



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ _____ «Информатика и системы управления» (ИУ) _____
КАФЕДРА _____ «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» (ИУ2) _____

РАСЧЁТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ НА ТЕМУ:

Двухосный гиростабилизатор оптического прицела вертолета.

Студент ИУ2-73
(Группа)

(Подпись, дата) Шевченко Е.А.
(Фамилия И.О.)

Руководитель курсового проекта

(Подпись, дата) Чулков В.Е.
(Фамилия И.О.)

2021 г.

Факультет ИУ Кафедра ИУ2

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
на курсовой проект

Студент Шевченко Е.А.

Группа ИУ2-73
(фамилия, инициалы)

Руководитель Чулков В.Е.
(фамилия, инициалы)

Дата выдачи задания 09.09.2021г.

Дата защиты _____

1. ТЕМА ПРОЕКТА Двухосный гиростабилизатор оптического прицела вертолета
2. НАЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТИРУЕМОГО ПРИБОРА Стабилизация оптического прицела и головки самонаведения
3. ЦЕЛЬ ПРОЕКТА Получение практических навыков проектирования ГС
4. ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА, НА КОТОРОМ УСТАНОВЛЕН ПРИБОР Угловые скорости $\omega_y = \omega_z = 80^\circ / c$, ускорения $\dot{\omega}_y = \dot{\omega}_z = 50^\circ / c^2$
Угловая качка $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi f$, $f = 0.7$ Гц, $\gamma_0 = 5^\circ$.
5. МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИБОР
Перегрузки по всем осям $n_x, n_y = 2.5$ ед., $n_z = 3$ ед.
Вибрация $f = 0,1 \dots 50$ Гц, амплитуда виброускорения – до $4 g$
6. КЛИМАТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИБОР
Диапазон рабочих температур: от минус 65 до +85 градусов Цельсия.
Предусмотреть герметичное исполнение и пыле-/влагозащиту.
7. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИБОРА
Постоянное напряжение $U_1 = 27 В \pm 10\%$
8. ПАРАМЕТРЫ ПРИБОРА, КОТОРЫЕ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ОБЕСПЕЧЕНЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ Коэффициент подавления колебаний на частоте 1 Гц не менее 50 дБ. Установившаяся ошибка стабилизации 1'. Углы прокачки по обеим осям – $\pm 50^\circ$. Чувствительный элемент МГТУ-05. Датчик момента – корпусной. Применение прибора – наружное (предусмотреть пыле- и влагозащиту). Подвес – консольный
9. ЗАДАНИЕ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА _____

10. ОБЪЁМ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ Листы А1: Кинематическая схема, вид общий, чувствительный элемент, электрическая схема, лист(ы) технологии, Частотные характеристики и устойчивость, ТЗ – всего 7(8) листов формата А1.
11. СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ Пояснительная записка к курсовому проекту должна содержать введение, описание ГС, описание принципа действия, описания конструкции стабилизатора, чувствительного элемента, их технические характеристики, описания и характеристики составных узлов. Должен быть произведен и описан расчет возмущающих моментов, действующих на ГС, разработана и описана математическая модель ГС, обоснован выбор привода стабилизации, произведен расчет устойчивости, синтез регулятора, анализ точности стабилизации. Должно быть сделано заключение о выполненных работах и о соответствии разработанного прибора требованиям ТЗ. Объем пояснительной записки ~60 листов.
12. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА Гироскопические системы. Т.1, т.2, т.3. Под ред. Д.С. Пельпора, материалы лекций «Теория гироскопов и гиросtabilизаторов», электронные и бумажные материалы кафедры ИУ2 - <http://ebooks.bmstu.ru/>

ПОДПИСИ И ДАТЫ

Руководитель _____ / Чулков В.Е.

Консультант по технологической части _____ / _____

Студент _____ / Шевченко Е.А.

Оглавление

Оглавление	4
Введение и назначение	5
Аннотация	5
Классификация гиросtabilизаторов	5
Обоснование кинематической схемы	8
Принцип действия.....	10
В режиме стабилизации	10
В режиме управления	11
Описание чувствительного элемента ГС.....	12
Расчет возмущающих моментов.....	14
Расчёт массы и габаритов.....	15
Расчёт проекций линейных ускорений	22
Моменты трения в опорах	29
Моменты тяжения токоподводов	32
Моменты от небаланса	33
Моменты от неравножёсткости	34
Инерционный момент рам карданового подвеса	36
Суммарные возмущающие моменты	38
Описание конструкции гиросtabilизатора.....	39
Расчет устойчивости системы.....	40
Расчет канала стабилизации по оси платформы.....	42
Расчет канала стабилизации по оси рамы	47
Проверочный расчёт на точность	51
Коэффициент подавления колебаний	52
Описание схемы электрической принципиальной	55
Технологическая часть	60
Заключение о соответствии техническому заданию	62
Использованная литература	63

Введение и назначение

Аннотация

Гиростабилизатор — это прибор, предназначенный для обеспечения постоянства углового положения некоторого объекта в абсолютном пространстве относительно заданных осей и для управления этим положением. Гиростабилизатор (далее ГС) может работать в двух режимах: в режиме стабилизации и в режиме управления. Гироскопические стабилизаторы применяются в различных областях техники: в авиации, на морских судах — для целей навигации и автоматического управления движением корабля; в артиллерии, танках - для определения курса и стабилизации прицелов и орудий на заданном направлении; в горнорудной и нефтяной промышленности — при прокладке шахт и тоннелей, при бурении нефтяных скважин и т.д.

Классификация гиростабилизаторов

1) По роли гироскопа в процессе стабилизации:

а) *Индикаторные ГС.* Гироскоп практически не участвует в непосредственной компенсации возмущающих моментов, и их подавление определяется двигателем стабилизации, который должен выбираться из условия уравнивания всех составляющих возмущающего момента (гироскоп выполняет функцию индикатора положения).

Преимущества индикаторных ГС:

- Небольшая скорость прецессии платформы, так как гироскоп, являясь индикатором, слабо участвует в силовом воздействии на платформу.
- Большие скорости управления из-за малости кинетического момента.

б) *Силовые ГС.* В этом типе ГС возмущающие моменты уравниваются гироскопическим моментом и моментом, создаваемым приводом разгрузки. Постоянные или медленно изменяющиеся моменты уравниваются в основном моментом привода разгрузки, а

знакопеременные, особенно быстро изменяющиеся, уравниваются как приводом разгрузки, так и гироскопическим моментом, а при высоких частотах изменения момента еще и инерционным моментом самой платформы. Для силовых ГС требуются гироскопы с высоким кинетическим моментом.

Преимущества силовых ГС:

- Низкие требования к системе разгрузки.

Недостатки силовых ГС:

- Низкие скорости управления, так как управление осуществляется путём подачи сигналов на датчики момента (ДМ), заставляя гироскоп с большим кинетическим моментом прецессировать.
- Для стабилизации массивных объектов требуется большой кинетический момент и, как следствие, увеличение габаритов и массы гиростабилизатора.

с) *Индикаторно-силовые ГС.* В таких ГС силовая роль гироскопов снижена. Наличие у гироскопа большого кинетического момента не является обязательным. В зависимости от типа используемых гироскопов, величины демпфирования, могут преобладать как свойства силового гиростабилизатора, так и свойства индикаторного гиростабилизатора.

Преимущества индикаторно-силовых ГС:

- Небольшая скорость прецессии платформы из-за особенностей подвеса ПИГ.
- Небольшие габариты ПИГ, так как он слабо участвует в силовом воздействии на платформу.
- Большие скорости управления.

Недостатки индикаторно-силовых ГС:

- Повышенные требования к системе стабилизации (жесткость механических цепей, отсутствие люфтов, линейный усилитель без запаздывания).
- Высокая чувствительность к изменениям температуры

(необходима точная система термостатирования).

- 2) По типу чувствительного элемента:
 - a) ГС на двухстепенных гироскопах.*
 - b) ГС на трехстепенных гироскопах.*
 - c) ГС на датчиках угловых скоростей.*
- 3) По количеству осей стабилизации:
 - a) Одноосные ГС*
 - b) Двухосные ГС*
 - c) Трехосные ГС*
- 4) По типу привода:
 - a) Электромеханические*
 - b) Пневматические*
 - c) Гидравлические*
 - d) Реактивные*
- 5) По количеству чувствительных элементов на осях стабилизации:
 - a) Однороторные*
 - b) Двухроторные*

В данной работе выполнено проектирование двухосного индикаторного гиросtabilизатора на трёхстепенном гироскопе МГТУ-0.5, предназначенного для угловой стабилизации и управления угловым положением комплекса оптических приборов электронно-оптической системы оптического прицела вертолёта, согласно техническому заданию (ТЗ).

Обоснование кинематической схемы

Гиростабилизатор выполнен по двухосной схеме. Подвес имеет степени свободы вокруг оси рыскания и вокруг оси тангажа. При этом углы прокачки по обеим осям лежат в пределах от -50° до $+50^\circ$. По оси наружной рамки применен консольный подвес. Такой подвес, в силу своей конструкции обеспечивает больший угол обзора оптической системы, позволяет получить более компактную конструкцию гиростабилизатора и снизить момент инерции рамы подвеса. В таком случае величина максимального момента двигателя стабилизации, выбираемая из условия обеспечения необходимого углового ускорения платформы при управлении, может быть уменьшена. Это позволяет повысить точность стабилизации за счет использования двигателя стабилизации меньших габаритов, имеющего меньший момент сухого трения вокруг оси вращения и меньший коэффициент демпфирования.

По роли гироскопа в процессе стабилизации, проектируемый гиростабилизатор – индикаторный. Это предполагает повышенные требования к качеству канала обратной связи (канала стабилизации). Статическая ошибка, заданная в ТЗ, составляет 1 угл.мин. по обеим осям. Для обеспечения статической ошибки, не превышающей заданную, требуется высокий коэффициент усиления канала обратной связи.

Основание гиростабилизатора – вертолёт, параметры движения которого заданы в ТЗ.

Угол поворота наружной рамки гиростабилизатора относительно основания обозначен как угол α (вращение вокруг оси $Y=Y_p$), а угол поворота платформы с объектом стабилизации относительно наружной рамки – как угол β (вращение вокруг оси $X_p=X_n$).

Системы координат, заданные для гиростабилизатора:

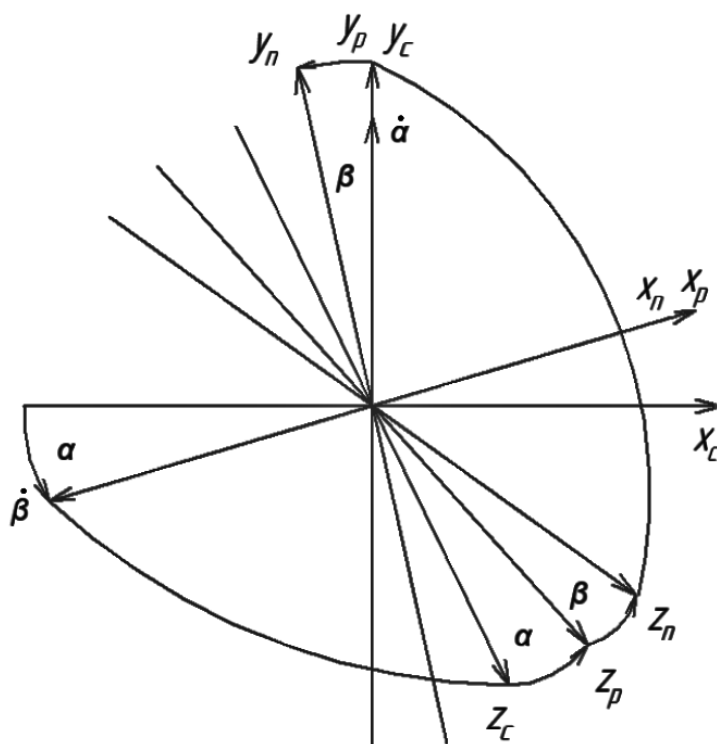


Рисунок 1 а. Системы координат, связанные с ГС.

X_c, Y_c, Z_c — оси, связанные с основанием (с ЛА);

X_p, Y_p, Z_p — оси, связанные с наружной рамкой;

X_n, Y_n, Z_n — оси, связанные с платформой;

α и β — углы поворота: наружной рамки ГС относительно основания и платформы вокруг внутренней оси наружной рамки соответственно.

Чувствительный элемент — трёхстепенной гироскоп, который установлен на платформе следующим образом:

- Ось наружной рамки гироскопа Y_g сонаправлена с осью Y_n ;
- Ось внутренней рамки гироскопа X_g сонаправлена с осью X_n ;
- Ось собственного вращения гироскопа Z_g сонаправлена с осью Z_n ;

Принцип действия рассмотрим на кинематической схеме гиростабилизатора.

гироскопа и платформы. Этот сигнал, преобразованный в контуре стабилизации, подается в качестве управляющего тока на двигатель привода стабилизации. Двигатель создает момент, который противоположен по знаку внешнему моменту. По окончании переходного процесса выполнено условие: $M_y^{BH} = M_y^{DB}$. Таким образом, привод стабилизации компенсирует действие внешнего момента.

Стабилизация углового положения вокруг оси X_p осуществляется полностью аналогично.

В режиме управления:

Управление гиросtabilизатором осуществляется путем изменения углового положения гироскопа в абсолютном пространстве. Далее рассмотрено управление вокруг оси Y_c .

С пульта управления на датчик момента на оси X_g (DM_x) подается ток. Датчик момента создает вокруг оси внутренней рамки гироскопа момент, пропорциональный току. Этот момент заставляет гироскоп прецессировать вокруг оси наружной рамки (в абсолютном пространстве). Изменение углового положения гироскопа вызывает появление сигнала на DU_y . Далее работа контура стабилизации происходит аналогично его работе в режиме стабилизации, то есть привод стремится совместить угловое положение платформы и угловое положение гироскопа, что и обеспечивает управление угловым положением гиросtabilизатора.

Управление угловым положением вокруг оси X_c осуществляется полностью аналогично.

Описание чувствительного элемента МГТУ-0.5

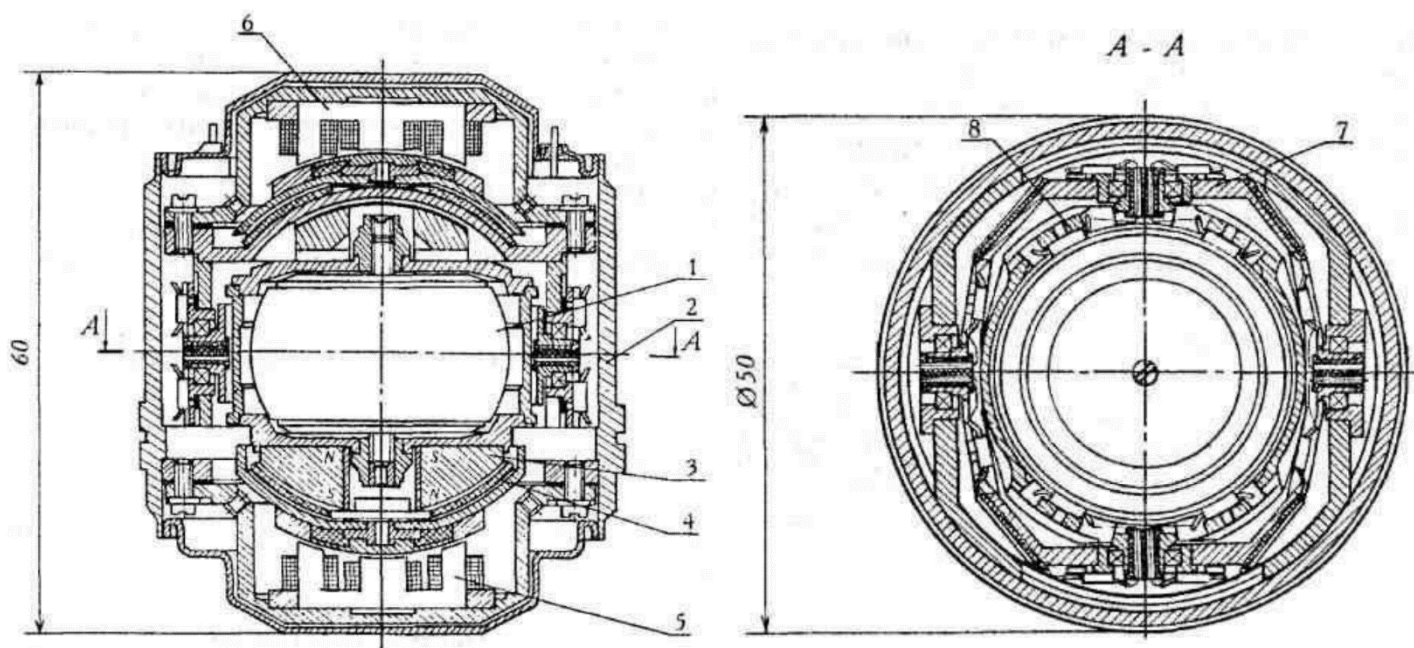


Рисунок 2. Гирископ МГТУ-0,5.

Этот прибор применяется в качестве чувствительного элемента гиросtabilизатора в тех случаях, когда необходимо получить высокие скорости управления, например, в гиросtabilизаторе координатора цели головки самонаведения ракеты, гиросtabilизаторе кино- или телекамеры при съемке подвижных объектов и пр. Он представляет собой асинхронный электродвигатель 1 (рис. 2), размещенный в корпусе 2 с помощью шарикоподшипникового карданова подвеса, состоящего из наружной 7 и внутренней 8 рамок. Особенностью конструкции является размещение датчиков момента и угла не на осях подвеса, а на значительном от них удалении, что позволяет в малых габаритах получить высокую крутизну выходной характеристики этих датчиков. Магнитоэлектрический датчик момента содержит постоянный магнит 3, расположенный непосредственно на кожухе гироскопа, и обмотку управления 4, закрепленную на корпусе в зазоре магнитопровода. Конструкция датчиков момента одинакова по обеим осям.

Два одинаковых индукционных двухкоординатных датчика угла 5 и 6 расположены снизу и сверху от гироскопа. Их выходные обмотки по каждой оси включены встречно, при этом сигналы каждого из них, вызванные

поворотом гироскопа в какой-либо плоскости, складываются, а обусловленные поступательным перемещением в этой же плоскости — вычитаются. Это позволяет исключить из выходного сигнала гироскопа составляющие, вызванные поступательным перемещением ротора в зазорах осей карданова подвеса.

Для уменьшения влияния внешних магнитных полей на точность гироскопа его корпус выполнен из магнитомягкого материала. Незначительность аэродинамического сопротивления вращению ротора и удовлетворительный тепловой режим обеспечиваются заполнением корпуса азотоводородной смесью при давлении 0,67 кПа. «Сухой» подвес гироскопа и наличие магнитов на его кожухе являются причиной довольно высокого собственного дрейфа.

Характеристики гироскопа:

Кинетический момент, Нмс	0,05
Габаритные размеры (d x h), мм	48 x 60
Масса, г	400
Скорость дрейфа на неподвижном основании, °/мин	1,0
Скорость управления, °/с	20

Расчёт возмущающих моментов

В полете при движении летательного аппарата (ЛА) с ускорениями, вибрациями, при поворотах и угловых колебаниях возникают моменты вокруг осей карданова подвеса гиростабилизатора. Эти моменты вызывают вынужденное движение платформы гиростабилизатора и, следовательно, приводят к погрешностям. При чрезмерной величине этих возмущающих моментов наступает потеря работоспособности гиростабилизатора. Знание возмущающих моментов необходимо как для определения погрешностей гиростабилизатора, так и для выбора в процессе проектирования его параметров и, в частности, параметров системы разгрузки.

Для указанных целей необходимо знание, как величины, так и характера изменения отдельных составляющих возмущающих моментов. По характеру изменения возмущающие моменты могут быть подразделены на постоянные или медленно меняющиеся, как, например, моменты, определяемые линейными ускорениями центра масс ЛА и неточной балансировкой карданова подвеса гиростабилизатора, и моменты знакопеременные, как, например, моменты от сил трения, возникающие при колебаниях ЛА вокруг центра его масс. В индикаторных гиростабилизаторах в непосредственной компенсации возмущающих моментов гироскопический момент практически не участвует. Подавление возмущающих моментов определяется в основном приводом стабилизации, который должен выбираться из условия уравнивания всех составляющих возмущающего момента.

Величины и характер изменения возмущающих моментов определяются не только конструктивными особенностями гиростабилизатора, но и эксплуатационными условиями, имеющими место при полете ЛА. При рассмотрении отдельных составляющих возмущающих моментов, приводимом ниже, предполагается, что эти условия являются известными или заданными.

Ниже рассматриваются следующие виды возмущающих моментов:

- Моменты трения;

- Моменты тяжения токоподводов;
- Моменты, возникающие в результате остаточной несбалансированности;
- Моменты, обусловленные неравножесткостью конструкции;
- Моменты, создаваемые приводами стабилизации при переносном движении основания;
- Инерционные моменты элементов конструкции.

Расчёт массы и габаритов

При расчёте была построена примерная 3D модель гиростабилизатора в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. С её помощью можно определить массо-габаритные характеристики гиростабилизатора и отдельно платформы.

Платформа с элементами:

Подвижная часть платформы состоит из гироскопа МГТУ-05, оптико-электронной системы, состоящей из камеры дневного света, тепловизора с высоким разрешением и лазерным дальномером, платформы, на которой закреплены элементы оптико-электронной системы и сферического кожуха, обеспечивающего пыле- и влагозащиту в соответствии с техническим заданием, оси платформы и роторы датчика угла и моментного датчика.

1) Платформа на которой крепятся модули.

Платформу смоделируем в виде цилиндра толщиной $h = 10$ мм и диаметром $D = 210$ мм таким, чтобы все модули могли разместиться на платформе. Материал платформы – Алюминий Д16.

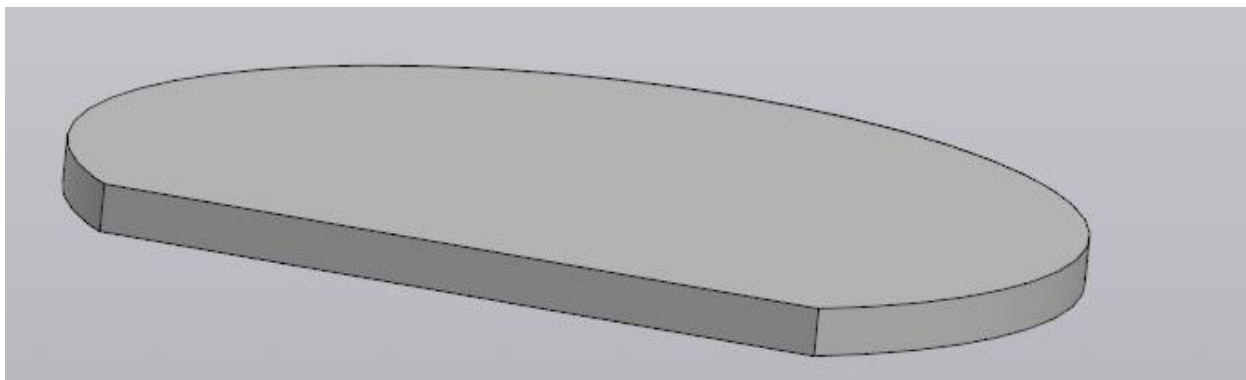


Рисунок 3. Платформа ГС.

2) Стакан для установки гироскопа

Стакан смоделируем в виде цилиндра длиной $l = 25$ мм и диаметром $D = 48$ мм с ступенькой диаметром $D = 50$ мм для установки гироскопа.

Материал стакана– Алюминий Д16.

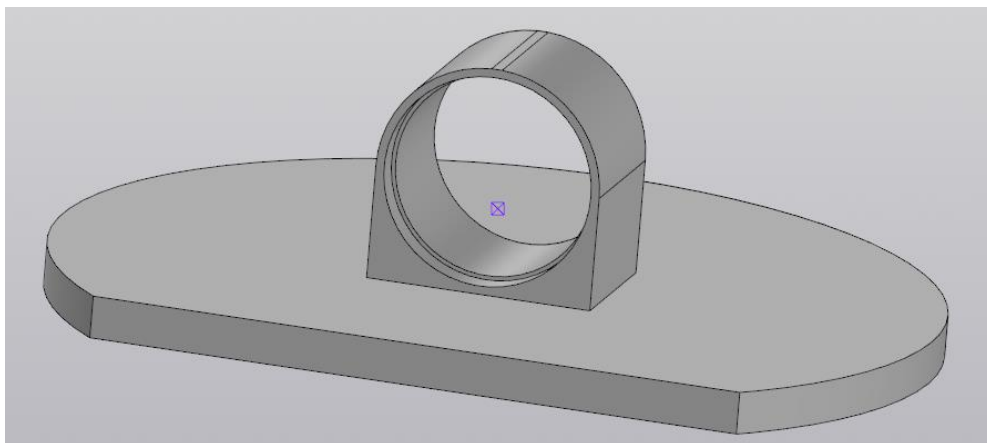


Рисунок 4. Стакан для установки гироскопа.

3) Гироскоп

Гироскоп МГТУ-05 смоделируем в виде цилиндра заданных размеров и массы.

$$D \times h = 48 \times 60 \text{ мм}; \quad m = 400 \text{ г.}$$

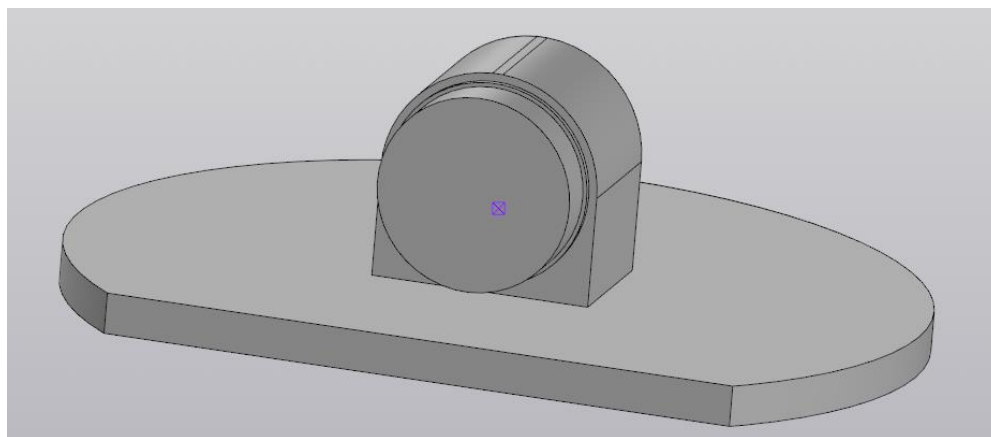


Рисунок 5. Гироскоп МГТУ-05 на платформе ГС.

4) Камера дневного света

Для гиросtabilизированных оптико-электронных систем, применяемых на летательных аппаратах в качестве видеокамеры может быть использована Модульная камера FCB-EV7520 с Full HD.

Габариты и масса данного модуля: ШхВхД = 50х60х87.9; $m = 250$ г.

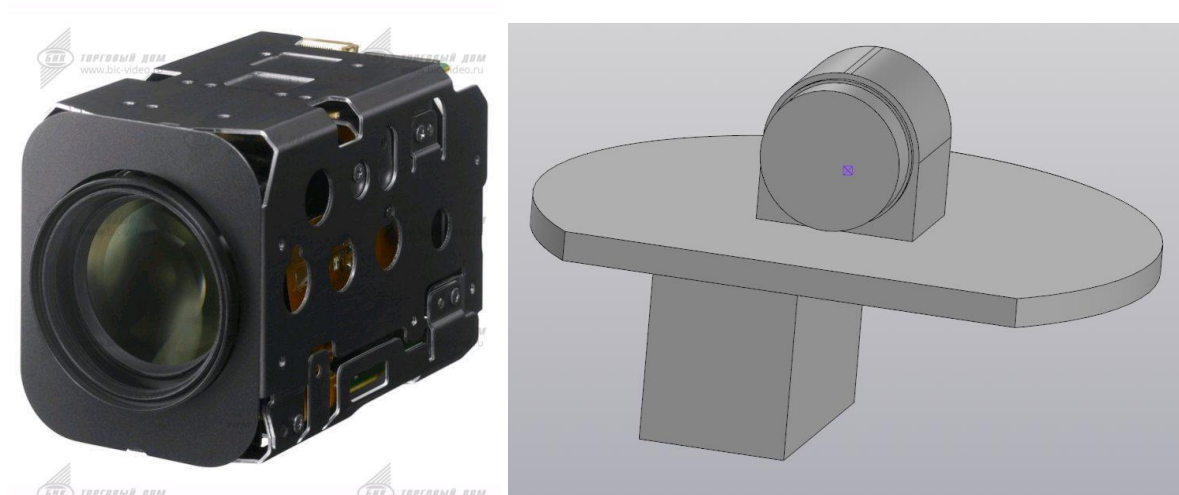


Рисунок 6. Модульная камера FCB-EV7520 и её модель на платформе.

5) Лазерный дальномер.

Для гиросtabilизированных оптико-электронных систем, применяемых на летательных аппаратах в качестве дальномера может быть лазерный дальномерный модуль RFS-6031/6032.

Габариты и масса данного модуля: ШхВхД = 49 × 45 × 91; $m = 160$ г.

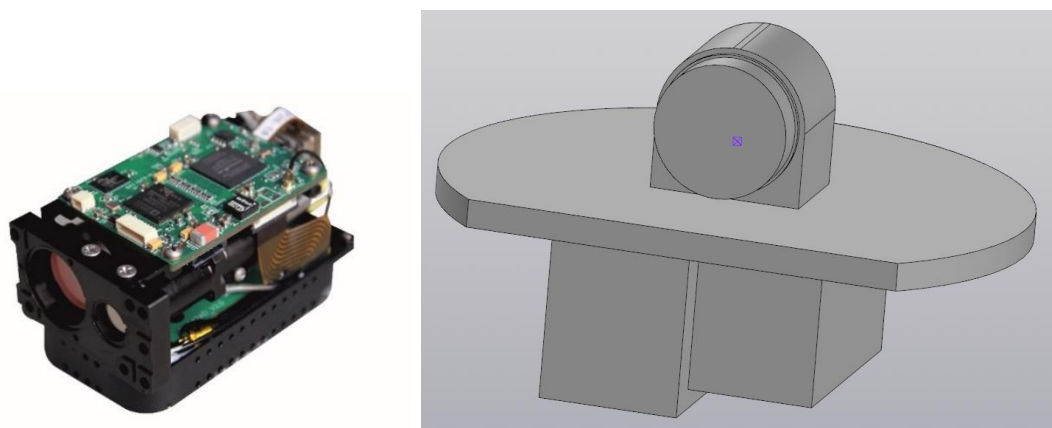


Рисунок 7. лазерный дальномерный модуль RFS-6031/6032 и его модель на платформе.

6) Тепловизор высокого разрешения.

Для гиросtabilизированных оптико-электронных систем, применяемых на летательных аппаратах в качестве тепловизора может быть неохлаждаемый

тепловой модуль WLP + ASIC 400X300 VOx COIN 417.

Габариты и масса данного модуля: ШхВхД = 25,4х25,4х14,1; $m = 15$ г.

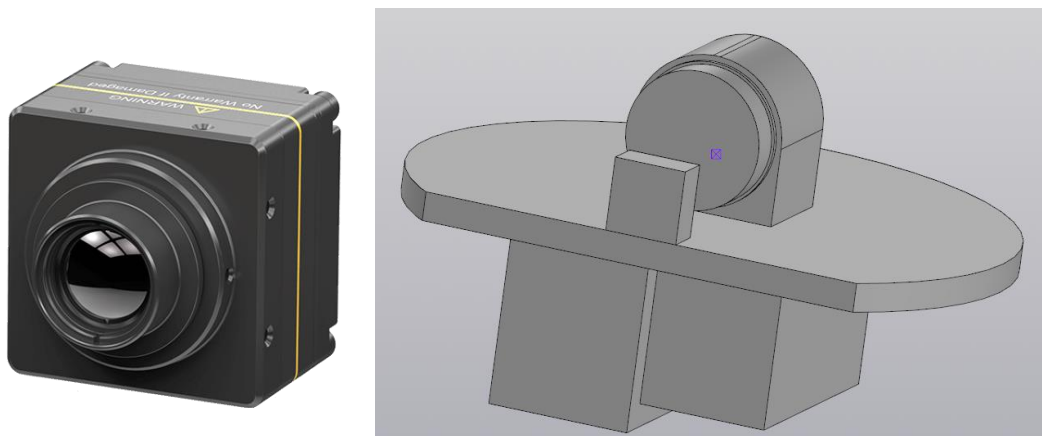


Рисунок 8. тепловой модуль WLP+ASIC COIN 417 и его модель на платформе.

7) Кожух платформы.

Кожух смоделируем в виде сферы с внутренним диаметром $D_{\text{вн}} = 210$ мм, таким же как у платформы и с толщиной $l = 5$ мм. Материал кожуха – Алюминий Д16.

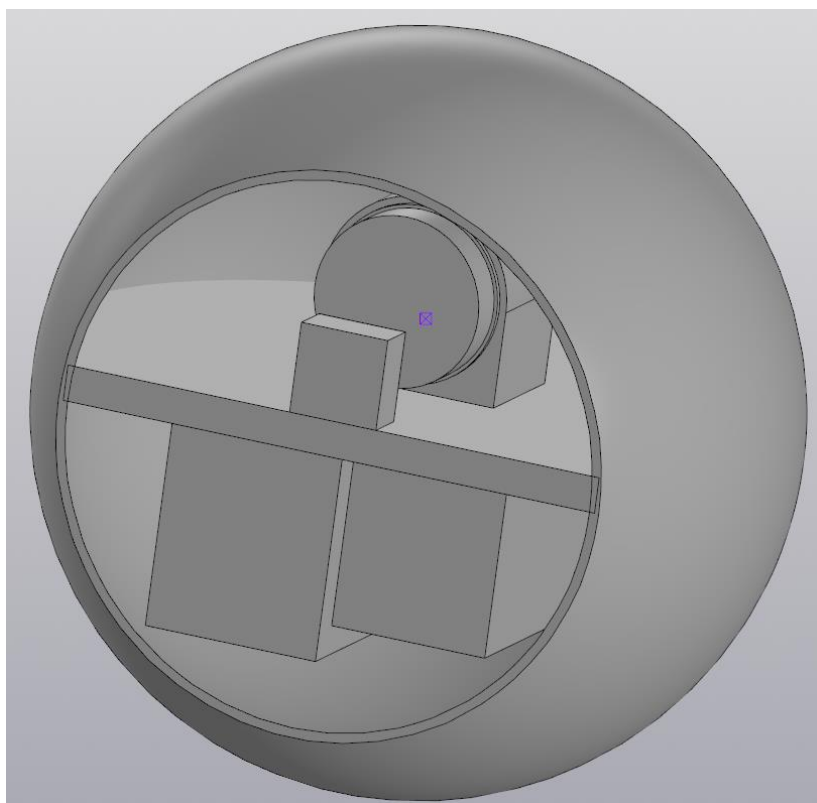


Рисунок 9. Модель кожуха платформы ГС.

8) Оси платформы.

Оси платформы смоделируем в виде полых цилиндров с внутренним

диаметром $d = 7$ мм и внешним диаметром $D = 12$ мм. Длина каждой оси $l = 30$ мм. материал осей Сталь 10.

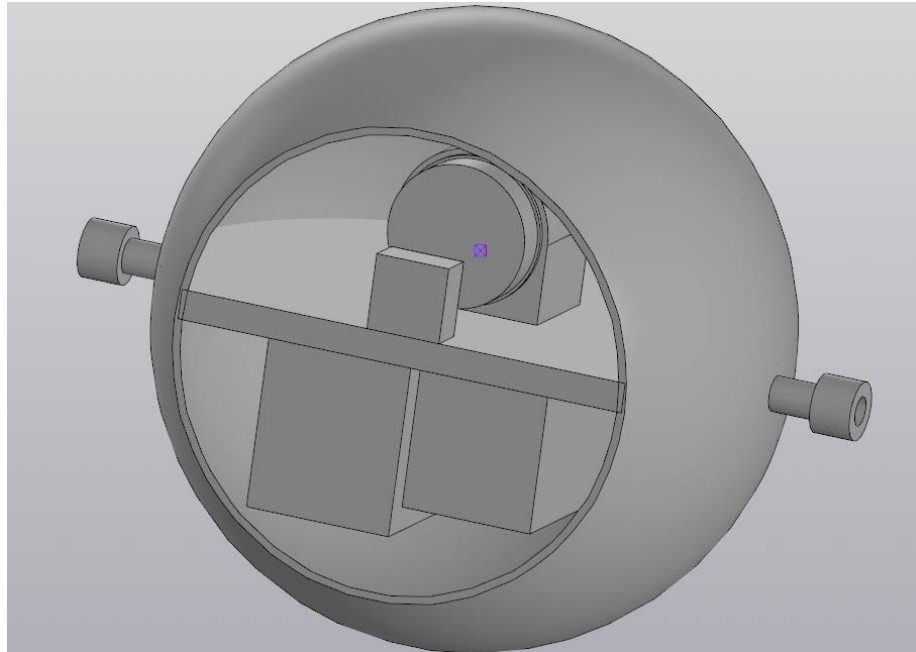


Рисунок 10. Модель платформы ГС.

9) Роторы ДМ и ДУ

Роторы ДМ и ДУ смоделируем одинаковыми по массе и форме. Массу возьмём 125 г.

После сборки всех элементов конструкции получим платформу и определим её инерционные характеристики:

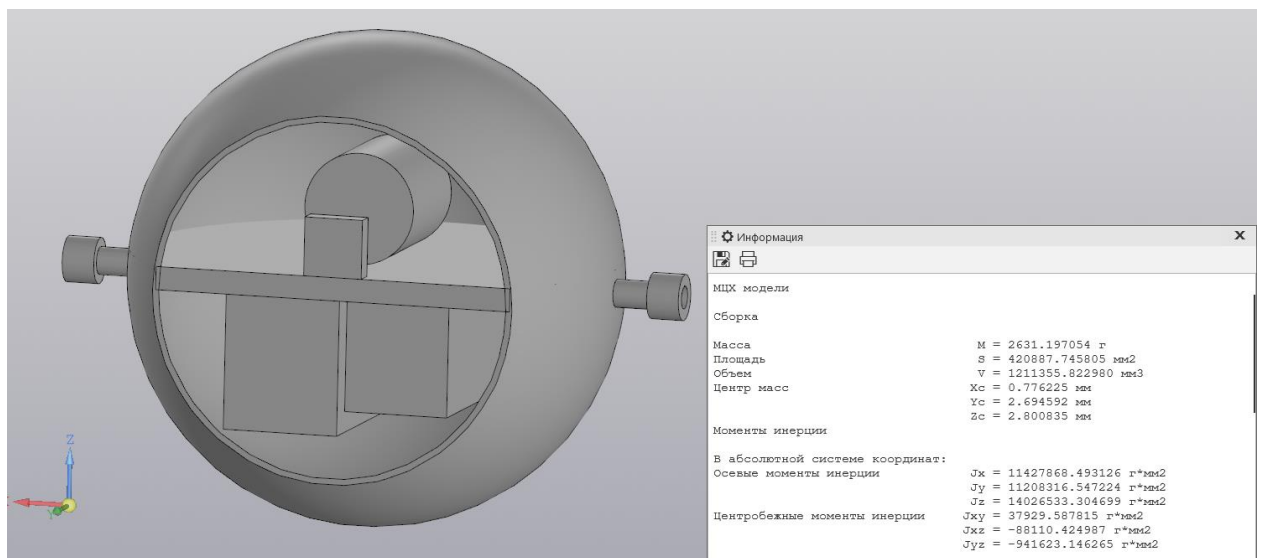


Рисунок 11. МЦХ модели платформы ГС.

$$m_{\Pi} = 2,631 \text{ кг}; I_x^{\Pi} = 11,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_y^{\Pi} = 11,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$I_z^{\Pi} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Платформа + наружная рамка ГС:

Подвижная часть всего ГС состоит из платформы с роторами ДУ и ДМ, наружной рамки ГС с 2 статорами ДМ и ДУ и 2 роторами ДМ и ДУ, закреплёнными на рамке.

Наружная рамка ГС

- 1) Рамку смоделируем толщиной 10 мм с осью на которой разместим ДМ и ДУ. Материал рамки - Алюминий Д16.

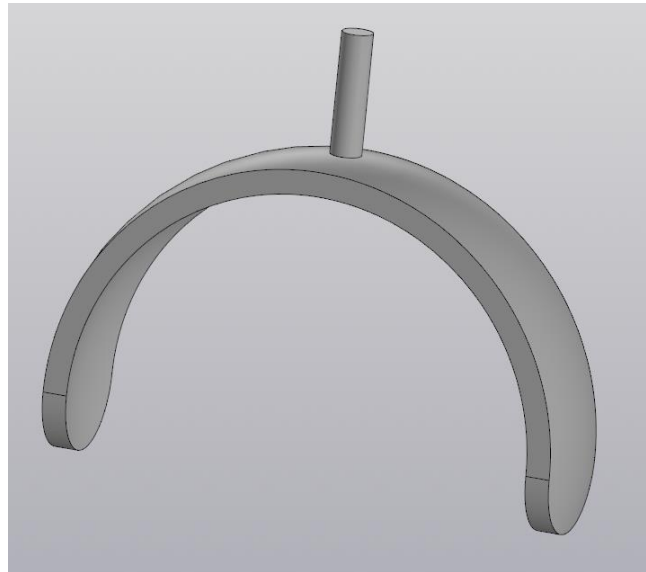


Рисунок 12. Модель рамы ГС.

- 2) Роторы ДМ и ДУ

Роторы ДМ и ДУ смоделируем одинаковыми по массе и форме. Массу возьмём 125 г.

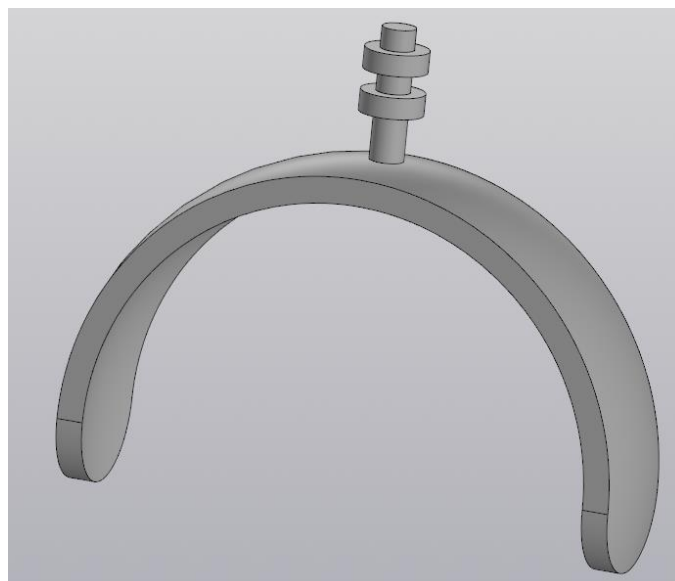


Рисунок 13. Модель рамы ГС с роторами ДУ и ДМ.

После сборки всех элементов конструкции получим рамку с платформой и определим её инерционные характеристики:

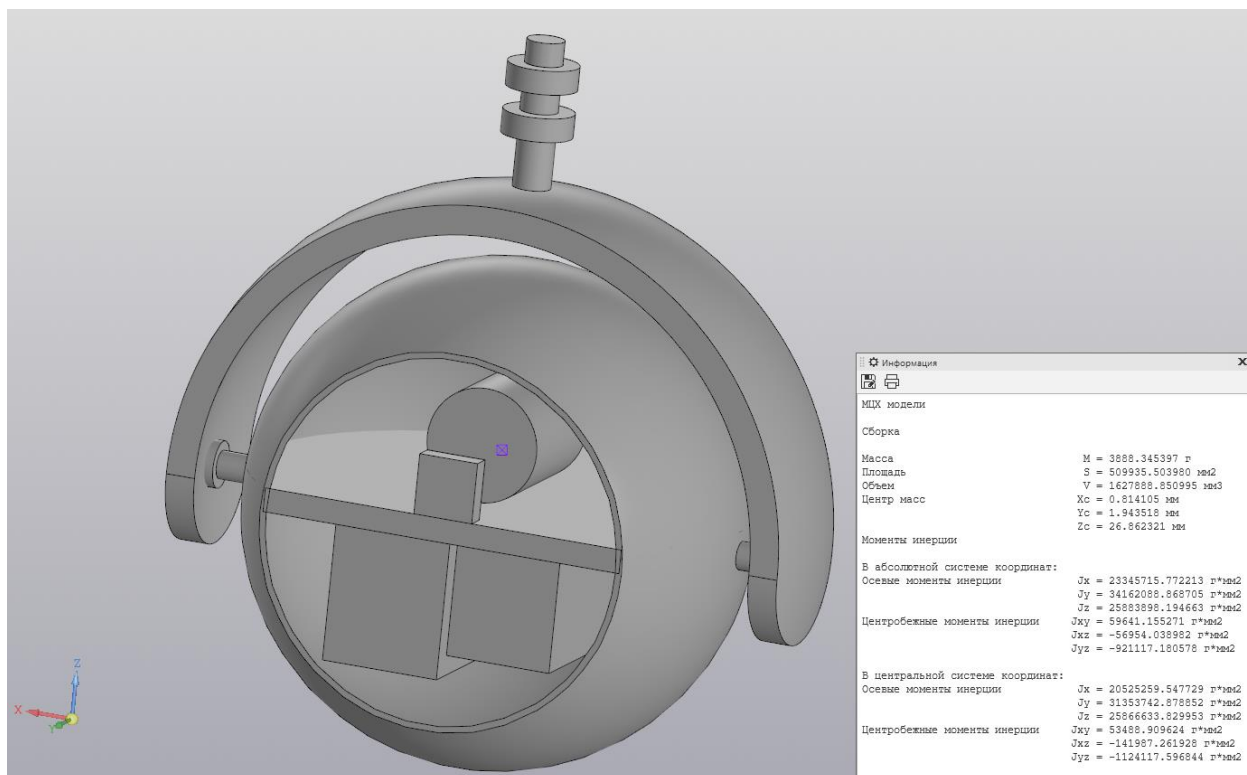


Рисунок 14. МЦХ модели всего ГС.

$$m_p = 3.89 \text{ кг}; I_x^p = 23,34 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_y^p = 34,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$I_z^p = 25,89 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Расчёт проекций линейных ускорений

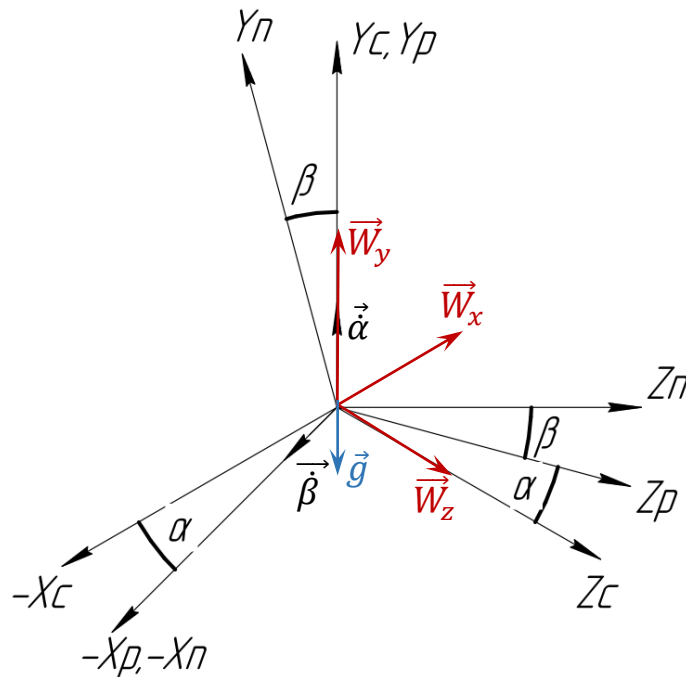


Рисунок 15. Линейные перегрузки, действующие на ГС.

$Ox_c y_c z_c$ – Основание;

$Ox_p y_p z_p$ – Наружная рамка ГС;

$Ox_n y_n z_n$ – Платформа ГС;

W_x, W_y, W_z – ускорения, действующие на ЛА;

Максимальные линейные перегрузки по осям ЛА - $n_x, n_y = 2,5$ ед., $n_z = 3$ ед.;

Максимальные углы прокачки - $\pm 50^\circ$ по обеим осям стабилизации;

Максимальные значения линейных ускорений для ЛА:

$$W_{x_{max}} = n_x \cdot g = 2,5 \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 24,5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} ;$$

$$W_{y_{max}} = n_y \cdot g = 2,5 \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 24,5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} ;$$

$$W_{z_{max}} = n_z \cdot g = 3 \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 29,4 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} ;$$

Ускорения вдоль оси рамки:

$$\begin{cases} W_{x_p} = W_x \cos \alpha - W_z \sin \alpha \\ W_{y_p} = W_y - g \\ W_{z_p} = W_z \cos \alpha + W_x \sin \alpha \end{cases}$$

Максимальные значения:

- Ось X_p :

$$W_{x_p} = W_x \cos \alpha - W_z \sin \alpha$$

При разных углах α поворота рамки и определённых ускорениях W_x, W_z , максимальное ускорение W_{x_p} в проекции на ось рамки будет при определённом угле поворота рамки α_{max} . Найдём этот угол, считая $W_x = const, W_z = const$:

$$\frac{dW_{x_p}}{d\alpha} = -W_x \sin \alpha_{max} - W_z \cos \alpha_{max} = 0$$
$$\operatorname{tg} \alpha_{max} = -\frac{W_z}{W_x} \Rightarrow \alpha_{max} = \operatorname{arctg} \left(-\frac{W_z}{W_x} \right)$$

Максимальное значение проекции ускорения на ось рамки:

$$W_{x_{pmax}} = W_x \cos \left[\operatorname{arctg} \left(-\frac{W_z}{W_x} \right) \right] - W_z \sin \left[\operatorname{arctg} \left(-\frac{W_z}{W_x} \right) \right]$$

Используя язык программирования Python и библиотеку построения графиков Plotly изобразим абсолютное значение $W_{x_{pmax}}$ при различных W_x, W_z в пределах заданного диапазона значений этих величин.

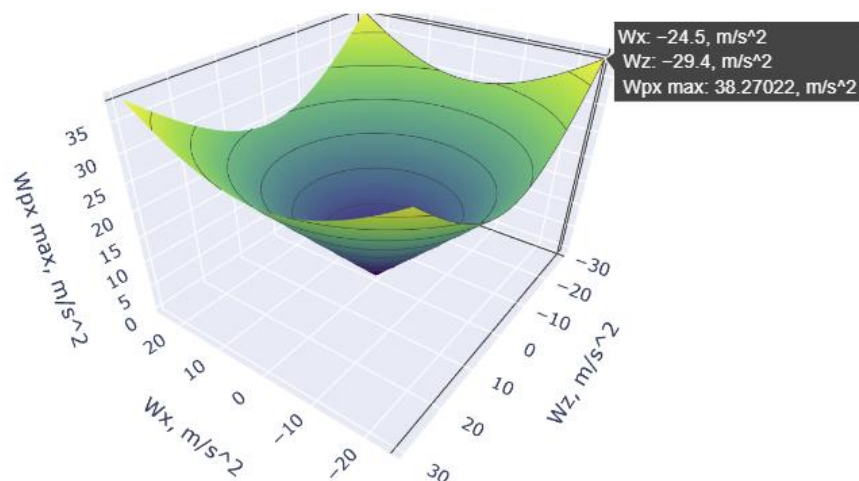


Рисунок 16. Зависимость максимального ускорения $W_{x_{pmax}}$ от W_x и W_z .

$$\left| W_{x_{pmax}} \right| = 38,27 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \quad \text{при } W_x = \pm 24,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, W_z = \pm 29,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

- Ось Y_p :

$$W_{yp} = W_y - g$$

$$|W_{ypmax}| = |W_{ymax} - g| = \left| -29,4 \frac{\text{M}}{\text{с}^2} - 9,8 \frac{\text{M}}{\text{с}^2} \right| = 39,2 \frac{\text{M}}{\text{с}^2}$$

- Ось Zp:

$$W_{zp} = W_z \cos \alpha + W_x \sin \alpha$$

При разных углах α поворота рамки и определённых ускорениях W_z, W_x , максимальное ускорение W_{zp} в проекции на ось рамки будет при определённом угле поворота рамки α_{max} . Найдём этот угол, считая $W_z = const, W_x = const$:

$$\frac{dW_{zp}}{d\alpha} = -W_z \sin \alpha_{max} + W_x \cos \alpha_{max} = 0$$

$$\text{tg } \alpha_{max} = \frac{W_x}{W_z} \Rightarrow \alpha_{max} = \text{arctg} \left(\frac{W_x}{W_z} \right)$$

Максимальное значение проекции ускорения на ось рамки:

$$W_{zpmax} = W_z \cos \left[\text{arctg} \left(\frac{W_x}{W_z} \right) \right] + W_x \sin \left[\text{arctg} \left(\frac{W_x}{W_z} \right) \right]$$

Используя язык программирования Python и библиотеку построения графиков Plotly изобразим абсолютное значение W_{zpmax} при различных W_z, W_x в пределах заданного диапазона значений этих величин.

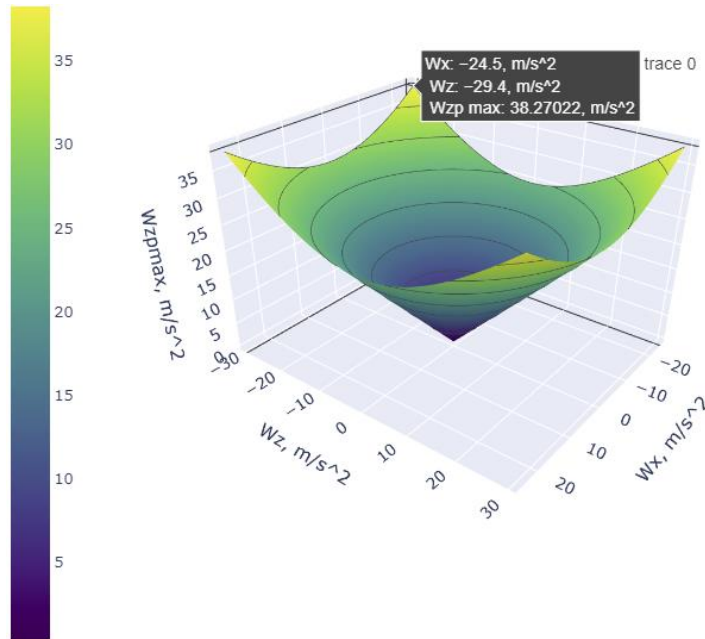


Рисунок 17. Зависимость максимального ускорения W_{zpmax} от W_x и W_z .

$$|W_{z_{pmax}}| = 38,27 \frac{M}{c^2} \quad \text{при} \quad W_x = \pm 24,5 \frac{M}{c^2}, W_z = \pm 29,4 \frac{M}{c^2} \\ \alpha = -39,8^\circ$$

Ускорения вдоль оси платформы:

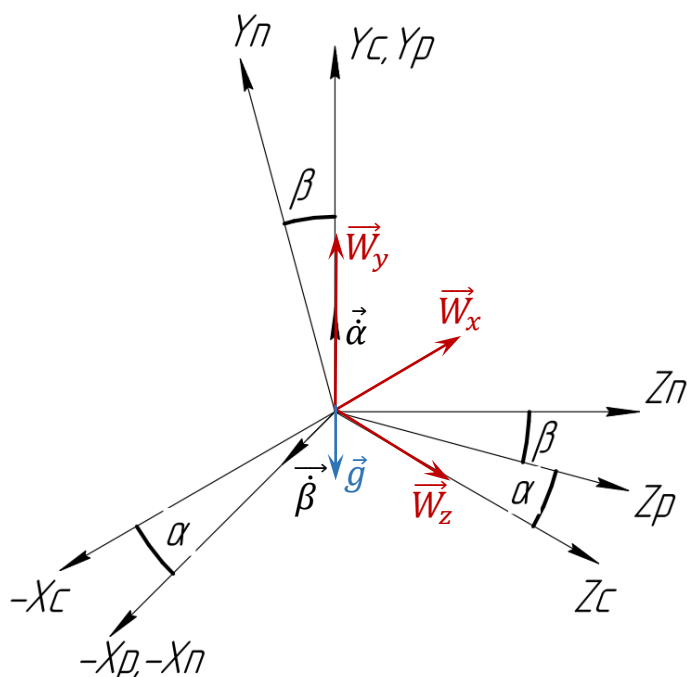


Рисунок 18. Линейные перегрузки, действующие на ГС.

$$\begin{cases} W_{x_n} = W_x \cos \alpha - W_z \sin \alpha \\ W_{y_n} = (W_y - g) \cos \beta - W_z \cos \alpha \sin \beta \\ W_{z_n} = W_z \cos \alpha \cos \beta + W_x \sin \alpha \cos \beta + (W_y - g) \sin \alpha \end{cases}$$

Максимальные значения:

- Ось Xп:

Так как оси Xп и Xр совпадают, максимальное значение проекции ускорения $W_{x_{пmax}}$ на ось Xп такое же как $W_{x_{рmax}}$

$$|W_{x_{пmax}}| = 38,27 \frac{M}{c^2} \quad \text{при} \quad W_x = \pm 24,5 \frac{M}{c^2}, W_z = \pm 29,4 \frac{M}{c^2} \\ \alpha = -39,8^\circ$$

- Ось Yп:

$$W_{y_n} = (W_y - g) \cos \beta - W_z \cos \alpha \sin \beta$$

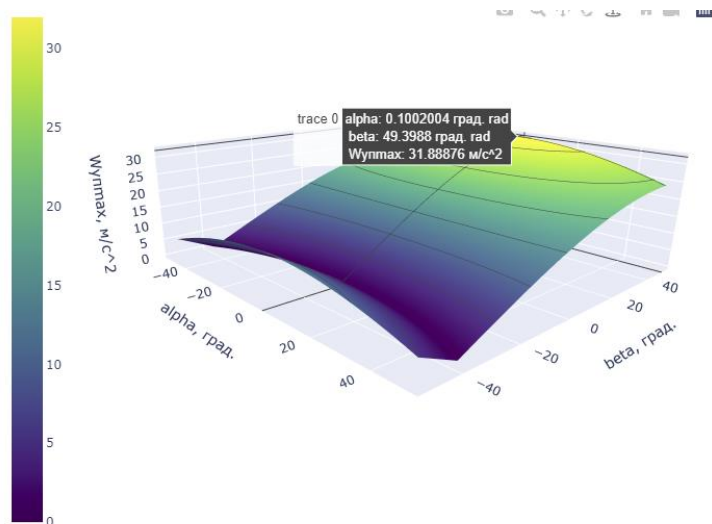


Рисунок 19. Зависимость максимального ускорения $W_{y_{max}}$ от α и β .

$$\left| W_{y_{max}} \right| \approx 32 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \quad \text{при} \quad W_y = 24,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, W_z = -29,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \\ \alpha = 0^\circ, \quad \beta = 50^\circ$$

- Ось ZП:

$$W_{z_{\Pi}} = W_z \cos \alpha \cos \beta + W_x \sin \alpha \cos \beta + (W_y - g) \sin \alpha$$

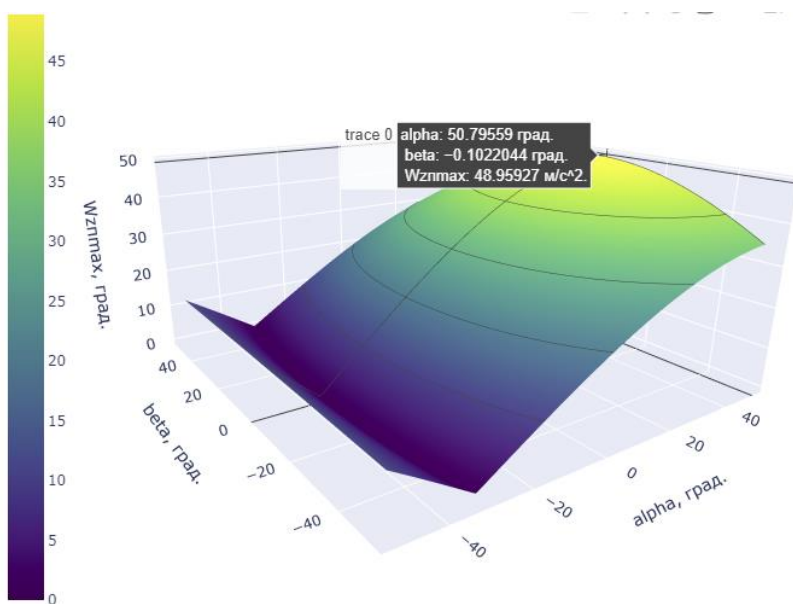


Рисунок 20. Зависимость максимального ускорения $W_{z_{\Pi max}}$ от α и β .

$$\left| W_{z_{\Pi max}} \right| \approx 49 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \quad \text{при} \quad W_x = 24,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, W_y = 24,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, W_z = 29,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \\ \alpha = 50^\circ, \quad \beta = 0^\circ$$

Моменты трения в опорах

Моменты трения, действующие вокруг осей карданного подвеса гиросtabilизатора, определяются трением в токоподводах, трением в опорах карданого подвеса и моментами трения в щеточно-коллекторном узле в двигателях стабилизации, приведенными к оси карданного подвеса.

Как правило, в качестве опор осей карданного подвеса гиросtabilизаторов применяют однорядные шариковые подшипники.

Момент трения шарикоподшипников складывается из следующих составляющих: а) момента трения качения шариков с наружным и внутренним кольцами; б) момента трения скольжения шариков относительно наружного и внутреннего колец; в) момента трения скольжения шариков относительно сепаратора; г) момента, вызываемого сопротивлением движению смазки.

Величины указанных составляющих момента трения определяются конструктивными параметрами подшипников, воспринимаемой ими нагрузкой и скоростями вращения его колец, поэтому при выбранном типе подшипника момент трения зависит от нагрузки и угловой скорости относительного движения его колец. Однако зависимость момента подшипника от угловой скорости его вращения незначительна, особенно при имеющих место в гиросtabilизаторах малых скоростях движения, и часто принимают, что этот момент имеет характер «сухого» трения.

При движении объекта на подшипники осей карданного подвеса гиросtabilизатора действуют как осевая, так и радиальная нагрузки. Для такой смешанной нагрузки величина момента трения радиальных подшипников

$$M_{y_1}^{\text{тр}} = (1,5A + 1,25R)k \frac{D_0}{d_{\text{ш}}} + M_0,$$

где M_0 – момент трения ненагруженного шарикоподшипника, сН · см (определяется типоразмером подшипника); A — осевая нагрузка, г; R - радиальная нагрузка, г; k — коэффициент трения качения, изменяющийся в

пределах от 0,005 до 0,001 см; D_0 — диаметр центров шариков, см; $d_{ш}$ — диаметр шарика, см.

Моменты трения радиальных подшипников с внутренним диаметром от 5 до 12 мм, широко применяющихся в приборостроении при совместном действии радиальных и осевых нагрузок, более точно определяются по следующим эмпирическим соотношениям:

$$M_{тр.ш/п} = M_0 + k_1 R + k_3 A \text{ при } R \leq 5H;$$

$$M_{тр.ш/п} = M_0 + 500 * (k_1 - k_2) + k_2 R + k_3 A \text{ при } R > 5H.$$

Значения коэффициентов M_0, k_1, k_2, k_3 приведены в [2].

Величины осевых и радиальных нагрузок на подшипники определяются весом рам карданного подвеса с учетом установленных на них элементов, проекциями линейного ускорения объекта на связанные оси и углами поворота рам карданного подвеса на рассматриваемом участке полета относительно связанных с объектом осей.

Определим радиальные и осевые нагрузки, возникающие в подшипниках, при совместном действии перегрузок на объект стабилизации.

Осевая нагрузка на опоры:

$$A = m * W_{A_{max}},$$

где A – осевая нагрузка на опоры; m – суммарная масса объектов, закреплённых в опорах; $W_{A_{max}}$ – максимально возможное ускорение в осевом направлении для установленных опор при заданных условиях эксплуатации.

При расчёте учтём, что на оси X_c расположены 2 шарикоподшипника, поэтому на каждый шарикоподшипник на оси X_c действует половина нагрузки, создаваемой платформой.

$$A_{x_{п}} = \frac{m_{п} * W_{A_{п}}^{max}}{2} = \frac{m_{п} * W_{x_{п}}^{max}}{2} = \frac{2.631 \text{ кг} \cdot 38.27 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{2} = 50.34 \text{ Н}$$

$$A_{y_{п}} = m_{п} * W_{A_{п}}^{max} = m_{п} * W_{y_{п}}^{max} = 3.89 \text{ кг} \cdot 32 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 124.48 \text{ Н}$$

Радиальная нагрузка на опоры:

$$R = m * W_{R_{max}},$$

где R – радиальная нагрузка на опоры; m – суммарная масса объектов, закреплённых в опорах; $W_{A_{max}}$ – максимально возможное ускорение в радиальном направлении для установленных опор при заданных условиях эксплуатации. При расчёте учтём, что на оси X_c расположены 2 шарикоподшипника, поэтому на каждый шарикоподшипник на оси X_c действует половина нагрузки, создаваемой платформой.

$$\begin{aligned}
 R_{x_{\Pi}} &= m_{\Pi} * W_{R_{\Pi}}^{max} = \frac{m_{\Pi}}{2} * \sqrt{W_{y_{\Pi max}}^2 + W_{z_{\Pi max}}^2} = \\
 &= \frac{2.631 \text{ кг}}{2} * \sqrt{\left(32 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}\right)^2 + \left(49 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}\right)^2} = 76,98 \text{ Н}; \\
 R_{y_p} &= m_p * W_{R_p}^{max} = m_p * \sqrt{W_{x_{p max}}^2 + W_{z_{p max}}^2} = \\
 &= 3.89 \text{ кг} * \sqrt{\left(38.27 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}\right)^2 + \left(38.27 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}\right)^2} = 142,4 \text{ Н};
 \end{aligned}$$

Осевые и радиальные люфты в опорах ведут к неработаспособности, так как нет виброустойчивости и сложно провести балансировку подвижных элементов карданова подвеса гиросtabilизаторов. Кроме того, при наличии люфтов возникают относительные смещения рам карданова подвеса ГС, что приводит к возникновению возмущающих моментов, действующих на ГС вокруг осей подвеса.

Для устранения люфтов создается предварительный натяг шарикоподшипников за счет смещения наружного его кольца относительно внутреннего кольца. При этом минимальная величина осевого усилия предварительного натяга выбирается не ниже, чем максимальная осевая нагрузка на данный шарикоподшипник с тем, чтобы в заданных эксплуатационных условиях не возникали «размыкания» подшипников, приводящие к люфтам в опорах.

Величина осевого усилия предварительного натяга вычисляется по формуле:

$$A_0 \geq 1,58 * R^{max} * tg\beta_k + 0,5 * A^{max},$$

где R^{max} и A^{max} – максимальные значения радиальной и осевой нагрузок на один шарикоподшипник оси соответственно, β_k – угол контакта в шарикоподшипнике. Для радиального ш/п с предварительным натягом принимаем $\beta_k = 20^\circ$.

Минимальные предварительные натяги, которые необходимо обеспечить в подшипниках опор карданова подвеса ГС:

$$A_{\min x_{\Pi}} = 1,58 * R_{x_{\Pi}} * tg\beta_k + 0,5 * A_{x_{\Pi}} = 1,58 * 76.98 \text{ Н} * 0,364 + 0,5 * 50.34 \text{ Н} = 69,45 \text{ Н};$$

$$A_{\min y_p} = 1,58 * R_{y_p} * tg\beta_k + 0,5 * A_{y_p} = 1,58 * 142.4 \text{ Н} * 0,364 + 0,5 * 124.48 \text{ Н} = 144.13 \text{ Н};$$

Ш/П выберем из [2]: $D = 12 \text{ мм}$; $M_0 = 10,8 \text{ г} \cdot \text{см}$;

$$k_1 = 0,0124 \text{ см}; k_2 = 0,0050 \text{ см}; k_3 = 0,010 \text{ см}.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} M_{\text{трш/п}x_{\Pi}} &= [M_0 + 500 \cdot (k_1 - k_2) + k_2 R_{x_{\Pi}} + k_3 A_{\min x_{\Pi}}] \cdot 2 = \\ &= [10,8 \text{ г} \cdot \text{см} + 500 \text{ г} \cdot (0,0124 \text{ см} - 0,0050 \text{ см}) + 0,01 \text{ см} \cdot \\ &\cdot 7850 \text{ г} + 0,010 \text{ см} \cdot 7081 \text{ г}] \cdot 2 = 249,132 \text{ сНсм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{трш/п}y_p} &= M_0 + 500 \cdot (k_1 - k_2) + k_2 \cdot R_{y_p} + k_3 A_{\min y_p} = 10,8 \text{ г} \cdot \text{см} + 500 * \\ &(0,0124 \text{ см} - 0,0050 \text{ см}) + 0,0050 \text{ см} \cdot 14520 \text{ г} + 0,010 \text{ см} \cdot 14700 \text{ г} = \\ &234 \text{ сНсм}; \end{aligned}$$

Моменты тяжения токоподводов

Так как современные гиросtabilизаторы являются сложными электромеханическими устройствами, то для обеспечения функционирования, как самих стабилизаторов, так и стабилизируемых приборов, устанавливаемых на платформе, требуется передача большого количества электрических сигналов. Количество необходимых токоподводов достигает нескольких десятков и даже сотен, причем передаваемые по ним токи лежат в пределах от долей миллиампера до десятков ампер (в цепях питания гиromоторов). Конструкцией токоподводов должна быть обеспечена высокая надежность передачи сигналов через них в условиях жестких эксплуатационных воздействий (линейные ускорения и вибрации) и при больших углах поворота карданного подвеса. Токоподводы с гибкими проводниками обеспечивают высокую надежность передачи сигнала. Момент, создаваемый такими токоподводами, пропорционален углам поворота рам карданного подвеса и при правильном выборе типа проводников и конструкции токоподвода может быть сделан относительно небольшим. Жгуты проводников, расположенных вдоль оси вращения (для каждой из осей карданного подвеса свой жгут). Для получения малых упругих моментов проводники имеют запас по длине, обеспечивающий их свободное скручивание.

При изгибе и скручивании проводников возникают как упругие моменты, так и моменты трения из-за взаимного перемещения проводников в жгуте. При соответствующем выборе материалов изоляции проводов моменты трения удастся уменьшить до величины, пренебрежимо малой по сравнению с моментами трения в опорах карданного подвеса. Для уменьшения упругих моментов применяют провода малого сечения.

Удельный момент упругих токоподводов по опытным данным определяются по формуле:

$$M_{\text{тп}} = \frac{k_{\text{т.п.}} * N}{l_{\text{т.п.}}} * \alpha_{\text{раб}} ,$$

где $k_{т.п} = 5 \div 8 \text{ г см}^2/\text{рад}$ – эмпирический коэффициент для токоподводов первого типа; N – количество токоподводов; $l_{т.п}$ – длина токоподвода между местами заделки проводников, см.

Примем: $k = 5 \left[\frac{\text{сН} \cdot \text{см}^2}{\text{рад}} \right]$, $N = 19$, $l_{т.п} = 5 \text{ см}$, $\alpha_{\text{раб}} = \beta_{\text{раб}} = 50^\circ$;

$$M_x^{\text{т.п.}} = \frac{k_{т.п.} * N_x}{l_{т.п.х}} * \beta_{\text{раб}} = \frac{5 \frac{\text{сН} \cdot \text{см}^2}{\text{рад}} \cdot 19}{5 \text{ см}} * 0.87 \text{ рад} = 31,77 \text{ сНсм};$$

$$M_y^{\text{т.п.}} = \frac{5 \frac{\text{сН} \cdot \text{см}^2}{\text{рад}} \cdot 40}{5 \text{ см}} * 0.87 \text{ рад} = 68,73 \text{ сНсм};$$

Моменты небаланса

Полностью избавиться от смещения центра масс мы не можем, следовательно, после балансировки останется смещение центра масс (Δx , Δy , Δz), то есть некий остаточный момент небаланса $M_{(0)}^{\text{НБ}}$.

Момент несбалансированности определяется моментом трения на неподвижном основании, умноженным на максимальную перегрузку, испытываемую прибором.

Момент трения на неподвижном основании определяется по формуле:

$$M_{\text{тр.ш/п}} = M_0 + 500 * (k_1 - k_2) + k_2 R + k_3 A$$

Для неподвижного основания на оси X_c :

$$R = \frac{m_{\text{п}} g}{2}; \quad A = 0$$

Для неподвижного основания на оси Y_c :

$$R = 0; \quad A = m_{\text{п}} g$$

Балансировка поможет отбалансировать с точностью до момента трения без предварительного натяга. При расчёте учтём, что на оси X_c расположены 2 шарикоподшипника, поэтому на каждый шарикоподшипник на оси X_c действует половина веса платформы.

Таким образом, получим:

$$M_y^{HB} = [M_0 + 500 \cdot (k_1 - k_2) + k_3 m_p g] \cdot n_y$$

$$= [10.8 \text{ г} \cdot \text{см} + 500 \text{ г} \cdot (0,0124 \text{ см} - 0,0050 \text{ см}) + 0,010 \text{ см} \cdot$$

$$\cdot 3890 \text{ г}] \cdot 2,5 = 133,5 \text{ сНсм};$$

$$M_x^{HB} = \left[M_0 + 500 \cdot (k_1 - k_2) + \frac{k_2 m_{пл} g}{2} \right] \cdot 2n_x$$

$$= \left[10.8 \text{ г} \cdot \text{см} + 500 \text{ г} \cdot (0,0124 \text{ см} - 0,0050 \text{ см}) + 0,05 \text{ см} \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \frac{2631 \text{ г}}{2} \right] \cdot 2 \cdot 2,5 = 105,39 \text{ сНсм};$$

Моменты неравножёсткости

Карданный подвес стабилизатора состоит из упругих элементов (рам, подшипников), при деформации которых появляются силы внутреннего трения. Под влиянием сил инерции, возникающих при движении основания с ускорением, происходят упругие деформации элементов карданного подвеса и относительные перемещения его элементов. Направления перемещений из-за различия жёсткости элементов в разных направлениях обычно не совпадают с линией действия сил инерции, вследствие чего возникают моменты вокруг осей карданного подвеса гиросtabilизатора. При вибрации основания, на котором установлен гиросtabilизатор, на величину отклонения элементов его конструкции, т. е. на амплитуду вынужденных колебаний, влияют силы внутреннего трения в элементах карданного подвеса, демпфирующие их колебания.

Предположим, что ЛА движется с ускорением \bar{W} . Тогда произойдёт смещение центра масс в противоположную сторону от ускорения за счёт того, что жёсткость конструкции не бесконечна. То есть произойдут изгибные изменения конструкции и центр масс сместится. Но центр масс сместится не по линии \bar{W} , так как жёсткости по осям разные.

Значения жесткостей рам по разным осям примем известными (аналогично подобным конструкциям):

$$C_{xп} = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad C_{yп} = 1,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad C_{zп} = 3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad C_{yн} = 1,6 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

$$C_{ZH} = 3,8 * 10^8 \frac{H}{M},$$

Таким образом,

$$M_x^{HЖ} = (m_{пл} * g)^2 * n_y * n_z * \left(\frac{1}{C_{yп}} - \frac{1}{C_{zп}} \right) = \left(2.63 \text{ кг} * 9,8 \frac{M}{c^2} \right)^2 * 2.5 * 3 *$$

$$\left(\frac{1}{1,2 * 10^6 \frac{H}{M}} - \frac{1}{3,6 * 10^6 \frac{H}{M}} \right) = 2.78 * 10^{-3} \text{ Н} * \text{м};$$

$$M_x^{HЖ} = 27,8 \text{ сНсм};$$

$$M_y^{HЖ} = (m_p * g)^2 * n_x * n_z * \left(\frac{1}{C_{yп}} - \frac{1}{C_{zп}} \right) + (m_p * g)^2 * n_x * n_y * \left(\frac{1}{C_{xн}} - \frac{1}{C_{zн}} \right) = \left(3,89 \text{ кг} * 9,8 \frac{M}{c^2} \right)^2 * 2.5 * 3 * \left(\frac{1}{1,2 * 10^6 \frac{H}{M}} - \frac{1}{3,6 * 10^6 \frac{H}{M}} \right) + \left(3,89 \text{ кг} * 9,8 \frac{M}{c^2} \right)^2 * 2.5 * 3 * \left(\frac{1}{2,2 * 10^6 \frac{H}{M}} - \frac{1}{3,8 * 10^8 \frac{H}{M}} \right) = 6.89 * 10^{-4} \text{ Н} * \text{м}.$$

$$M_y^{HЖ} = 6.89 \text{ сНсм};$$

При линейных вибрациях основания, на котором установлен гиросtabilизатор, возникают постоянные составляющие моментов сил инерции вокруг осей карданова подвеса.

Колебания основания по гармоническому закону:

При вибрации $f = 0,1 \div 50$ [Гц] с амплитудой $A = 4 \cdot g$

Примем на основании аналогичных конструкций коэффициенты динамичности платформы и наружной рамки равными:

$$\begin{aligned} \lambda_{xc} = \lambda_{yc} = \lambda_{zc} &= 6; \\ M_{xn}^{HЖ} \kappa &= (m_{п} g)^2 \cdot n_y \cdot n_z \cdot \lambda_{yc} \cdot \lambda_{zc} \left(\frac{1}{C_{Yc}^п} - \frac{1}{C_{Zc}^п} \right) = \\ &= \left(2.63 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{M}{c^2} \right)^2 \cdot 2.5 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 6 \cdot \left(\frac{1}{1.2 \cdot 10^6 \frac{H}{M}} - \frac{1}{3.6 \cdot 10^6 \frac{H}{M}} \right) = 15,69 [\text{сНсм}] \end{aligned}$$

$$M_{yn}^{HЖ} \kappa = (m_p g)^2 \cdot n_x \cdot n_z \cdot \lambda_{xc} \cdot \lambda_{zc} \left(\frac{1}{C_{Zc}^н} - \frac{1}{C_{Xc}^н} \right) + (m_{п} g)^2 \cdot n_x \cdot n_z \cdot \lambda_{xc} \cdot$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \lambda_{zc} \left(\frac{1}{C_{zc}^n} - \frac{1}{C_{xc}^n} \right) = \\
& = \left(3.89 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)^2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 6 \cdot \left(\frac{1}{1.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}} - \frac{1}{3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}} \right) \\
& + \left(2.63 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)^2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 6 \cdot \left(\frac{1}{3.8 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}} - \frac{1}{3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}} \right) \\
& = 70,75 [cH \cdot \text{см}]
\end{aligned}$$

где m_n, m_p — масса платформы и масса платформы с внешней рамой соответственно, n_x, n_y, n_z — линейные перегрузки при вибрации основания

Учитывая значения, полученные для моментов неравножесткости без учета вибрационных перегрузок суммарный момент равен сумме этих двух составляющих:

$$M_{xc}^{HJC} = M_{xc}^{HJC} + M_{xc}^{HJC} = 27,8 \text{ cH} \cdot \text{см} + 15,69 \text{ cH} \cdot \text{см} = 43,49 [cH \cdot \text{см}]$$

$$M_{yc}^{HJC} = M_{yc}^{HJC} + M_{yc}^{HJC} = 6,89 \text{ cH} \cdot \text{см} + 70,7 \text{ cH} \cdot \text{см} = 77,59 [cH \cdot \text{см}]$$

Инерционный момент рам карданова подвеса

При угловых движениях основания в двухосном гиросtabilизаторе вследствие особенностей кинематики карданова подвеса наружная и внутренняя рамы поворачиваются вокруг стабилизируемой оси с переменной угловой скоростью даже при постоянной угловой скорости поворота основания. В индикаторных гиросtabilизаторах компенсация знакопеременных моментов внешних сил, так же как и постоянных, полностью должна быть обеспечена системой стабилизации, поэтому знание инерционного момента при проектировании гиросtabilизатора становится необходимым.

Наличие углового ускорения платформы обуславливает инерционный момент реакции, приложенный к наружной раме карданова подвеса ГС со стороны платформы. Полный инерционный момент, действующий вокруг оси наружной рамы, определяется как сумма инерционного момента платформы и инерционного момента самой наружной рамы. Этот момент также должен

компенсироваться двигателем стабилизации, в нашем случае датчиком момента.

Предположив, что скорости собственной прецессии гиростабилизатора вокруг осей x и y малы, то выражение для полного инерционного момента, действующего вокруг оси наружной рамы, имеет вид:

Инерционный момент равен:

$$M_{Y_C}^{ин} = (J_{Y_p} + J_{Z_n}) \cdot \dot{\omega}_{Z_p} \cdot tg\beta - \left(J_{Z_p} - J_{X_p} - \frac{J_{Y_p}}{\cos^2 \beta} - J_{Z_n} tg^2 \beta \right) \cdot \omega_{X_p} \cdot \omega_{Z_p}$$

Где J_{Y_p}, J_{Z_n} — момент инерции наружной рамы вокруг оси вращения Y_C и момент инерции платформы вокруг оси перпендикулярной плоскости наружной рамы, $\dot{\omega}_Z$ — угловое ускорение вокруг наружной рамы, β — угол между осью стабилизации Y_C и осью чувствительности гироскопа, $\omega_{X_p}, \omega_{Z_p}$ — проекции абсолютной угловой скорости наружной рамы на ее собственные оси X_p, Z_p .

$$\omega_{X_p} = \omega_X \cdot \cos \alpha - \omega_Z \cdot \sin \alpha$$

$$\omega_{Z_p} = \omega_Z \cdot \cos \alpha + \omega_X \cdot \sin \alpha$$

Где ω_X, ω_Z — проекции абсолютной угловой скорости объекта установки на оси X и Z связанной с ним системы координат.

Согласно техническому заданию, максимальная угловая скорость объекта по трем осям равна:

$$\omega_x = \omega_y = 80[^\circ/c]$$

При повороте внешней рамы относительно основания ускорение платформы вокруг оси Z_p будет:

$$\dot{\omega}_{Z_p} = \dot{\omega}_Z \cos \alpha + \dot{\omega}_X \sin \alpha$$

Согласно техническому заданию, максимальное ускорение объекта по трем осям равно:

$$\dot{\omega}_x = \dot{\omega}_y = 50[^\circ/c^2]$$

Из выражения инерционного момента рамы карданова подвеса видно, что оно будет принимать максимальное значение при угле отклонения оси чувствительности гироскопа от оси стабилизации Y_C $\beta = 50^\circ$, и угле поворота

наружной рамки на угол $\alpha = 35^\circ$.

$$\omega_{xp} = \omega_x \cdot \cos \alpha - \omega_z \cdot \sin \alpha = 80^\circ/c \cdot \cos(35^\circ) - 80^\circ/c \cdot \sin(35^\circ) = 19,65^\circ/c$$

$$\omega_{zp} = \omega_z \cdot \cos \alpha + \omega_x \cdot \sin \alpha = 80^\circ/c \cdot \cos(35^\circ) + 80^\circ/c \cdot \sin(35^\circ) = 111,4^\circ/c$$

$$\dot{\omega}_{zp} = \dot{\omega}_z \cos \alpha + \dot{\omega}_x \sin \alpha = 50^\circ/c^2 \cdot \cos(35^\circ) + 50^\circ/c^2 \cdot \sin(35^\circ) = 69,64^\circ/c^2$$

$$\begin{aligned} M_{Yc}^{uu} &= (J_{Yp} + J_{Zn}) \cdot \dot{\omega}_{zp} \cdot tg \beta - \left(J_{Zp} - J_{Xp} - \frac{J_{Yp}}{\cos^2 \beta} - J_{Zn} tg^2 \beta \right) \cdot \omega_{xp} \cdot \omega_{zp} = \\ &= (J_{Yp} + J_{Zn}) \cdot (\dot{\omega}_z \cos \alpha + \dot{\omega}_x \sin \alpha) \cdot tg \beta - \left(J_{Zp} - J_{Xp} - \frac{J_{Yp}}{\cos^2 \beta} - J_{Zn} tg^2 \beta \right) \cdot \\ &\cdot (\omega_x \cdot \cos \alpha - \omega_z \cdot \sin \alpha) \cdot (\omega_z \cdot \cos \alpha + \omega_x \cdot \sin \alpha) \\ &= (34,16 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 + 14 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2) \\ &\cdot \left(50^\circ \frac{1}{c^2} \cdot \cos(35^\circ) + 50^\circ \frac{1}{c^2} \cdot \sin(35^\circ) \right) \cdot tg 50^\circ \\ &- \left(25,89 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 - 23,34 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 - \frac{34,16 \text{ кг} * \text{ м}^2}{\cos^2 50^\circ} \right. \\ &- \left. 14,34 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 \cdot tg^2 50^\circ \right) \cdot (80^\circ/c \cdot \cos(35^\circ) - 80^\circ/c \\ &\cdot \sin(35^\circ)) \cdot (80^\circ/c \cdot \cos(35^\circ) + 80^\circ/c \cdot \sin(35^\circ)) \\ &= 43,53 [cH \cdot \text{ см}] \end{aligned}$$

При колебаниях основания с малой амплитудой вокруг наружной рамы Z_n , по закону $\gamma = \gamma_0 \cdot \sin(\omega t)$, где f — частота качки, γ_0 — амплитуда качки

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 5^\circ ; f = 0,7 [Гц] \\ \gamma &= \gamma_0 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \Rightarrow \ddot{\gamma}_0 = (2\pi f)^2 \cdot \gamma_0 \end{aligned}$$

Инерционный момент вокруг оси внешней рамы вызванный качкой основания при $\beta = 50^\circ$, и угле поворота наружной рамки на угол $\alpha = 0^\circ$:

$$\begin{aligned}
M_{Yc}^{uH\kappa} &= (J_{Yp} + J_{Zn}) \cdot (\dot{\omega}_{zn} + (2\pi f)^2 \cdot \gamma_0) \cdot tg\beta - \left(J_{Zp} - J_{Xp} - \frac{J_{Yp}}{\cos^2 \beta} - J_{Zn} tg^2 \beta \right) \cdot \\
&\cdot \gamma_0^2 \cdot \omega^2 \frac{\sin 2\alpha}{2} \cos^2 \omega t = \\
&= (34,16 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 + 14 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2) \cdot (50^\circ / c^2 + (2\pi \\
&\cdot 0,7 \text{ Гц})^2 \cdot 5^\circ) \cdot tg 50 \\
&- \left(25,89 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 - 23,34 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 - \frac{34,16 \text{ кг} * \text{ м}^2}{\cos^2 50^\circ} \right. \\
&- \left. 14,34 * 10^{-3} \text{ кг} * \text{ м}^2 \cdot tg^2 50^\circ \right) \cdot 5^\circ \\
&\cdot (2\pi \cdot 0,7 \text{ Гц})^2 \frac{\sin 0^\circ}{2} \cos^2 2\pi \cdot 0,7 \text{ Гц} \cdot t = 179 [\text{сН} \cdot \text{см}]
\end{aligned}$$

Суммарные возмущающие моменты

Вокруг оси х:

Момент трения	$M_x^{\text{тр}}$	249,132, сНсм
Момент небаланса	$M_x^{\text{нб}}$	105,39 сНсм
Момент от неравножёсткости	$M_x^{\text{нж}}$	43,49 сНсм
Момент тяжения токоподводов	$M_x^{\text{тп}}$	61,77 сНсм
Суммарный возмущающий момент $M_x^{\text{сумм}} = M_x^{\text{тр}} + M_x^{\text{нб}} + M_x^{\text{нж}} + M_x^{\text{тп}}$		459.65 сНсм

Вокруг оси у:

Момент трения	$M_y^{\text{тр}}$	234 сНсм;
Момент небаланса	$M_y^{\text{нб}}$	133,5 сНсм
Момент от неравножёсткости	$M_y^{\text{нж}}$	77,59 сНсм
Момент тяжения токоподводов	$M_y^{\text{тп}}$	68,73 сНсм
Инерционный момент рам КП	$M_{\text{ин}}^y$	222,53 сНсм
Суммарный возмущающий момент $M_y^{\text{сумм}} = M_y^{\text{тр}} + M_y^{\text{нб}} + M_y^{\text{нж}} + M_y^{\text{тп}} + M_{\text{ин}}^y$		736.35 сНсм

Описание конструкции гиросtabilизатора

Гиросtabilизатор представляет собой платформу (9), закрепленную в консольном подвесе. На платформе расположены: чувствительный элемент - гироскоп МГТУ-05 (1), камера (4), тепловизор (3) и лазерный дальномер (2).

На полуосях расположены датчик момента-ДМ-20 (26), датчик угла - СКТ-260-1 (27). Датчик момента ДМ-20 представляет собой коллекторный моментный двигатель постоянного тока в корпусном исполнении.

На платформе и раме установлены балансировочные грузы (5,6,7). С их помощью осуществляется точная балансировка массы на платформе, для предотвращения появления внешнего возмущающего момента, вызванного несбалансированностью конструкции.

Питание гиросtabilизатора обеспечивается через розетку (28), установленную в корпусе (16) гиросtabilизатора.

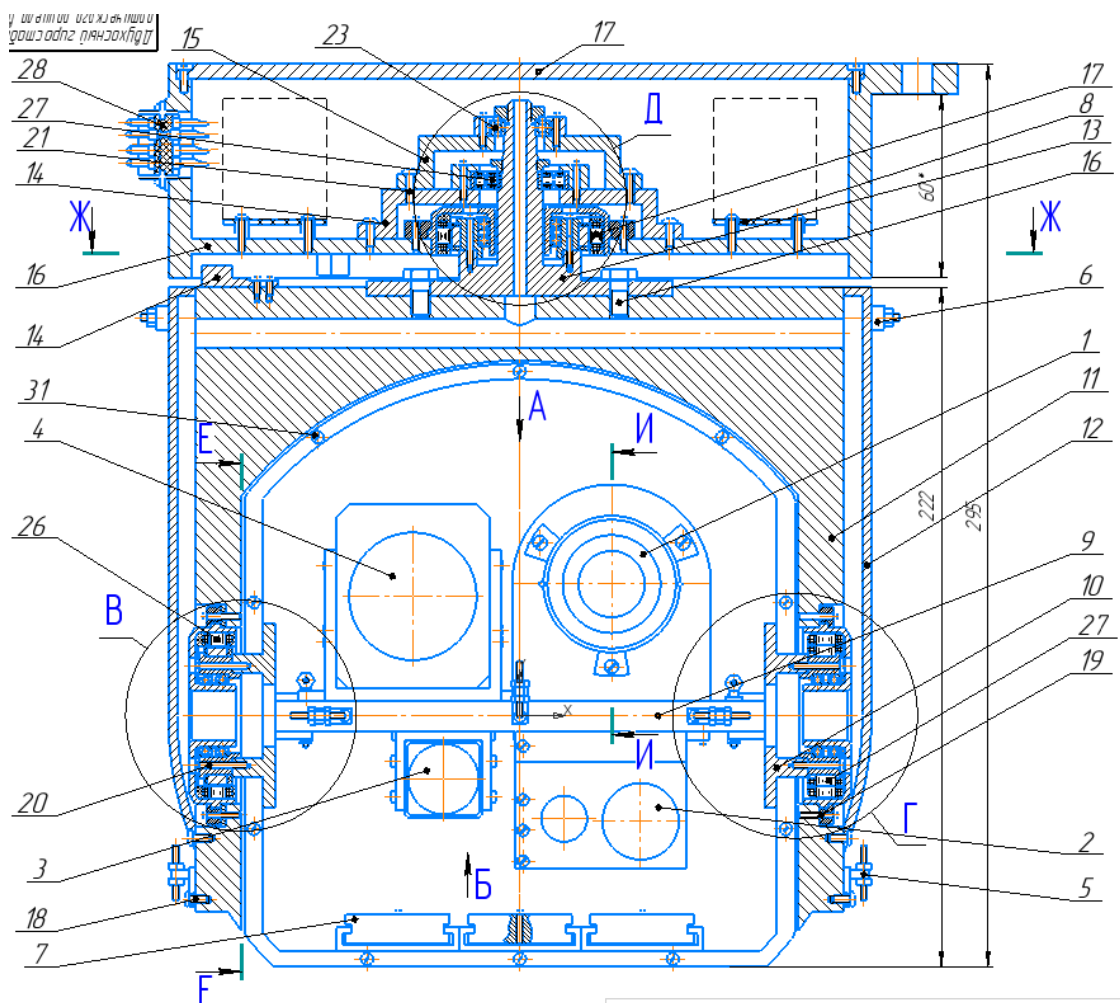


Рисунок 21. Общий вид гиросtabilизатора.

Расчет устойчивости системы

Расчет устойчивости каналов стабилизации по осям платформы и рамы при действии постоянного во времени внешнего возмущающего момента. Можно считать, что гиростабилизатор устойчив, если устойчивы отдельно система стабилизации и чувствительный элемент на подвижном основании. Такой подход позволяет рассчитывать систему стабилизации гиростабилизатора независимо от ЧЭ, что важно для упрощения расчетов.

Для расчета запишем уравнения движения гиростабилизатора по принципу Даламбера:

По оси платформы:
$$I_x \cdot \ddot{\beta} + D_\beta \cdot \dot{\beta} + K_{c\beta} \cdot \beta = M_{xn}^{BH}$$

По оси рамы:
$$I_y \cdot \ddot{\alpha} + D_\alpha \cdot \dot{\alpha} + K_{c\alpha} \cdot \alpha = M_{yp}^{BH}$$

или в операторной форме:

$$I_x \cdot s^2 \cdot \beta(s) + D_\beta \cdot s \cdot \beta(s) + K_{c\beta} \cdot \beta(s) = M_{xn}^{BH}(s)$$

$$I_y \cdot s^2 \cdot \alpha(s) + D_\alpha \cdot s \cdot \alpha(s) + K_{c\alpha} \cdot \alpha(s) = M_{yp}^{BH}(s)$$

$K_{c\beta}$ и $K_{c\alpha}$ – коэффициенты обратной связи;

D_β , D_α – коэффициенты демпфирования в ДМ;

$I_x = 190.68 \text{ сНсм}^2$ – момент инерции платформы с элементами по оси платформы;

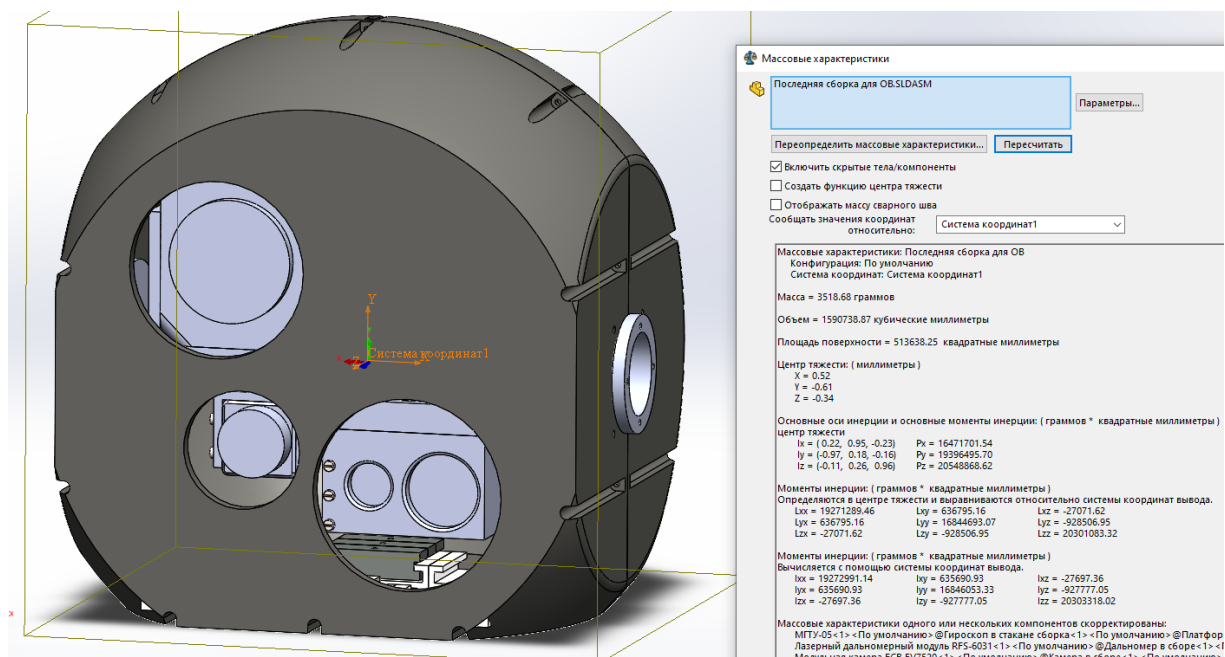


Рисунок 21. Массовые характеристики платформы.

$I_y = 676.23 \text{ сНсм}^2$ – момент инерции рамы по оси рамы;

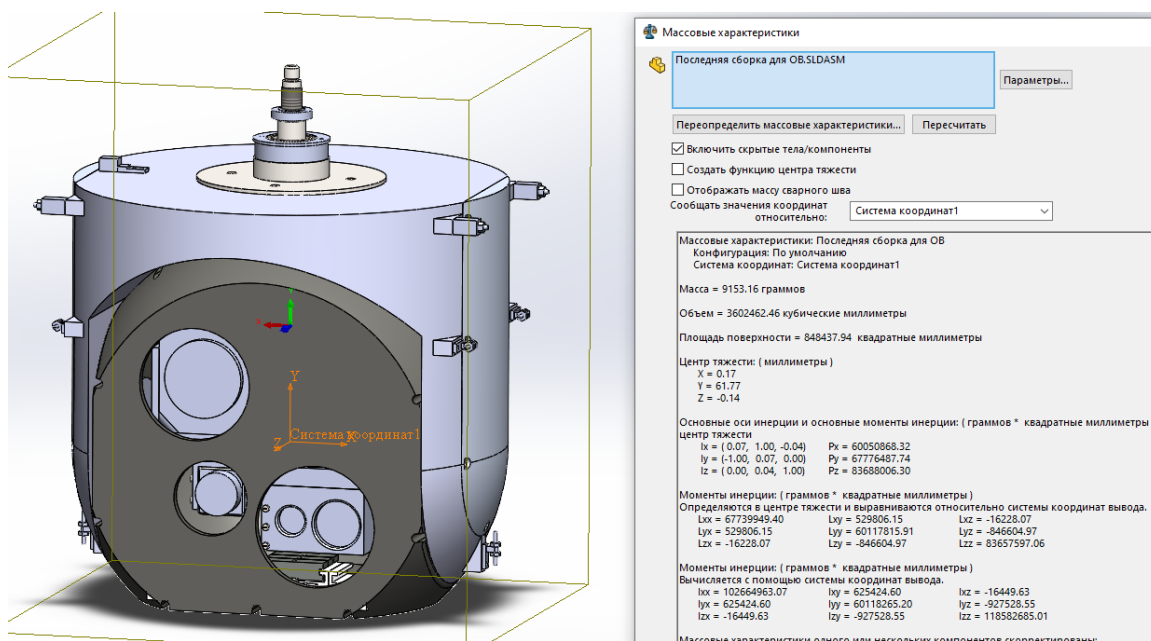


Рисунок 22. Массовые характеристики рамы с платформой.

Расчет канала стабилизации по оси платформы.

Структурная схема:

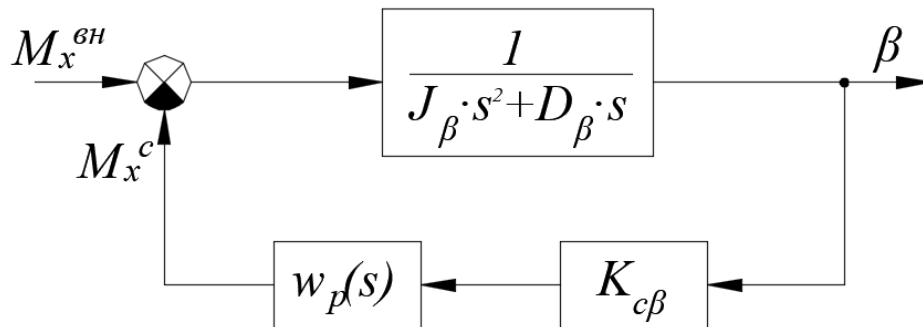


Рисунок 23. Структурная схема канала стабилизации по оси платформы.

Передаточная функция разомкнутой нескорректированной системы выглядит следующим образом:

$$J_\beta \cdot s^2 \cdot \beta(s) + D_\beta \cdot s \cdot \beta(s) + K_{c\beta} \cdot \beta(s) = M_{xn}^{BH}(s)$$

$$W(s) = \frac{K_{c\beta}}{J_\beta \cdot s^2 + D_\beta \cdot s} = \frac{K_{c\beta}}{D_\beta \cdot s(T_\beta \cdot s + 1)}$$

где $J_\beta = I_{plx} = 190.68 \text{ [сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2]$ – момент инерции платформы с установленными на ней элементами относительно оси OX ,

D_β – коэффициент демпфирования по оси OX .

Считаем, что демпфирование полностью определяется демпфированием в моментном датчике, тогда:

$$\text{Коэффициент демпфирования: } D_\beta = 50 \left[\frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\frac{\text{рад}}{\text{с}}} \right]$$

Согласно ТЗ, статическая ошибка: $\alpha_{ст} = \beta_{ст} = 1' = 0,0002909[\text{рад}]$

Коэффициент обратной связи выберем из условия обеспечения заданной статической погрешности стабилизации:

$$K_{c\beta} = \frac{M_x^{BH}}{\beta_{ст}} = \frac{459.65}{0,0002909} = 1580096.253 \approx 1600000 \left[\frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\text{рад}} \right]$$

Постоянная времени платформы:

$$T_\beta = \frac{J_\beta}{D_\beta} = \frac{190.68}{50} = 3.814 \text{ [с]}$$

Тогда, передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W(s) = \frac{1600000}{190.68 \cdot s^2 + 50 \cdot s} = \frac{32000}{s(3.814 \cdot s + 1)}$$

Далее для построения вида переходного процесса и логарифмических частотных характеристик использовался программный комплекс Simulink системы автоматизированного проектирования MATLAB. В ПК проводился анализ моделей каналов стабилизации, построенных по передаточным функциям.

Для анализа канала стабилизации нескорректированной системы по каналу платформы, составим структурную схему канала стабилизации нескорректированной системы в программном комплексе Simulink.

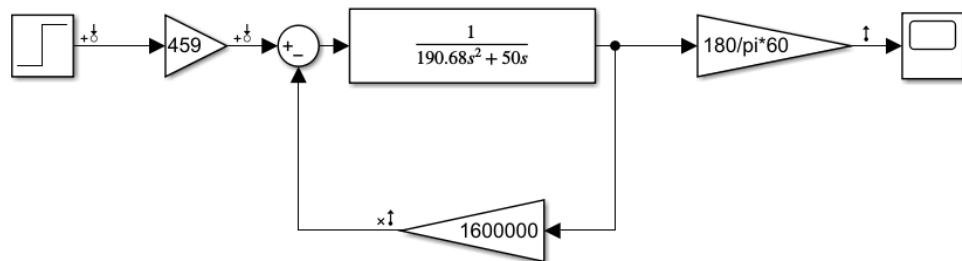


Рис. 24 Структурная схема нескорректированной системы канала стабилизации.

График переходного процесса по каналу платформы:

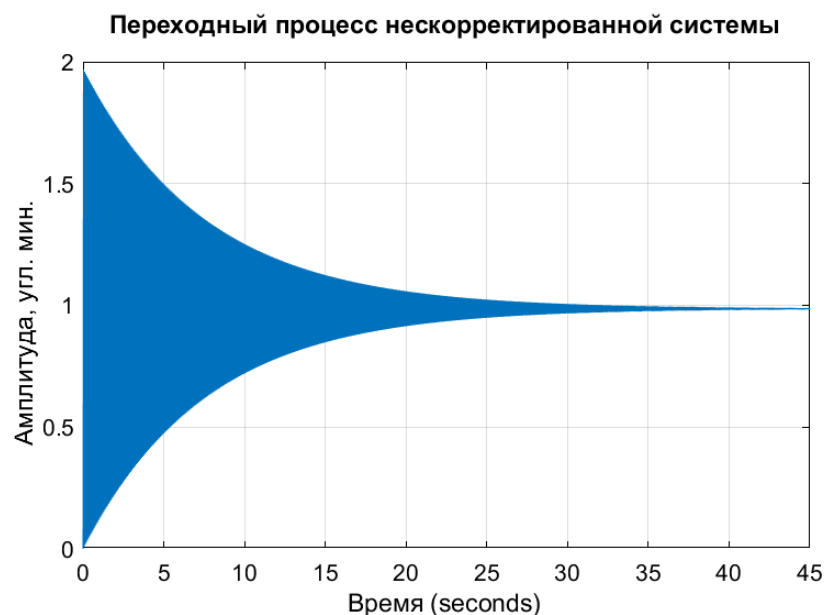


Рис. 25 Переходный процесс нескорректированной системы.

По графику видно, что характер и время переходного процесса являются неудовлетворительными.

Построим структурную схему канала стабилизации нескорректированной системы в программном комплексе Simulink:

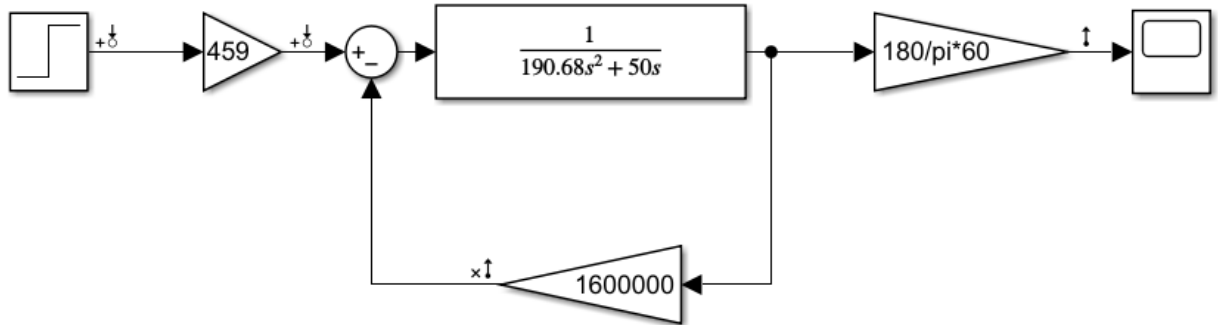


Рис. 26 Структурная схема канала стабилизации нескорректированной системы.

По полученной передаточной функции разомкнутой системы $W(s)$ построим логарифмическую амплитудно-частотную характеристику $A(\omega)$ и фазовую частотную характеристику ФЧХ $\varphi(\omega)$.

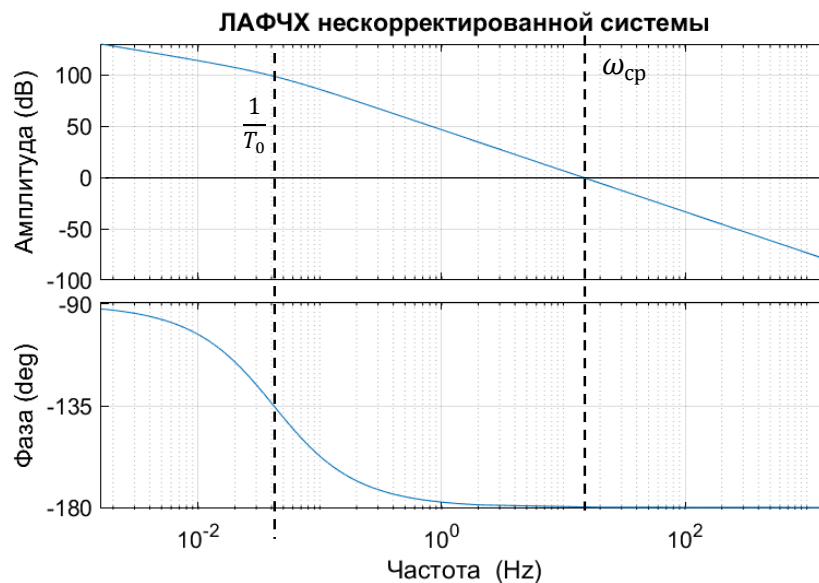


Рис. 27 ЛАФЧХ нескорректированной системы по оси платформы.

Частота среза нескорректированной системы: $\omega_{cp} = 312$ Гц

Т.к. ЛФЧХ не пересекает $-\pi$, а лишь асимптотически приближается к ней, поэтому $\Delta\varphi \approx 0$, а $\Delta L = \infty$ (запас по амплитуде на частоте, при которой $\Delta\varphi = -\pi$, т.е. ЛФЧХ должна пересекать $-\pi$), что говорит о том, что система находится на границе устойчивости. Для увеличения запаса устойчивости по

фазе необходимо использовать интегро-дифференциальное корректирующее звено. Передаточная функция корректирующего звена имеет вид:

$$W_p(s) = \frac{T_1 \cdot s + 1}{T_2 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{T_3 \cdot s + 1}$$

Выбор постоянных времени $T_1 - T_3$:

- T_1, T_2 ($T_2 < T_1$) выбираются таким образом, что $1/T_1$ подбирается до $\omega_{\text{ср}}$ так как поднимает фазу за частотами, которые превышают частоту среза этого звена, а $1/T_2$ после $\omega_{\text{ср}}$, чтобы опустить фазу, так как после дифференцирующего звена все остальные частоты будут усиливаться, включая шумы и помехи, что допускать нельзя.

Подбираем постоянные времени, исходя из условия: $\frac{1}{T_1} < \frac{1}{T_{\text{ср}}} < \frac{1}{T_2}$,

где $T_{\text{ср}} = 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_{\text{ср}}}$.

Пусть

$T_1 = 0,01827$ [с], $T_2 = 0.00226$ [с], $T_3 = 0.0001595$ [с]

Составим структурную схему канала стабилизации скорректированной системы в программном комплексе Simulink:

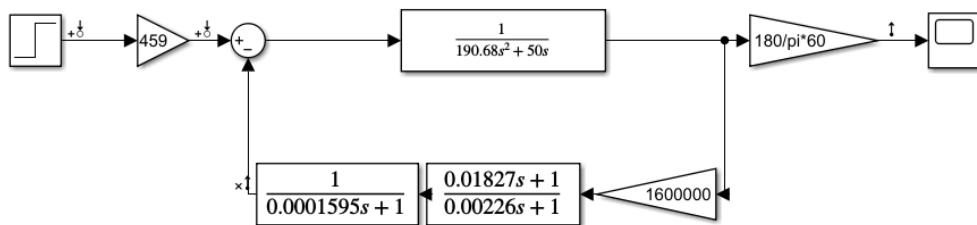


Рис. 28 Структурная схема скорректированной системы по оси платформы.

Вид передаточной функции разомкнутой системы с учетом коррекции:

$$W(s) = \frac{1600000}{190.68 \cdot s^2 + 50 \cdot s} \cdot \frac{0,01827 s + 1}{0.00226 s + 1} \cdot \frac{1}{0.0001595 s + 1}$$

По полученной передаточной функции построим логарифмические амплитудную и фазовую частотные характеристики:

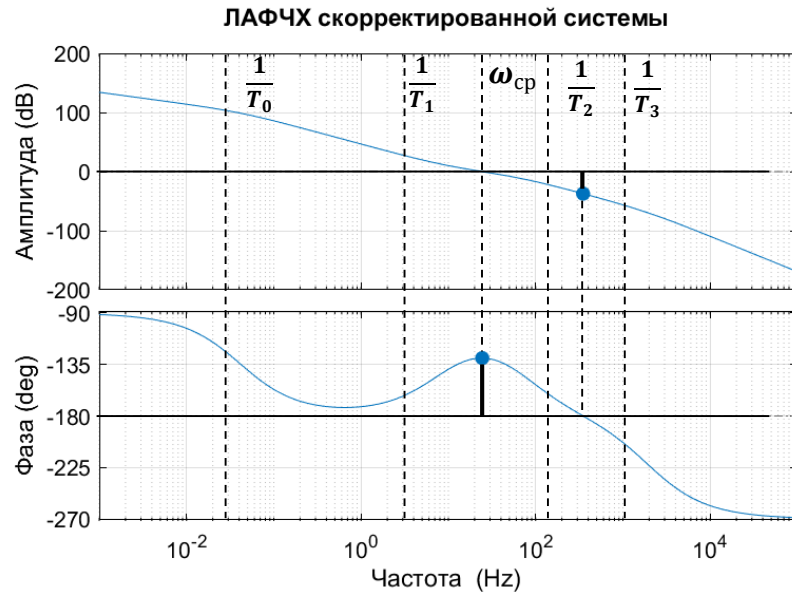


Рис.29 ЛАФЧХ скорректированной системы по оси платформы.

Частота среза скорректированной системы: $\omega_{cp} = 24.5$ Гц

Запасы устойчивости на частоте среза по амплитуде и фазе, соответственно:

$$\Delta L_{min} = 37.3 \text{ дБ}, \quad \Delta\varphi = 50.6^\circ$$

Исходя из этого, можно сделать вывод, что система устойчива и удовлетворяет заложенным требованиям, представленным в техническом задании ($\Delta L_{min} > 35$ дБ, $\Delta\varphi > 45^\circ$).

График переходного процесса скорректированной замкнутой системы:

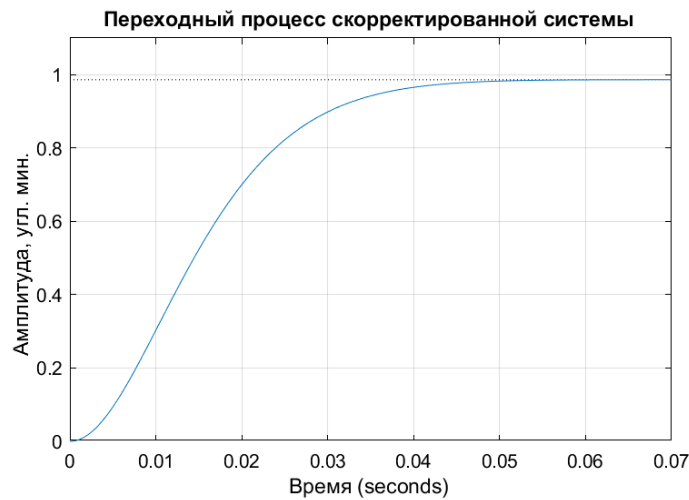


Рис. 30 Переходный процесс скорректированной системы.

Переходный процесс можно признать удовлетворительным.

Расчет канала стабилизации по оси рамы.

Структурная схема:

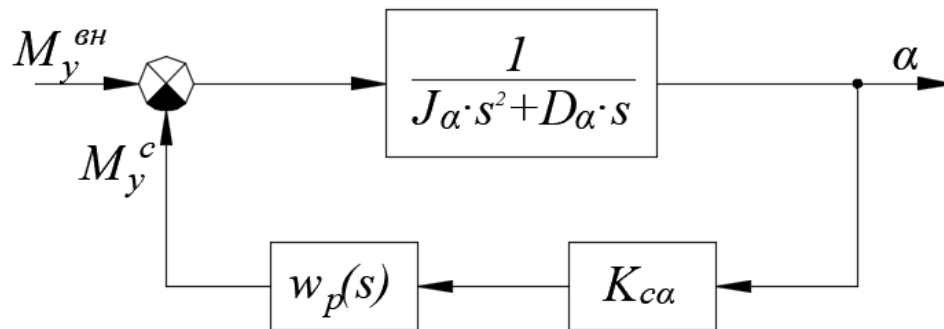


Рис.31 Структурная схема канала стабилизации по оси платформы

Передаточная функция разомкнутой нескорректированной системы:

$$W(s) = \frac{K_{с\alpha}}{J_{\alpha} \cdot s^2 + D_{\alpha} \cdot s} = \frac{K_{с\alpha}}{D_{\alpha} \cdot s(T_{\alpha} \cdot s + 1)}$$

где J_{α} – суммарный момент инерции рамы и платформы с установленными на ней элементами относительно оси OY .

$$J_{\alpha} = 676.23 \text{ сНсм}^2$$

D_{α} – коэффициент демпфирования по оси OY : $D_{\alpha} = 50 \left[\frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\text{рад/с}} \right]$

Коэффициент обратной связи выберем из условия обеспечения заданной статической погрешности стабилизации,

$$K_{с\alpha} = \frac{M_{\text{ур}}^{\text{вн}}}{\alpha_{\text{ст}}} = \frac{736,35}{0,0002909} = 2\,550\,000 \left[\frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\text{рад}} \right]$$

Постоянная времени рамы:

$$T_{\alpha} = \frac{J_{\alpha}}{D_{\alpha}} = \frac{676.23}{50} = 13,52 \text{ [с]}$$

Тогда, передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W(s) = \frac{2\,550\,000}{676.23 \cdot s^2 + 50 \cdot s} = \frac{51000}{s(13,52 \cdot s + 1)}$$

Для анализа канала стабилизации нескорректированной системы по каналу рамы, составим структурную схему канала стабилизации нескорректированной системы в программном комплексе Simulink.

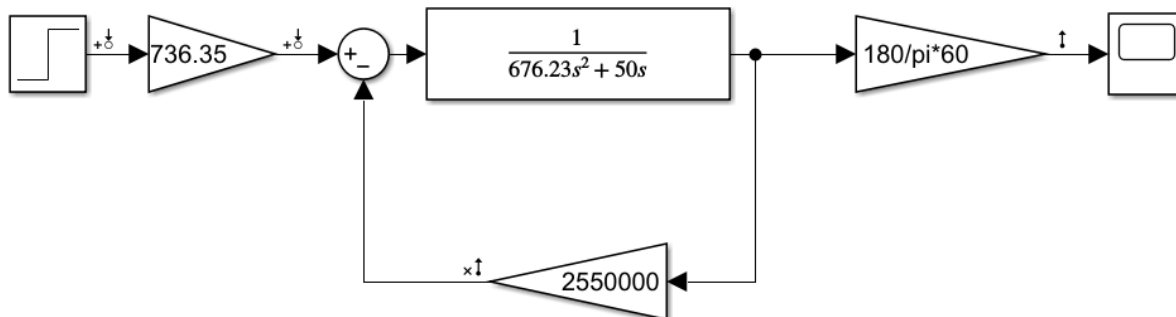


Рис. 32 Структурная схема нескорректированной системы по оси рамы.
График переходного процесса по каналу рамы:

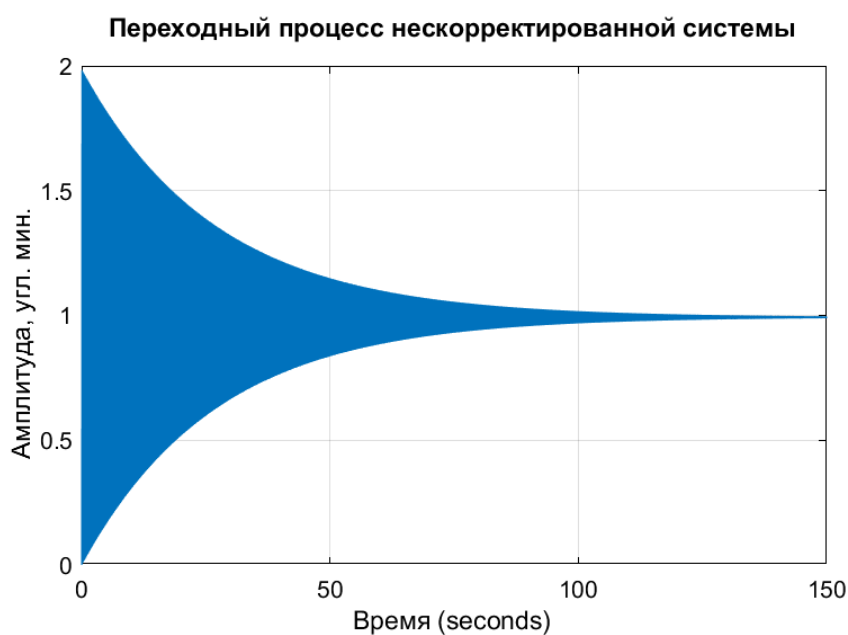


Рис. 33 Переходный процесс нескорректированной системы по оси платформы.

По графику видно, что время переходного процесса является неудовлетворительно большим.

По полученной передаточной функции разомкнутой системы $W(s)$ построим логарифмическую амплитудно-частотную характеристику $A(\omega)$ и фазовую частотную характеристику ФЧХ $\Phi(\omega)$.

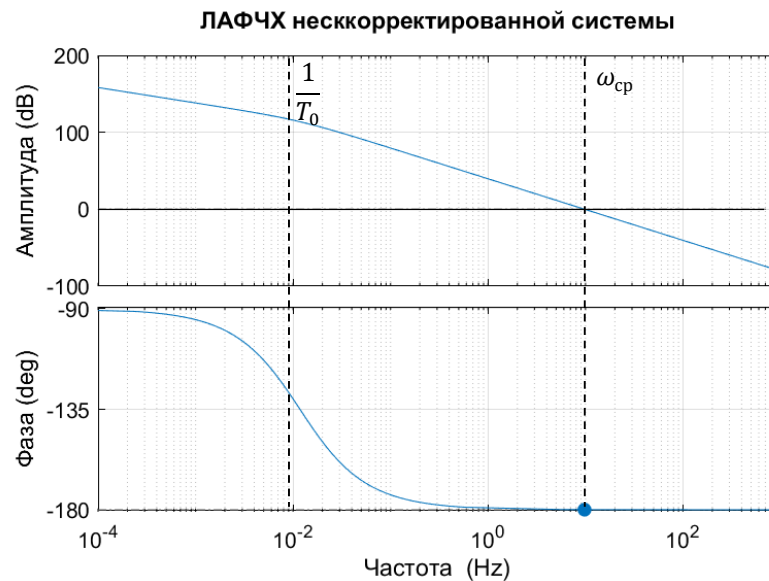


Рис.34 ЛАФЧХ нескорректированной системы по оси рамы.

Частота среза нескорректированной системы: $\omega_{cp} = 9.8$ Гц

Т.к. ЛФЧХ не пересекает $-\pi$, а лишь асимптотически приближается к ней, поэтому $\Delta\varphi \approx 0$, а $\Delta L = \infty$ (запас по амплитуде на частоте, при которой $\Delta\varphi = -\pi$, т.е. ЛФЧХ должна пересекать $-\pi$), что говорит о том, что система находится на границе устойчивости. Для обеспечения устойчивости вводится корректирующее звено:

$$W_p(s) = \frac{T_1 \cdot s + 1}{T_2 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{T_3 \cdot s + 1}$$

Расчет постоянных времени производится по тем же требованиям. Получим следующие значения постоянных времени, удовлетворяющих условиям технического задания:

Подбираем постоянные времени, исходя из условия: $\frac{1}{T_1} < \frac{1}{T_{cp}} < \frac{1}{T_2}$,

где $T_{cp} = 2 * \frac{\pi}{\omega_{cp}}$.

Пусть

$$T_1 = 0.0306 \text{ [с]}, T_2 = 0.00276 \text{ [с]}, T_3 = 0.0001595 \text{ [с]}$$

Составим структурную схему канала стабилизации скорректированной системы в программном комплексе Simulink:

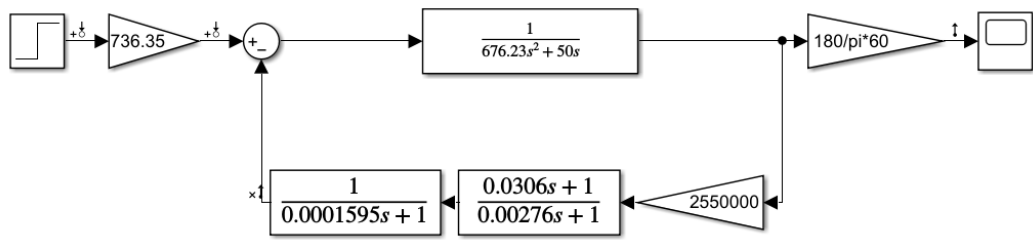


Рис. 35 Структурная схема скорректированной системы по оси рамы.

Вид передаточной функции разомкнутой системы с учетом коррекции:

$$W(s) = \frac{2\,555\,000}{676,23 \cdot s^2 + 50 \cdot s} \cdot \frac{0,0306 s + 1}{0,00276s + 1} \cdot \frac{1}{0,0001595s + 1}$$

По полученной передаточной функции построим логарифмические амплитудную и фазовую частотные характеристики:

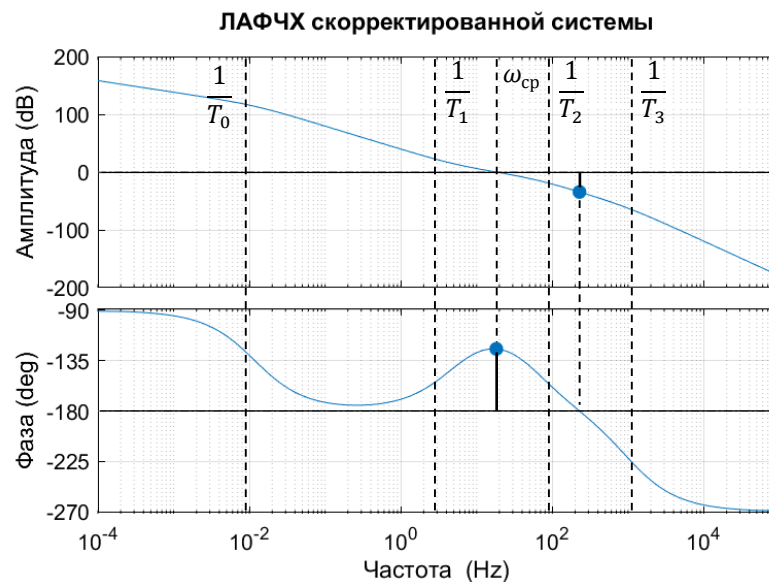


Рис. 36 ЛАФЧХ скорректированной системы по оси рамы.

Частота среза скорректированной системы: $\omega_{cp} = 18.2$ Гц

Запасы устойчивости по амплитуде и фазе, соответственно:

$$\Delta L_{min} = 35.3 \text{ дБ}, \quad \Delta \varphi = 55.5^\circ$$

Исходя из этого, можно сделать вывод, что система устойчива и удовлетворяет заложенным требованиям, представленным в техническом задании ($\Delta L_{min} > 35 \text{ дБ}, \Delta \varphi > 45^\circ$).

График переходного процесса скорректированной замкнутой системы:

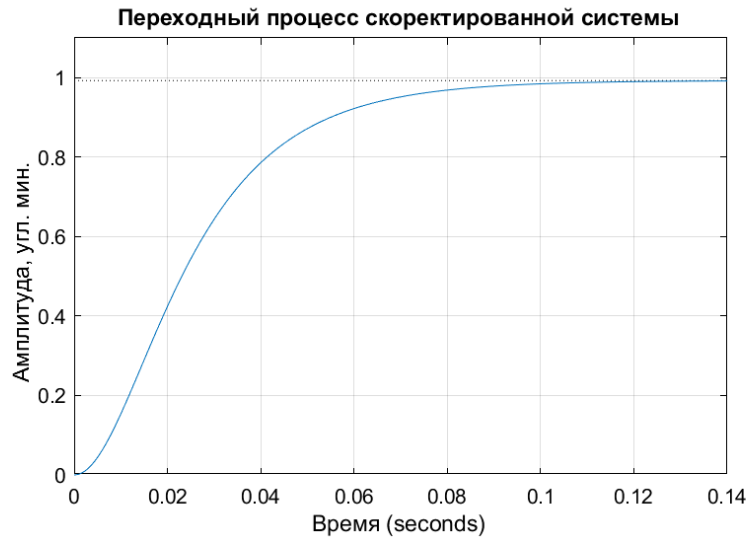


Рис.37 Переходный процесс скорректированной системы по оси рамы.

Переходный процесс можно признать удовлетворительным.

Проверочный расчет на точность

Проверим, удовлетворяет ли статическая ошибка стабилизации заданному техническим заданием значению $1'$. Для этого вычислим статическую ошибку стабилизации от суммарного возмущающего момента, действующего на ГС по каждой из осей. Тем самым, получим максимально возможную ошибку стабилизации в случае, когда все моменты примут свои максимальные значения.

Ось платформы:

Статическая ошибка при действии максимального момента трения:

$$\beta_{\text{ст}} = \frac{M_x^{\Sigma}}{K_{c\beta}} = \frac{459.65}{1600000} = 0.0002873 \text{ рад} = 0.988';$$

Ось наружной рамы:

Статическая ошибка при действии максимального момента трения:

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{M_{yp}^{\Sigma}}{K_{c\alpha}} = \frac{736,35}{2550000} = 0.0002888 \text{ рад} = 0,993';$$

Вывод: полученные значения статической ошибки удовлетворяет условию ТЗ по точности.

Коэффициент подавления колебаний

По условию ТЗ коэффициент подавления колебаний на частоте 1 Гц не менее 50 дБ. В САПР MATLAB смоделируем следующие системы:

канал х:

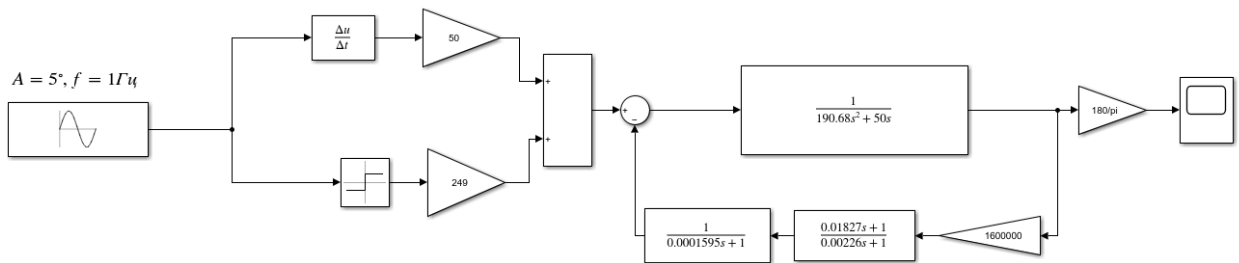


Рис. 38 Структурная схема исследования коэффициента подавления колебаний по оси х.

канал у:

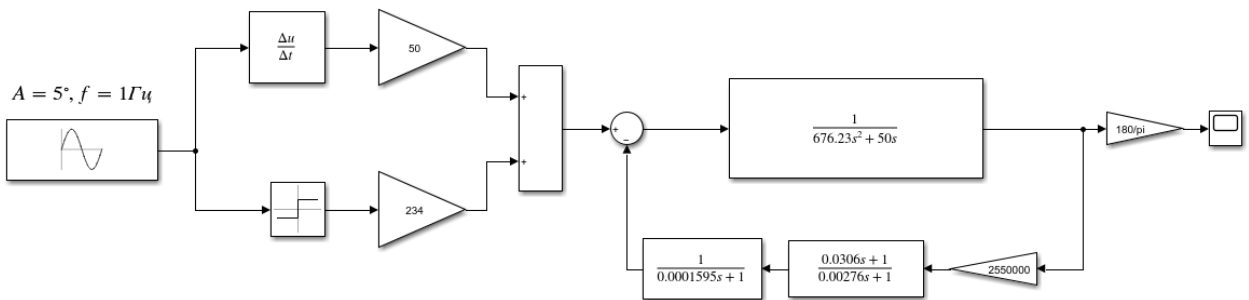


Рис. 39 Структурная схема исследования коэффициента подавления колебаний по оси у.

Внешний возмущающий момент здесь представлен демпфирующим моментом и моментом трения ш/п опор.

Гиростабилизатор с корректирующими звеньями находится в правой части системы. На вход подается гармонический сигнал

$$\gamma_{\text{осн}} = \gamma_m \sin(2\pi f t),$$

где $\gamma_m = 5^\circ$ - амплитуда угловых колебаний носителя,

$f = 1$ Гц - частота колебаний носителя.

На выходе будет сигнал $\beta_{\text{пл}}$ - угол, который будет у платформы после обработки входного воздействия каналом стабилизации.

Канал х:

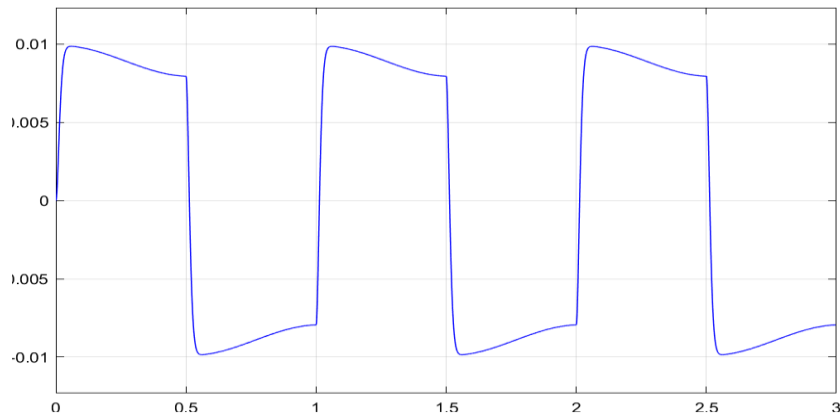


Рис. 40 Угол отклонения платформы после обработки входного воздействия каналом стабилизации.

На выходе системы получаем $\beta_{max} = 9,85 \cdot 10^{-3}^\circ$.

Канал у:

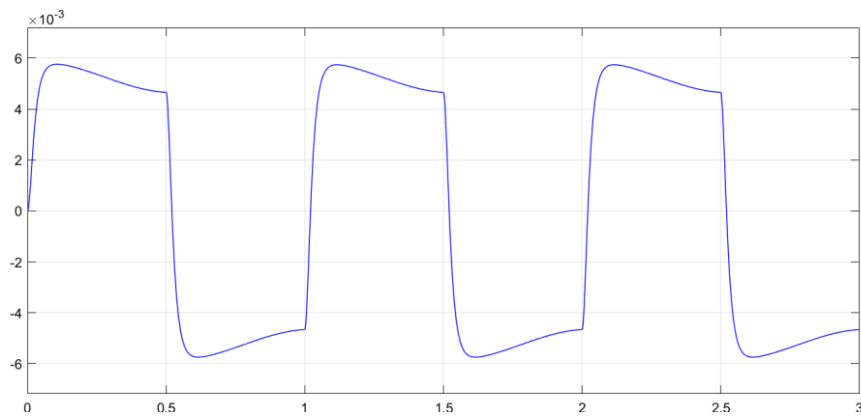


Рис. 41 Угол отклонения рамы после обработки входного воздействия каналом стабилизации.

На выходе системы получаем $\alpha_{max} = 5,76 \cdot 10^{-3}^\circ$.

Коэффициент подавления колебаний - отношение амплитуды колебания основания к амплитуде колебаний объекта стабилизации:

Коэффициент подавления колебаний по оси платформы:

$$K_{x_{\text{под}}} = 20 \lg \frac{\beta_{\text{осн}}(s)}{\beta_{\text{пл}}(s)} > 50 \text{ дБ}$$

$$K_{x_{\text{под}}} = 20 \lg \frac{\beta_{\text{осн}}(s)}{\beta_{\text{пл}}(s)} = 20 \lg \frac{5^\circ}{9,85 \cdot 10^{-3}^\circ} = 54,1 \text{ дБ} > 50 \text{ дБ}$$

Коэффициент подавления колебаний по оси рамы:

$$K_{y_{\text{под}}} = 20 \lg \frac{\alpha_{\text{осн}}(s)}{\alpha_{\text{пл}}(s)} > 50 \text{ дБ}$$

$$K_{y_{\text{под}}} = 20 \lg \frac{\alpha_{\text{осн}}(s)}{\alpha_{\text{пл}}(s)} = 20 \lg \frac{5^\circ}{5,76 \cdot 10^{-3}^\circ} = 58,77 \text{ дБ} > 50 \text{ дБ}$$

Описание схемы электрической принципиальной

На платформе гиросtabilизатора установлены:

1) Чувствительный элемент МГТУ-05 (А1). В состав гироблока входят:

- гиromотор ГМА-0,5ПТ (М1). К гиromотору подводится трехфазное питание 36 В, 1000 Гц в форсажном режиме и в установившемся режиме 22 В, 1000 Гц. Гиromотор запитывается через гермовводы 1, 2, 3, соответствующие фазам “а”, “b”, “с”.
- два магнитоэлектрических датчика момента (М2, М3). Катушки датчиков моментов запитываются током управления через гермовводы 4, 5 и 6, 7 соответственно.
- два индукционных двухкоординатных датчика угла (В1, В2). Работают при питании однофазным током напряжением 10 В частотой 1000 Гц. Обмотки возбуждения датчиков угла запитываются через гермовводы 8,9.

Съем сигналов, пропорциональных угловым отклонениям гироскопа, производится с гермовводов 10..15, причем, с гермовводов 10 и 12 снимается сигнал, пропорциональный угловому отклонению внутренней рамки, а с гермовводов 13 и 15 – сигнал, пропорциональный угловому отклонению наружной рамки. На гермовводы 11 и 14 выводятся точки соединения сигнальных обмоток датчиков. Управление главной оси гироскопа в пространстве осуществляется с помощью следующим образом: управление по каналу х осуществляется через гермовводы 4 и 5, а по каналу у – через гермовводы 6 и 7. В состав чувствительного элемента гироскопа входят резисторы R1, R2, R3, R4. Они служат для регулирования положения нуля ДУ.

2) Блок А5 предварительного усилителя БПУ предназначен для предварительного усиления сигналов, поступающих с датчиков угла гироскопа В1 и В2. БПУ выполнен на основе операционного усилителя. Питание ± 15 В.

На осях платформы и рамы установлены синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы СКТ-260-1 (В3, В4) и датчики момента

постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (М1, М2). Роторы В3 и М1 соединены с платформой, а статоры с рамой. Роторы В4 и М2 соединены с рамой, статоры с корпусом. В3 и В4 запитаны через провода 9,10 и 29,30, $U=36В$, $f=400Гц$. Сигналы с В3 и В4 идут на разъём, они несут информацию об углах рассогласования платформы/рамы/корпуса прибора. На М1 и М2 поступает ток управления с усилителей мощности А12, А13 через провода 15, 16, 40, 41.

Так как углы про качки платформы и рамы $\pm 50^\circ$, в гиросtabilизаторе применены упругие токоподводы (ХА1..ХА3).

На корпусе гиросtabilизатора по каналам стабилизации установлены:

1) Фазочувствительные выпрямители (ФЧВ) сигналов датчиков угла гироскопа (А7, А8), выполняют преобразование сигнала напряжения переменного тока с выхода блока предварительного усилителя БПУ в сигнал напряжения постоянного тока с учетом фазы опорного сигнала). Напряжение питания: $\pm 15 В$.

2) Корректирующие устройства (А10, А11) по осям Х и У стабилизатора (с помощью них проводится требуемая коррекция амплитудно-частотной характеристики каналов стабилизации для получения желаемого качества работы гиросtabilизатора). Напряжение питания: $\pm 15 В$.

3) Усилители мощности (А12, А13) по оси Х и У стабилизатора (используются для конечного усиления сигнала, что позволяет подключать к выходу усилителя двигатели или датчики момента разгрузки, работающие при токах более 20 мА). Имеют питающее напряжение $\pm 27 В$. Питают двигатели стабилизации ДМ-20 (М1, М2).

4) Всё необходимое питание для элементов схемы генерируется в блоке питания (А9), работающем от бортовой сети постоянного тока 27В.

В электрической схеме реализуется два режима работы:

1. Режим стабилизации.

Рассмотрим режим стабилизации по каналу Х:

Сигнал с ДУ гироскопа В1 в виде напряжения подается на вход блок

предварительного усиления А5, где происходит усиление сигнала. Проходя через упругие токоподводы ХА2, ХА3 сигнал поступает на вход ФЧВ А7. В ФЧВ сигнал напряжения переменного тока преобразуется в сигнал напряжения постоянного тока. С выхода ФЧВ преобразованный сигнал поступает на вход КУ А10, где преобразуется в соответствии с законами управления (реализуется требуемая ПФ корректирующих звеньев для обеспечения устойчивости канала). С выхода усилителя сигнал поступает на вход усилителя мощности А12, в котором происходит его конечное усиление. С выхода усилителя мощности сигнал через упругие токоподводы поступает на двигатель стабилизации по оси Х М1.

Рассмотрим стабилизацию по оси Y:

Сигнал с ДУ гироскопа В2 в виде напряжения подается на вход блок предварительного усиления А5, где происходит усиление сигнала. Проходя через упругий токоподвод ХА3, сигнал поступает на вход ФЧВ А8. В ФЧВ сигнал напряжения переменного тока преобразуется в сигнал напряжения постоянного тока. С выхода ФЧВ преобразованный сигнал поступает на вход КУ А11, где преобразуется в соответствии с законами управления (реализуется требуемая ПФ корректирующих звеньев для обеспечения устойчивости канала). С выхода усилителя сигнал поступает на вход усилителя мощности А13, в котором происходит его конечное усиление. С выхода усилителя мощности сигнал поступает на двигатель стабилизации по оси Y М2.

2. Режим управления.

Сигнал управления через соединитель ХР1 и упругие токоподводы (ХА1 и ХА3) приходит на датчик момента М2 или М3 гироскопа (через провода 4 и 5 – на М2 по оси Х, через провода 6 и 7 – на М3 по оси Y). Далее работа схемы происходит аналогично её работе в режиме стабилизации.

Расчёт электрической схемы

Реализовать необходимые для коррекции звенья можно на пассивных и на активных элементах. Схемы на пассивных элементах не удовлетворяют требованиям точности. Поэтому реализовывать корректирующие звенья будем на операционных усилителях по следующей схеме:

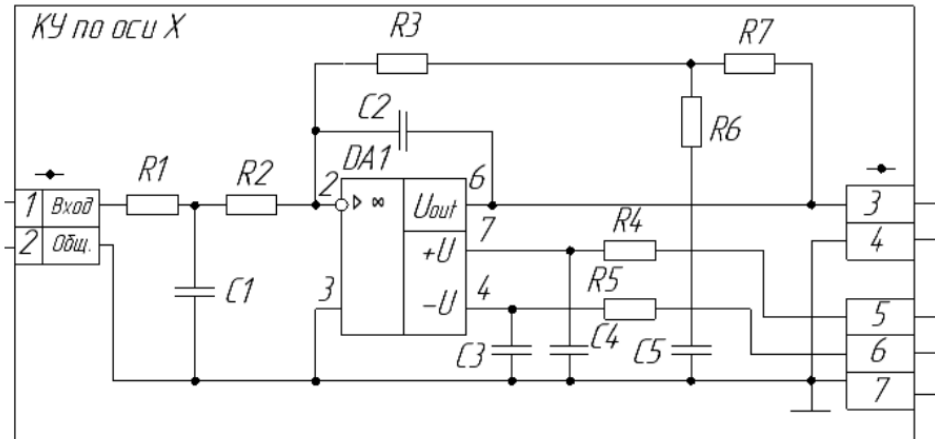


Рисунок 42. Электрическая схема корректирующего усилителя

Рассчитаем номинальные значения элементов.

На входе выражение для сопротивления короткого замыкания $Z_{\text{вх}}(s)$ имеет вид:

$$z_{\text{вх}}(s) = (R_1 + R_2) * \left(1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} * C_1 s \right) = (R_1 + R_2) * (1 + T_3 s)$$

$$T_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} * C_1$$

На выходе (без учёта конденсатора C_2) выражение для сопротивления короткого замыкания $z_{\text{вых}}(s)$ имеет вид:

$$z_{\text{вых}}(s) = (R_3 + R_7) * \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}, \text{ где } T_2 = R_6 C_5 \text{ и } T_1 = \left(R_6 + \frac{R_3 R_7}{R_3 + R_7} \right) * C_5$$

Передаточная функция корректирующего звена:

$$W_p(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = - \frac{z_{\text{вых}}(s)}{z_{\text{вх}}(s)} = -K * \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} * \frac{1}{1 + T_3 s}, \text{ где } K = \frac{R_3 + R_7}{R_1 + R_2}$$

Для упрощения расчёта можно принять $R_1 = R_2, R_3 = R_7$.

Канал стабилизации по оси платформы

Требуемые постоянные времени корректирующего звена:

$$T_1 = \left(R_6 + \frac{R_3 R_7}{R_3 + R_7} \right) C_5 = 0,01827 \text{ с}; T_2 = R_6 C_5 = 0.00226 \text{ с};$$

$$T_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} * C_1 = 0.0001595 \text{ с}.$$

Конденсаторы будем выбирать по стандарту E24. Резисторы будем выбирать по стандарту E48. Отсюда по выражениям, приведенным выше, определим следующие значения:

$$\text{Пусть } C_1 = 0.16 \text{ мкФ}, R_1 = R_2 = 1,96 \text{ кОм} \rightarrow T_3 = 0.000157 \text{ с};$$

$$\text{Пусть } C_5 = 33 \text{ нФ}, R_6 = 68.1 \text{ кОм} \rightarrow T_2 = 0.00225 \text{ с};$$

$$\text{Пусть } C_5 = 33 \text{ нФ}, R_6 = 68.1 \text{ кОм}, R_3 = R_7 = 1 \text{ МОм} \rightarrow T_1 = 0.01874 \text{ с};$$

$$K_x = \frac{R_3 + R_7}{R_1 + R_2} = 160.204 \frac{\text{Н} * \text{м}}{\text{рад}} = 1602040 \frac{\text{сН} * \text{см}}{\text{рад}}$$

Канал стабилизации по оси рамы

Требуемые постоянные времени корректирующего звена:

$$T_1 = \left(R_6 + \frac{R_3 R_7}{R_3 + R_7} \right) C_5 = 0.0306 \text{ с}; T_2 = R_6 C_5 = 0.00276 \text{ с};$$

$$T_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} * C_1 = 0.0001595 \text{ с}.$$

Конденсаторы будем выбирать по стандарту E24. Резисторы будем выбирать по стандарту E48. Отсюда по выражениям, приведенным выше, определим следующие значения:

$$\text{Пусть } C_1 = 0.16 \text{ мкФ}, R_1 = R_2 = 1,96 \text{ кОм} \rightarrow T_3 = 0.000157 \text{ с};$$

$$\text{Пусть } C_5 = 33 \text{ нФ}, R_6 = 82.5 \text{ кОм} \rightarrow T_2 = 0.00272 \text{ с};$$

$$\text{Пусть } C_5 = 33 \text{ нФ}, R_6 = 82.5 \text{ кОм}, R_3 = R_7 = 1.69 \text{ МОм} \rightarrow T_1 = 0.0306 \text{ с};$$

$$K_y = \frac{R_3 + R_7}{R_1 + R_2} = 255.245 \frac{\text{Н} * \text{м}}{\text{рад}} = 2552450 \frac{\text{сН} * \text{см}}{\text{рад}}$$

Технологическая часть

В технологической части отражена схема последовательной сборки внутренней рамы двухосного индикаторного гиросtabilизатора

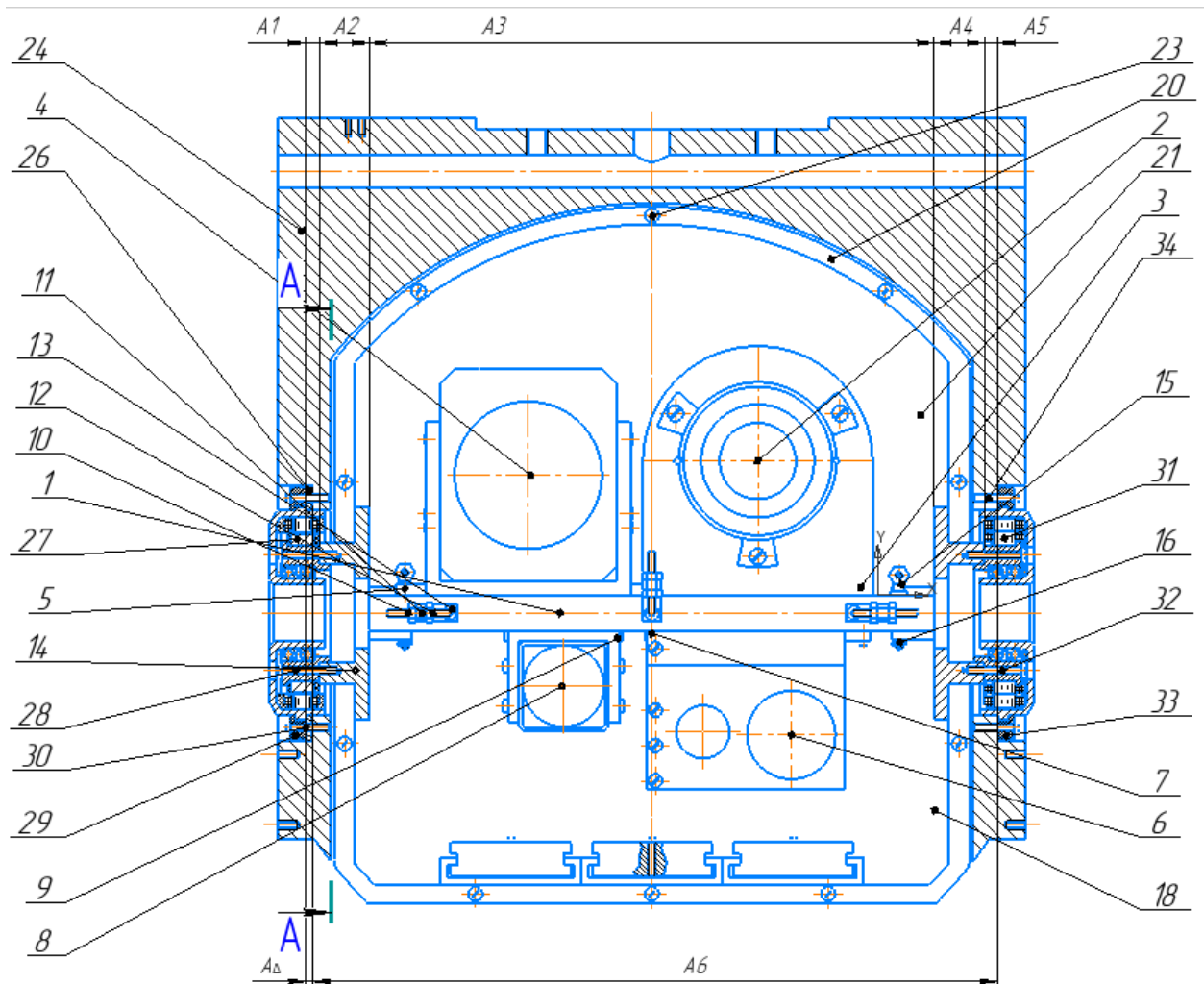


Рис.43. Технологическая сборка.

Расчет размерной цепи

Размерная цепь – совокупность взаимосвязанных размеров, образующих замкнутый контур.

Размерная цепь состоит из составляющих и замыкающих размеров. Замыкающий размер – это размер, полученный последним при сборке сборочной размерной цепи или обработке детализовочной размерной цепи. Составляющий размер – это все остальные размеры в размерной цепи.

Составляющие размеры бывают:

1. Увеличивающими – размеры, при увеличении которых замыкающий размер увеличивается.

2. Уменьшающими – размеры, при увеличении которых замыкающий размер уменьшается.

Рассчитаем размерную цепь по внутренней оси X . Для этого воспользуемся методом максимума-минимума. В данном методе учитываются только предельные отклонения составляющих звеньев. Достоинства данного метода:

1. Сборка осуществляется без какой-либо подгонки, регулирования и подбора.
2. При любом сочетании деталей, изготовленных в пределах расчетных допусков, значение замыкающего размера не выходит за установленные пределы.
3. Полная взаимозаменяемость.

Недостаток: допуски соответствующих звеньев, получаются меньше, чем при расчете другими методами. Это увеличивает точность, но не экономично в серийном и крупносерийном производстве.

Расчет проведем по 7 качеству. Размеры и предельные отклонения звеньев приведены в таблице:

<i>Звено</i>	<i>Тип звена</i>	<i>Значение при симметричном допуске</i>	<i>Допуск</i>
<i>A1</i>	<i>Увеличивающий</i>	<i>3.8 ± 0.006</i>	<i>0.012</i>
<i>A2</i>	<i>Увеличивающий</i>	<i>14.2 ± 0.009</i>	<i>0.018</i>
<i>A3</i>	<i>Увеличивающий</i>	<i>160 ± 0.0125</i>	<i>0.025</i>
<i>A4</i>	<i>Увеличивающий</i>	<i>14.2 ± 0.009</i>	<i>0.018</i>
<i>A5</i>	<i>Увеличивающий</i>	<i>3.8 ± 0.006</i>	<i>0.012</i>
<i>A6</i>	<i>Уменьшающий</i>	<i>194 ± 0.0145</i>	<i>0.029</i>
<i>AΔ</i>		<i>2 ± 0.057</i>	<i>0.114</i>

Определим значение замыкающего размера:

$$A_{\Delta} = \sum A_{ув} - \sum A_{ум} = 3.8 + 14.2 + 160 + 14.2 + 3.8 - 194 = 2 \text{ мм},$$

где $\sum A_{ув}$ - сумма средних, номинальных значений увеличивающих звеньев;

$\sum A_{ум}$ - сумма средних, номинальных значений уменьшающих звеньев.

Верхнее отклонение EsA_{Δ} номинального значения замыкающего звена определяется как:

$$EsA_{\Delta} = \sum EsA_{ув} - \sum EiA_{ум} = 0.006 + 0.009 + 0.0125 + 0.009 + 0.006 - (-0.0145) = 0.057 \text{ мм}$$

где $\sum EsA_{ув}$ – сумма верхних отклонений увеличивающих звеньев,
 $\sum EiA_{ум}$ – сумма нижних отклонений уменьшающих звеньев.

Нижнее отклонение EiA_{Δ} номинального значения замыкающего звена определяется как:

$$\begin{aligned} EiA_{\Delta} &= \sum EiA_{ув} - \sum EsA_{ум} \\ &= 0.006 - 0.009 - 0.0125 - 0.009 - 0.006 - (0.0145) = -0.057 \text{ мм} \end{aligned}$$

где $\sum EiA_{ув}$ – сумма нижних отклонений увеличивающих звеньев,
 $\sum EsA_{ум}$ – сумма верхних отклонений уменьшающих звеньев.

Тогда размер замыкающего звена будет равен: $A_{\Delta} = 2_{-0.057}^{+0.057} \text{ мм}$.

Сделаем проверку: допуск замыкающего звена должен быть равен сумме всех допусков составляющих размеров.

Допуск замыкающего звена:

$$TA_{\Delta} = EsA_{\Delta} - EiA_{\Delta} = 0.057 - (-0.057) = 0.114 \text{ мм}$$

Сумма допусков составляющих звеньев:

$$\sum TA_{\Delta} = 0.012 + 0.018 + 0.025 + 0.018 + 0.012 + 0.029 = 0.114 \text{ мм}$$

Т.к. $TA_{\Delta} = \sum TA_{\Delta}$, то можно считать, что задача решена верно.

Заключение о соответствии техническому заданию

В результате проектирования двухосного индикаторного гиросtabilизатора с применением, в качестве чувствительного элемента, гироскопа МГТУ-05, в соответствии с техническим заданием на разработку конструкции были получены следующие параметры гиросtabilизатора:

1. Рассчитаны возмущающие моменты:
по оси платформы: 459 сНсм;
по оси рамы: 736.35 сНсм;
2. Проведены расчеты устойчивости каналов стабилизации, обеспечены запасы устойчивости в каналах стабилизации по амплитуде и фазе:
канал стабилизации по оси платформы: 37,3 дБ, 50,6°;
канал стабилизации по оси рамы: 35,3 дБ, 55,5°;
3. Обеспечены статические ошибки стабилизации канал стабилизации по оси платформы: 0,988'; канал стабилизации по оси рамы 0,993';
4. Обеспечен коэффициент подавления колебаний на частоте $f = 1$ Гц
канал стабилизации по оси платформы: 58,7 дБ
канал стабилизации по оси рамы: 54,1 дБ.

Спроектированный гиросtabilизатор удовлетворяет требованиям технического задания по кинематическим и динамическим показателям и обеспечивает устойчивую работу в условиях эксплуатации указанных в техническом задании (угловые скорости и ускорения подвижного объекта, перегрузки).

Использованная литература

1. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Теория гироскопов и гироста-билизаторов: Учеб. для вузов по спец. «Гироскоп. приборы и устрой- ства». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 423 с.: ил.
2. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. II. Гироскопические стабилизаторы. Под ред. Д.С. Пельпора. Учеб. пособие для вузов. М.: «Высшая школа», 1977.
3. Разработка электрической схемы гироскопического стабилизатора: ме- тодические указания к курсовому проектированию. Т. Н. Лаптева, А. В.Полынков. — Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
4. Детали и узлы гироскопических приборов. Атлас конструкций. Г.А. Сломьянский, 1975.
5. Лекции по курсу «Теория гироскопов и гиростабилизаторов» А.В. Кулешова.