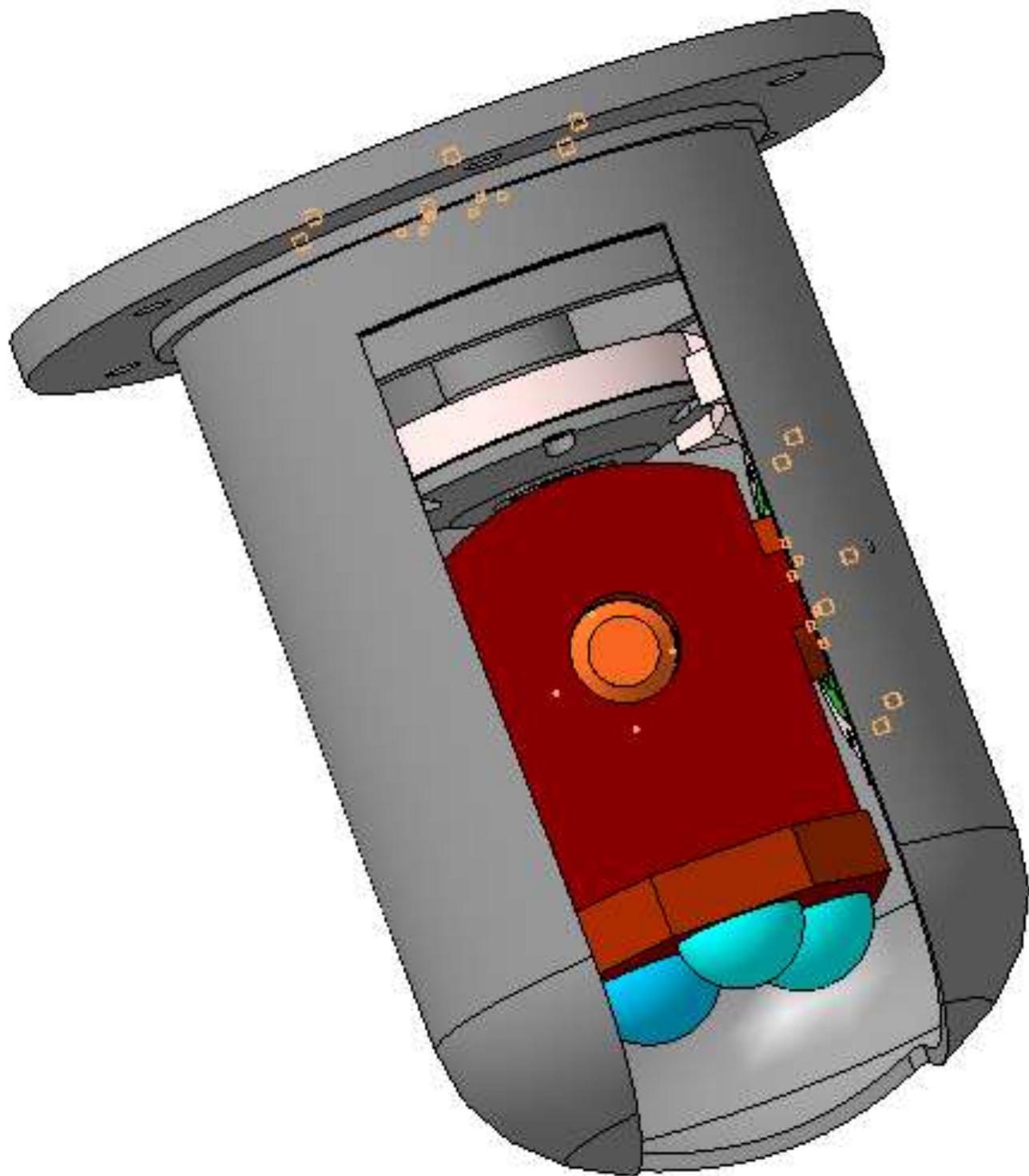
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. 3D модель РВГ



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ В. 3D модель двухосного гростабилизатора



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

24.03.02.2019.360.00 ПЗ

Лист

53