



Министерство науки и высшего образования 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 _____ ИУ _____

КАФЕДРА _____ ИУ-2 _____

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ НА ТЕМУ:

Двухосный индикаторный гиростабилизатор
телекамеры для разведывательного БПЛА

Студент ИУ2-71

(Группа)

_____ Литвинов А.Д.

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Руководитель курсового проекта

_____ Фатеев В.В.

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Консультант

_____ Фатеев В.В.

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

2022 г.

Оглавление

Введение	4
Классификация гиросtabilизаторов	4
Назначение прибора.....	6
Принцип работы.....	6
Вводимые обозначения	7
Описание конструкции ГС, ЧЭ, узлов	7
Описание конструкции ГС.....	7
Узел ДМ	7
Узел ДУ	8
Описание чувствительного элемента – ВГ091	8
Предварительный расчет инерционных характеристик ГС	12
Расчет вредных моментов	14
1. Моменты трения.....	14
2. Моменты тяжения токоподводов.....	18
3. Моменты при ускоренном движении ЛА при наличии смещения центра масс.....	21
4. Моменты, обусловленные неравножесткостью конструкции карданова подвеса.	22
5. Инерционные моменты рам карданова подвеса.....	23
6. Момент управления	25
Расчет суммарного возмущающего момента и выбор двигателя стабилизации	25
Момент обкатки	26
Момент сухого трения	27
Суммарный возмущающий момент.....	27

Введение

Гироскопическими стабилизаторами (ГС) называются гироскопические устройства, предназначенные для стабилизации приборов и устройств в инерциальном пространстве и управления их угловым положением. На гироскопические приборы и системы возлагаются сложные задачи по стабилизации и управлению специальными бортовыми приборами (приборы инерциальной навигации, антенны бортовых радиолокационных станций, чувствительные элементы пеленгаторов, координаторы цели, аэрофотоаппараты и др.).

Известно, что ось гироскопа в кардановом подвесе, установленного на борту летательного аппарата, в течение длительного времени сохраняет почти неизменное направление в пространстве. Однако несовершенство элементов конструкции и тяжелые условия эксплуатации порождают значительные моменты внешних сил, действующие на гироскоп и отклоняющие ось вращения его ротора, а следовательно и стабилизируемую ось от заданного направления в пространстве.

Требования высокой точности стабилизации приборов бортовых систем привели к необходимости создания гироскопических стабилизаторов.

Классификация гиростабилизаторов

1. По типу применяемых гироскопов:

Гиростабилизаторы разделяются на ГС с двухстепенными гироскопами и ГС с трехстепенными гироскопами.

В свою очередь, ГС с двухстепенными гироскопами можно разделить по типу подвеса гироскопов: ГС с гироскопами на шарикоподшипниковом подвесе, на поплавковом, воздушном, магнитном подвесах и т.п. Гиростабилизаторы с трехстепенными гироскопами делятся на ГС с бескарданными гироскопами и ГС на базе гироскопов с кардановым подвесом.

2. По роли гироскопа в процессе стабилизации:

- 1) 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, быстро изменяющиеся, уравниваются гироскопическим моментом. Для силовых ГС требуются гироскопы с высоким кинетическим моментом.
- 2) Индикаторно-силовые ГС. В таких ГС силовая роль гироскопов снижена. Наличие у гироскопа большого кинетического момента не является обязательным.
- 3) Индикаторные ГС. Гироскопический момент практически не участвует в непосредственной компенсации возмущающих моментов, и их подавление определяется в основном приводом стабилизации, который должен выбираться из условия уравнивания всех составляющих возмущающего момента.

3. По типу чувствительного элемента:

- 1) ГС на двухосных гироскопах.
- 2) ГС на трехосных гироскопах.
- 3) ГС на датчиках угловых скоростей.
- 4) ГС на датчиках угловых ускорений.

4. По количеству осей стабилизации:

- 1) Одноосные ГС. – стабилизируют приборы и устройства только относительно одной оси.
- 2) Двухосные ГС. – стабилизируют приборы и устройства относительно двух осей (например, ГС, создающий горизонтальную площадку)
- 3) Трехосные ГС. – осуществляют стабилизацию относительно трех осей, т.е. полную стабилизацию. Такие ГС называются еще пространственными гиросtabilизаторами или гиросtabilизированными платформами.

5. По типу подвеса:

- 1) Корданов подвес

- 2) Плавающий подвес
 - 3) На космических аппаратах роль подвеса может выполнять сам аппарат
6. По типу привода:
- 1) Электромеханические.
 - 2) Пневматические.
 - 3) Гидравлические.
 - 4) Реактивные

Назначение прибора

Разрабатываемый прибор предназначается для угловой стабилизации в инерциальном пространстве положения камеры беспилотного летательного аппарата (БПЛА), управления её положением с помощью сигналов, получаемых с джойстика оператора, а также измерения углов отклонения и угловой скорости платформы. При этом должны быть обеспечены следующие параметры прибора:

установившаяся ошибка стабилизации не более 0,5 угловых минут

максимальная скорость управления – $10^\circ/\text{с}$

максимальное угловое ускорение управления – $220^\circ/\text{с}^2$

максимальный угол прокачки – 40°

Принцип работы

ГС состоит из платформы, с закрепленными на ней камерой и двумя ВОГ, которые помещены в двухосный наружный карданов подвес, а также системы стабилизации, устройства вывода информации потребителям и устройства управления положением объекта стабилизации. Принцип действия индикаторного стабилизатора на ВОГ основан на компенсации возмущающих моментов действующих на объект стабилизации (ОС) с помощью приводов стабилизации, моменты, которые они развивают компенсирует возмущающие. При повороте ОС на ,установленных на нём, ВОГ вырабатывается сигнал пропорциональный угловой скорости движения ОС. Этот сигнал после интегрирования и усиления подается на приводы

стабилизации, которые вырабатывают момент, направленный в противоположную сторону поворота ОС. Управление положением ОС в инерциальном пространстве осуществляется сигналами с джойстика оператора, которые вычитаются из сигналов с ВОГ и также подаются на привод стабилизации. Сигналы с джойстика оператора пропорциональны отклонению джойстика.

Вводимые обозначения

Датчик угла – ДУ

Датчик момента – ДМ

Волоконно-оптический гироскоп – ВОГ (ВГ)

Летательный аппарат – ЛА

Описание конструкции ГС, ЧЭ, узлов

Описание конструкции ГС

Конструкция двухосного индикаторного гиростабилизатора камеры БПЛА представляет собой закрепленную на полуосях камеру, выполняющую роль платформы, к которой крепятся чувствительные элементы. Полуоси закрепляются в шарикоподшипниковых опорах в рамке. Также на полуоси и рамку устанавливаются датчики момента для выработки момента стабилизации и датчики угла для выработки выходных сигналов об угловом положении камеры. Аналогично рама устанавливается на полуосях в шарикоподшипниковые опоры в корпусе.

Узел ДМ

Датчики момента ДМЗ, ДМ10 состоят из двух механически отдельных частей – статора и ротора. Статор представляет собой магнитопровод с установленными в нём постоянными магнитами и установленным сверху коллекторно-щеточным узлом. Статор, крепится винтами к корпусу. Также винтами крепится к статору коллекторно-щеточный узел. Ротор ДМ

представляет собой магнитопровод с обмоткой, на которую через щетки подается управляющий ток. Ротор устанавливается на полуось и поджимается гайкой.

Узел ДУ

В качестве датчиков угла выбираются синусно-косинусные трансформаторы СКТ265 бескорпусного типа, которые представляют собой две раздельные механические части – ротор и статор. Ротор поджимается гайкой к полуоси, а статор к корпусу.

Описание чувствительного элемента – ВГ091

ВГ091 является датчиком абсолютной угловой скорости. Принцип действия ВОГ основан на зависимости времени облета света замкнутого вращающегося контура от направления обхода (эффект Саньяка).

Кольцевой интерферометр конструктивно выполнен таким образом, что излучение от одного источника делится на две волны равной интенсивности I , которые распространяются в контуре в противоположных направлениях и интерферируют после его обхода. Сигнал интерференции в этом случае есть $I(1+\cos(F))$, где F – разность фазовых набегов (сдвиг фаз) волн в контуре. При вращении создается сдвиг фаз (фаза Саньяка) между встречными волнами $F=2\pi DLW/\lambda c$ (D – диаметр катушки, L – длина волокна, W – скорость вращения вокруг нормали к плоскости контура (оси чувствительности)).

Коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и фазой Саньяка называется оптическим масштабным коэффициентом контура (K). Величина K определяет диапазон измеряемых угловых скоростей, который составляет 300 град/с

Минимальная измеряемая угловая скорость зависит от качества оптических компонентов (модуль, ответвитель, поляризатор). Ее отношение к максимальной измеряемой скорости представляет динамический диапазон

ВОГ. Качество оптики проявляется в максимальном подавлении всех механизмов возникновения сдвига фаз в интерферометре, кроме как вследствие вращения. Оптическая архитектура ВГ091 обеспечивает оптимальную оптическую фильтрацию сигнала для уменьшения дрейфа и повышения помехоустойчивости. Для этого излучение проходит поляризационный фильтр и на ответвителе разделяется на два встречных луча волоконного контура. После обхода контура лучи смешиваются (интерферируют) на том же ответвителе и опять проходят поляризационный фильтр, обеспечивающий идентичность (взаимность) оптических путей встречных волн в контуре. Вторым ответвителем сигнал интерференции отводится на фотоприемное устройство, сигнал которого пропорционален мощности светового потока. Для повышения чувствительности используется пьезокерамический фазовый модулятор (ПЭТ). При питании его переменным напряжением создается дополнительный сдвиг фаз $m(t) = M \sin(\omega t)$ за счет периодического растяжения участка волоконного контура.

При работе модулятора выходной сигнал может быть выражен в виде:

$$I(t, \Phi, M) \approx 1 + \cos(\Phi + M \sin(\omega t)) \approx$$

$$\approx J_1(M) \sin(\Phi) \sin(\omega t) + J_2(M) \sin(\Phi) \sin(2\omega t) + 1 +$$

$$+ J_0(M) \cos(\Phi) + QB \cos(\omega t)$$

Где представлены основные составляющие сигнала ВОГ (J_n – функция Бесселя порядка n). Это – первая гармоника частоты модуляции, вторая гармоника, постоянная составляющая и сигнал квадратурной помехи (QB). Они зависят от амплитуды модуляции (M) и угловой скорости. Квадратурный сигнал (QB) также проявляется на частоте модуляции, однако он не зависит от вращения и сдвинут по фазе на 90° относительно сигнала вращения.

При вращении датчика появляется сигнал на первой гармонике, пропорциональный скорости вращения. Его величина зависит также от тока СЛД и напряжения ПЭТ. Выходное напряжение в диапазоне измеряемых скоростей ($-W_{max}...+W_{max}$) аппроксимируется соотношением:

$$U(W, t^\circ) = SF \cdot W \cdot [1 + s(t^\circ)] \cdot \left[1 - p \cdot \left(\frac{W}{W_{max}} \right)^2 \right] + B(t^\circ) + N$$

SF – крутизна системы (коэффициент между скоростью и напряжением), $B(t^\circ)$ – начальный сдвиг (зависит от температуры); N – случайная составляющая сигнала; $s(t^\circ)$ – температурная составляющая крутизны; p – параметр нелинейности.

SF является произведением ОМК и коэффициента преобразования электронного блока (≈ 15 В/мрад). Нелинейность преобразования нарастает квадратично на границах диапазона измерений примерно до 10-15%. Она корректируется квадратичной аппроксимацией до уровня 0.3..1%. При малых скоростях вращения нелинейность пренебрежимо мала.

Волоконно-оптический контур изготовлен из одномодового оптического волокна, сохраняющего поляризацию излучения, и имеющего следующие технические характеристики: длина поляризационных биений 5 мм; диаметр кварцевой оболочки – 45 мм; диаметр волокна в полимерном покрытии – 150 мкм; длина волокна – 100 мм; диаметр намотки – 70 мм. Внешние по отношению к жиле слои волокна выполняются из легированного кварца для придания ему определенных оптических и механических свойств. Длина и диаметр намотки определяют ОМК датчика.

Фазовый модулятор (ПЭТ) представляет собой участок волоконного контура, намотанный на пьезокерамический (ЦТС-23) цилиндр диаметром 18 мм. Рабочая частота модуляции (резонансная) 73..83кГц, добротность не менее 150. Статическая емкость примерно 220пФ. Характеристики модулятора зависят от температуры. Так, активное сопротивление падает с

температурой, а коэффициент преобразования (соотношение между индексом фазовой модуляции и напряжением ПЗТ) соответственно возрастает. ПЗТ является электромеханической колебательной системой. Кроме основного (радиального) типа колебаний в нем существуют и другие типы колебаний, резонансные частоты которых выше 350кГц.

Волоконный биконический ответвитель 2х2 является устройством, осуществляющим оптическую связь между волокнами. Он изготовлен таким образом, что излучение, распространяющееся в одном из волокон, равномерно и практически без потерь (менее 0.3дБ) распределяется между двумя волокнами. Ответвители изготавливаются по сварной технологии непосредственно на концах контура, после чего распаиваются на кварцевых подложках для обеспечения вибро и термоустойчивости.

Волоконно-кристаллический поляризатор выполнен в виде биконического перехода (утончения) на участке волокна, заращенного анизотропным монокристаллом. Коэффициент экстинкции поляризатора (разность потерь волн с ортогональными поляризациями) более 30 дБ.

Излучательный модуль - это кристалл суперлюминесцентного светодиода (СЛД), оптически согласованный с волокном. Длина волны излучения 815...830нм, оптическая мощность в волокне более 50мкВт. СЛД обладает яркостью, сопоставимой с яркостью лазерного источника, имея при этом низкую когерентность. Это последнее свойство используется в ВОГ для уменьшения начального сдвига и шума.

Все узлы и компоненты ВОГ смонтированы в корпусе, выполненном из алюминиевого сплава. Внутренняя полость ВОГ заполняется сухим азотом. Герметизация ВОГ осуществляется кремнийорганическим герметиком и механическим поджимом крышки и корпуса. Для ориентации ВОГ на объекте используется установочная поверхность (основание).

Предварительный расчет инерционных характеристик ГС

Масса элементов внутренней оси:

$$m_{\text{вн}} = m_{\text{ос}} + m_{\text{ВОГ}} + m_{\text{ДУ}} + m_{\text{ДМ}} + m_{\text{полуоси}}$$

$m_{\text{ОС}}=2$ кг – масса объекта стабилизации

$m_{\text{ВОГ}}=0,03$ кг – масса чувствительного элемента (ВГ091)

$m_{\text{СКТ265}}=0,144$ кг – масса ДУ

$m_{\text{ДМ10}}=0,350$ кг – масса ДМ

$m_{\text{полуоси}} = 0,033$ кг – масса полуоси

$$m_{\text{вн}} = 2 + 2 \cdot 0.03 + 0.144 + 0.350 + 0.033 = 2.587 \text{ кг}$$

Масса элементов наружной оси:

$$m_{\text{нар}} = m_{\text{вн}} + m_{\text{рамы}} + m_{\text{ДУ}} + m_{\text{ДМ}} + m_{\text{полуоси}}$$

$m_{\text{рамы}} = 0.48$ кг – масса рамы

$m_{\text{СКТ265}}=0,144$ кг – масса ДУ

$m_{\text{ДМ3}}=0,42$ кг – масса ДМ

$$m_{\text{нар}} = 2.587 + 0.48 + 0.144 + 0.42 + 0.033 = 3.664 \text{ кг}$$

Моменты инерции:

Моменты инерции объекта стабилизации:

$$I_x^{\text{ос}} = I_y^{\text{ос}} = 230 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_z^{\text{ос}} = 240 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

Моменты инерции ВОГ:

$$I_x^{\text{ВОГ}} = m_{\text{ВОГ}} \cdot (Y_{\text{цм1}}^2 + Z_{\text{цм2}}^2) + m_{\text{ВОГ}} \cdot (Y_{\text{цм2}}^2 + Z_{\text{цм2}}^2)$$

$$I_y^{\text{BOГ}} = m_{\text{BOГ}} \cdot (X_{\text{цм1}}^2 + Z_{\text{цм1}}^2) + m_{\text{BOГ}} \cdot (X_{\text{цм2}}^2 + Z_{\text{цм2}}^2)$$

Здесь $X_{\text{цм1}}, Y_{\text{цм1}}, Z_{\text{цм1}}, X_{\text{цм2}}, Y_{\text{цм2}}, Z_{\text{цм2}}$ - координаты центра масс ВОГов относительно центра подвеса.

$$X_{\text{цм1}} = 25\text{мм}; Y_{\text{цм1}} = 45\text{мм}; Z_{\text{цм1}} = 63\text{мм}$$

$$X_{\text{цм2}} = 25\text{мм}; Y_{\text{цм2}} = 45\text{мм}; Z_{\text{цм2}} = 63\text{мм}$$

Таким образом:

$$\begin{aligned} I_x^{\text{BOГ}} &= 0.03 \cdot (0.045^2 + 0.063^2) + 0.03 \cdot (0.045^2 + 0.063^2) = 360 \cdot 10^{-6} \text{Н} \cdot \text{м} \\ &= 3.6 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_y^{\text{BOГ}} &= 0.03 \cdot (0.025^2 + 0.063^2) + 0.03 \cdot (0.025^2 + 0.063^2) = 275 \cdot 10^{-6} \text{Н} \cdot \text{м} \\ &= 2.75 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2 \end{aligned}$$

Моменты инерции ДУ и ДМ:

$$I_x^{\text{ДУ,ДМ}} = 41 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_y^{\text{ДУ,ДМ}} = 14 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_z^{\text{ДУ,ДМ}} = 41 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

Моменты инерции полуосей:

$$I_{\text{хр}}^{\text{полуосей}} = 3.2 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_{\text{ур}}^{\text{полуосей}} = 7.2 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_{\text{зр}}^{\text{полуосей}} = 10 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_{\text{уп}}^{\text{полуосей}} = 0.41 \text{сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

Моменты инерции рамы:

$$I_x^{\text{рамы}} = 16 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_y^{\text{рамы}} = 16 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_z^{\text{рамы}} = 29 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

Суммарные моменты инерции:

$$I_x^p = I_{xp}^{\text{полуосей}} + I_x^{\text{рамы}} + I_x^{\text{ДУ, ДМ}} = 60.2 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_y^p = I_{yp}^{\text{полуосей}} + I_y^{\text{рамы}} + I_y^{\text{ДУ, ДМ}} = 37.5 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_z^p = I_{zp}^{\text{полуосей}} + I_z^{\text{рамы}} + I_z^{\text{ДУ, ДМ}} = 80 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

$$I_y^п = I_y^{\text{ОС}} + I_y^{\text{ВОГ}} + I_{yp}^{\text{полуосей}} = 233 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$$

Расчет вредных моментов

1. Моменты трения.

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

$$M_{\text{тр.ш/п}} = M_0 + (1.5 \cdot A + 1.25 \cdot R) \cdot k \cdot D_0 / d_{\text{ш}}$$

где M_0 – момент трения ненагруженного шарикоподшипника, $\text{г} \cdot \text{см}$ (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 ; $d_{\text{ш}}$ — 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:

$$M_{\text{тр.ш/п}} = M_0 + k_1 R + k_3 A \text{ при } R \leq 500 \text{ г};$$

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

Таблица 1.

Диаметр оси, мм	M ₀ , г*см		k ₁ , см		k ₂ , см		k ₃ , см
	одноряд ные	двухряд ные	одноряд ные	двухряд ные	одноряд ные	Двухряд ные	
5	–	8,9	0,0156	0,0163	0,0016	0,0075	0,005
6	–	7,8	0,0099	0,0110	0,0013	0,0022	0,005
7	5,6	7,0	0,0094	0,0104	0,0018	0,0026	0,006
8	–	7,0	0,0091	0,0095	0,0023	0,0035	0,006
10	7,2	9,2	0,0069	0,0088	0,0035	0,0052	0,008
12	10,8	14,1	0,0124	0,0160	0,0050	0,0092	0,010

Рабочие перегрузки, действующие на ЛА по осям:

$$n_x = n_y = n_z = 3.8$$

Ускорения, действующие по осям ЛА:

$$W_x = n_x \cdot g$$

$$W_y = n_y \cdot g$$

$$W_z = n_z \cdot g$$

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

Определим проекции линейных ускорений, действующих на ЛА, на оси, связанные с рамкой ($Ox'y'z'$), и на оси, связанные с платформой ($Oxyz$).

Учитывая, что гиростабилизатор поворачивается по оси курса рамки на угол α , получим следующие выражения для проекций на оси $Ox'y'z'$:

$$W'_x = W^c_x;$$

$$W'_y = W^c_y \cdot \cos \alpha - W^c_z \cdot \sin \alpha;$$

$$W'_z = W^c_z \cdot \cos \alpha + W^c_y \cdot \sin \alpha.$$

Учитывая, что гиростабилизатор поворачивается по оси тангажа платформы на угол β , получим следующие выражения для проекций на оси $Oxyz$:

$$W_x = W^c_x \cdot \cos \beta + W^c_y \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta - W^c_z \cos \alpha \cdot \sin \beta;$$

$$W_y = W^c_y \cdot \cos \alpha + W^c_z \cdot \sin \alpha;$$

$$W_z = W^c_x \cdot \sin \beta - W^c_y \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + W^c_z \cos \alpha \cdot \cos \beta.$$

где $\alpha = (-40 \dots 40)^\circ$ — определяется углом прокачки,

$\beta = (-40 \dots 40)^\circ$ — определяется углом прокачки,

Причем

$$W^c_x = W^c_y = W^c_z = 3.8 \cdot g.$$

Максимальные значения осевых нагрузок будут достигаться при

$$\alpha = \beta = 0^\circ$$

Осевая нагрузка на подшипники платформы:

$$A_\Pi = m_\Pi \cdot W_y$$

$$A_\Pi = m_\Pi \cdot W_y = 100 \cdot 2587 \cdot 3.8 \cdot 9.8 \cdot 10^{-3} = 9634 \text{ cH}$$

где m_{Π} – масса платформы

Радиальная нагрузка на подшипники платформы:

$$\begin{aligned} R_{\Pi} &= \frac{m_{\Pi}}{2} \cdot \sqrt{(W_x \cdot g)^2 + (W_z \cdot g)^2} \\ &= \frac{2587 \cdot 100}{2} \cdot \sqrt{(3.8 \cdot 9.8)^2 + (3.8 \cdot 9.8)^2} \cdot 10^{-3} = 6812 \text{ cH} \end{aligned}$$

где m_{Π} – масса платформы

Осевая нагрузка на подшипники наружной рамы:

$$\begin{aligned} A_{\text{H}} &= m_{\text{H}} \cdot W_x \\ A_{\text{H}} &= m_{\text{H}} \cdot W_x = 100 \cdot 3664 \cdot 3.8 \cdot 9.8 \cdot 10^{-3} = 13645 \text{ cH} \end{aligned}$$

где m_{H} – масса наружной рамы

Радиальная нагрузка на подшипники наружной рамы:

$$\begin{aligned} R_{\text{H}} &= \frac{m_{\Pi}}{2} \cdot \sqrt{(W_y \cdot g)^2 + (W_z \cdot g)^2} \\ &= \frac{3664 \cdot 100}{2} \cdot \sqrt{(3.8 \cdot 9.8)^2 + (3.8 \cdot 9.8)^2} \cdot 10^{-3} = 9648 \text{ cH} \end{aligned}$$

$$R_{\text{H}} = 0.5 \cdot 3664 \cdot 3.8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9.8 = 8990 \text{ cH}$$

где P_{Π} – вес платформы, P_{H} – вес наружной рамы

Моменты трения для однорядных шарикоподшипников диаметром 10мм:

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

Момент трения подшипников платформы:

$$M_{\text{тр.ш./п}}^y = 7.2 + 500(0.0069 - 0.0035) + 0.0035 \cdot 6812 + 0.008 \cdot 9634 ;$$

$$M_{\text{тр.ш./п}}^y = 109.8 \text{ cH} \cdot \text{см.}$$

Момент трения подшипников рамы:

$$M_{\text{тр.ш./р}}^x = 7.2 + 500(0.0069 - 0.0035) + 0.0035 \cdot 9648 + 0.008 \cdot 13645 ;$$

$$M_{\text{тр.ш./р}}^x = 151.8 \text{ сН} \cdot \text{см}.$$

Учтя коэффициент запаса по моменту, который равен 1.5, получим

$$M_{\text{тр.ш./п}}^y = 164.7 \text{ сН} \cdot \text{см};$$

$$M_{\text{тр.ш./р}}^x = 227.7 \text{ сН} \cdot \text{см}.$$

2. Моменты тяжения токоподводов.

Современные гиросtabilизаторы являются сложными электромеханическими устройствами, следовательно, для обеспечения функционирования как самих стабилизаторов, так и стабилизируемых приборов, устанавливаемых на платформе, требуется передача большого количества электрических сигналов. Для этого используются токоподводы на каждой оси стабилизации. Количество необходимых токоподводов достигает нескольких десятков, причем передаваемые по ним токи лежат в пределах от долей миллиампера, до десятков ампер (в цепи питания гиromотора). 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 карданова подвеса. При выборе типа токоподводов для гиросtabilизаторов величины моментов, создаваемых токоподводами, не играют, в отличие от других гироскопических приборов, определяющей роли. Применяются два типа токоподводов: многоконтактные коллекторные и различные виды гибких проводников. Коллекторные токоподводы применяют тогда, когда необходимо получать в стабилизаторе малые величины моментов трения, практически не зависящие от углов поворота рам карданова подвеса и эксплуатационных условий. Токоподводы с гибкими проводниками обеспечивают высокую надежность работы. Габариты токоподводящего узла при большом количестве токоподводящих проводников малы. Момент, создаваемый

такими токоподводами, пропорционален углам поворота рам карданова подвеса и при правильном выборе типа проводников и конструкции токоподвода является относительно небольшим. Уменьшение момента, а также обеспечение работы стабилизатора при неограниченном угле поворота платформы вокруг осей карданова подвеса можно получить с помощью следящей системы, разворачивающей часть токоподводов, расположенную на корпусе, вслед за поворотом части токоподводов, закрепленной на подвижной системе. Применяются три конструктивных типа гибких токоподводов: 1) жгуты проводников, расположенных вдоль оси вращения (для каждой из осей карданова подвеса свой жгут). Для получения малых упругих моментов проводники имеют запас по длине, обеспечивающий их свободное скручивание; 2) свободный жгут проводников, который может изгибаться во всех направлениях при поворотах платформы карданова подвеса и имеет соответствующий запас по длине; 3) барабан со спирально уложенными рядами проводников, которые при поворотах скручиваются или раскручиваются. Для уменьшения габаритов и упрощения конструкции применяют специальные многожильные ленточные провода. Так же как и в первой конструкции, обеспечивается поворот только вокруг одной оси.

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 карданова подвеса. Для уменьшения упругих моментов применяют провода малого сечения.

Так как величина моментов сопротивления всех приведенных типов гибких токоподводов существенно зависит от конструкции токоподводов и технологии их изготовления, то моменты сопротивления обычно определяют по данным испытаний макетов узлов токоподводов или по экспериментальным данным для приборов-аналогов.

Удельный момент упругих токоподводов по опытным данным определяются по формуле:

$$M_{\text{ТП}} = \frac{k_{\text{т.п.}} \cdot N}{l_{\text{т.п}}}, \quad k=5\dots 8 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{рад}.$$

где $M_{\text{ТП}}$ – момент тяжения токоподводов

Выберем значения следующих величин:

$k_{\text{т.п.}} = 6,5 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{рад}$ – эмпирический коэффициент для токоподводов первого типа (провод МГТФ-0.07),

$l_{\beta}=40 \text{ мм}$, $l_{\alpha}=60 \text{ мм}$ – длина токоподводов между местами заделки проводников по осям тангажа и курса соответственно,

$N_{\beta}=29$, $N_{\alpha}=38$ – количество токоподводов.

Следовательно, удельные моменты будут равны:

Удельный момент платформы:

$$M_{mn}^y = \frac{k_{mn} \cdot N_{\beta}}{l_{mn}} = \frac{6.5 \cdot 29}{4} = 47.125 \left(\frac{\text{г}\cdot\text{см}}{\text{рад}} \right)$$

Удельный момент рамы:

$$M_{mn}^x = \frac{k_{mn} \cdot N_{\alpha}}{l_{mn}} = \frac{6.5 \cdot 38}{6} = 41.1 \left(\frac{\text{г}\cdot\text{см}}{\text{рад}} \right)$$

При углах отклонения платформы $\alpha=40^{\circ}$ и $\beta=40^{\circ}$ моменты тяжения токоподводов:

Момент тяжения токоподводов платформы:

$$M_{mn}^y = \frac{40}{57} \cdot \frac{6.5 \cdot 29}{4} = 33 (\text{сН}\cdot\text{см})$$

Момент тяжения токоподводов рамы:

$$M_{mn}^x = \frac{40}{57} \cdot \frac{6.5 \cdot 38}{6} = 28.9 (\text{сН}\cdot\text{см})$$

3. Моменты при ускоренном движении ЛА при наличии смещения центра масс.

При линейных перегрузках неточность балансировки наряду с моментом трения в опорах создает значительную часть возмущающих моментов, уравниваемых системой. При расчетах возмущающих моментов определяют максимальную величину моментов от остаточной несбалансированности.

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

Определим радиальные нагрузки при отсутствии перегрузок.

Радиальные нагрузки на подшипники платформы:

$$R_{0п} = m_{п} \cdot \frac{g}{2} = 100 \cdot 2587 \cdot \frac{9.81}{2} \cdot 10^{-3} = 1268 \text{ сН};$$

где $m_{п}$ – масса платформы;

Радиальные нагрузки на подшипники наружной рамы:

$$R_{0н} = m_{н} \cdot \frac{g}{2} = 100 \cdot 3664 \cdot \frac{9.81}{2} \cdot 10^{-3} = 1797 \text{ сН};$$

где $m_{н}$ – масса наружной рамы;

Определим $M^{\text{НБ ост}}$ на неподвижном основании:

$$M^{\text{НБ ост}} = M_0 + k_3 \cdot R_0, M^{\text{НБ ост}} – \text{момент остаточной несбалансированности};$$

Момент остаточной несбалансированности по оси платформы:

$$M_{п}^{\text{НБ ост}} = M_0 + k_3 \cdot R_{0п} = 7.2 + 0.008 \cdot 1180.6 = 17.4 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

Момент остаточной несбалансированности по оси наружной рамы:

$$M_{н}^{\text{НБ ост}} = M_0 + k_3 \cdot R_{0н} = 7.2 + 0.008 \cdot 1674.6 = 21.6 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

Величины максимальных моментов от остаточной несбалансированности относительно осей карданова подвеса будут равны:

$$M_{\Pi}^{\text{НБ}} = M_{\Pi}^{\text{НБ ост}} \cdot (n_x + n_z) = 17.4 \cdot (3.8 + 3.8) = 131.9 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

$$M_{\text{Н}}^{\text{НБ}} = M_{\text{Н}}^{\text{НБ ост}} \cdot (n_y + n_z) = 21.6 \cdot (3.8 + 3.8) = 164 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

где n_x, n_y, n_z – максимальные перегрузки, действующие на прибор

4. Моменты, обусловленные неравножесткостью конструкции карданова подвеса.

Карданов подвес стабилизатора состоит из упругих элементов (рам, цапф, подшипников), при деформации которых появляются силы внутреннего трения. Под влиянием сил инерции, возникающих при движении основания (ЛА) с ускорением, происходят упругие деформации элементов карданова подвеса и относительные перемещения его элементов. Направления перемещений из-за различия жесткости элементов в разных направлениях обычно не совпадают с линией действия сил инерции, вследствие чего возникают моменты вокруг осей карданова 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 карданова подвеса, демпфирующие их колебания. Если при разработке гиросtabilизаторов применяются специальные меры по обеспечению требуемой жесткости рам карданова подвеса, то величина упругости карданова подвеса определяется в значительной мере упругостью подшипников подвеса. Поэтому при расчете гиросtabilизаторов принимают упрощенную кинематическую схему карданова подвеса, в которой предполагают, что элементами, определяющими упругие деформации карданова подвеса, являются цапфы и подшипники, т. е. вместо схем с распределенными упругостями рассматривается схема с упругостью, сосредоточенной в опорах карданова подвеса.

Значения жесткостей радиальной и продольной жесткостей, по указанию преподавателя, определяются соотношением:

$$\frac{1}{C_a} - \frac{1}{C_r} = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м} = 0.2 \cdot 10^{-2} \text{ сН} \cdot \text{см}$$

Где C_r – радиальная жесткость, C_a – продольная жесткость

Тогда моменты от неравножесткости будут вычисляться по формулам:

Момент неравножесткости платформы:

$$M_y^{\text{НЖ}} = P_{\text{п}}^2 \cdot n_y n_z \cdot \left(\frac{1}{C_a} - \frac{1}{C_r} \right) = 2.587 \cdot 3.8 \cdot 3.8 \cdot 0.2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 18.6 \text{ сНсм}$$

где

$P_{\text{п}}$ – вес платформы,

n_y, n_z – ускорения ЛА по осям y и z соответственно

Момент неравножесткости наружной рамы:

$$M_x^{\text{НЖ}} = P_y^2 \cdot n_y n_z \cdot \left(\frac{1}{C_a} - \frac{1}{C_r} \right) = 3.664 \cdot 3.8 \cdot 3.8 \cdot 0.2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 26.3 \text{ сНсм}$$

где

$P_{\text{н}}$ – вес наружной рамки,

n_x, n_z – ускорения ЛА по осям x и z соответственно

5. Инерционные моменты рам карданова подвеса.

Двухосный гиросtabilизатор стабилизирует в пространстве ось $Oz_{\text{п}}$, связанную с платформой. При угловых движениях основания в двухосном гиросtabilизаторе вследствие особенности кинематики КП наружная и внутренняя рамы поворачиваются вокруг стабилизированной оси с переменной угловой скоростью даже при постоянной угловой скорости поворота основания. Движение с переменной угловой скоростью есть

движение с некоторым ускорением, которое вызывает инерционный момент, действующий вокруг оси наружной рамы КП.

Если в силовых гиросtabilизаторах моменты внешних сил, изменяющихся с высокой частотой, уравниваются как системой разгрузки, так и гироскопическим и инерционным моментами, то в индикаторных стабилизаторах компенсация знакопеременных моментов внешних сил, также как и постоянных, полностью должна быть обеспечена системой разгрузки. Поэтому знание инерционных моментов при проектировании индикаторных стабилизаторов необходимо.

Выражение для инерционного момента вокруг оси внешней рамы двухосного гиросtabilизатора:

$$M_{ин} = (I_x^p + I_y^n) \cdot \varepsilon_z + \left(I_z^p - I_y^p - \frac{I_x^p}{\cos \alpha} - I_y^n \cdot tg^2 \alpha \right) \cdot \omega_z \cdot \omega_y;$$

I_x^p — момент инерции рамки вокруг оси x

I_y^p — момент инерции рамки вокруг оси y

I_z^p — момент инерции рамки вокруг оси z

I_y^n — момент инерции платформы вокруг оси y

ε_z — максимальное угловое ускорение ЛА вокруг оси z

ω_y — максимальная угловая скорость ЛА вокруг оси y

ω_z — максимальная угловая скорость ЛА вокруг оси z

α — угол прокачки

$$M_{ин} = (60.2 + 233) \cdot \frac{230}{180} \cdot \pi + \\ + \left(80 - 37.5 - \frac{60.2}{\cos 40^\circ} - 233 \cdot tg^2 40^\circ \right) \cdot \frac{50}{180} \cdot \pi^2 \cdot \frac{50}{180} = 1387 \text{ сНсм}$$

При колебаниях основания с малой амплитудой вокруг оси X_c по закону $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ углы α и β отклонения рамы карданова подвеса и платформы в первом приближении можно считать постоянными. Получаем суммарный инерционный момент с учетом угловой качки:

$$M_{\text{качки}}^{\text{ин}} = (I_x^p + I_y^п) \cdot \left(\gamma_0 \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot (2\pi f)^2 \tan(\alpha);$$

где:

I_x^p – момент инерции рамки вокруг оси x

$I_y^п$ – момент инерции платформы вокруг оси y

γ_0 – амплитудное значение угловой качки

α – угол прокачки

f – частота изменения значения угловой качки

$$M^{\text{ин}} = (60.2 + 233) \cdot \left(2.8 \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot (2 \cdot \pi \cdot 2.3)^2 \cdot \tan(40^\circ) = 2510 \text{ сНсм}$$

Наибольший момент получился от качки, берем его.

6. Момент управления

Максимальное угловое ускорение управления $\varepsilon_{\text{упр}} = 3.84$ рад/с. Поэтому для обеспечения этого момента, во внешних моментах будет еще одна составляющая.

$$M_{\text{упр}}^y = I_y^п \cdot \varepsilon_{\text{упр}} = 233 \cdot 3.84 = 894.7 \text{ сНсм}$$

$$M_{\text{упр}}^x = (I_x^p + I_y^п) \cdot \varepsilon_{\text{упр}} = (60.2 + 233) \cdot 3.84 = 1125.8 \text{ сНсм}$$

Расчет суммарного возмущающего момента и выбор двигателя стабилизации

По внутренней оси:

$$M_{\Sigma}^{BH} = M_{\text{вн}}^{HЖ} + M_{\text{вн}}^{HB} + M_{\text{вн}}^{ТП} + M_{\text{вн}}^{ТР} + M_{\text{упр}}^y$$

$$= 18.56 + 131.9 + 33 + 164.7 + 894.7 = 1243 \text{ сНсм}$$

По наружной оси:

$$M_{\Sigma}^{HAP} = M_{\text{вн}}^{IH} + M_{\text{вн}}^{HЖ} + M_{\text{вн}}^{HB} + M_{\text{вн}}^{ТП} + M_{\text{вн}}^{ТР} + M_{\text{упр}}^x$$

$$= 2510 + 26.3 + 164 + 28.9 + 227.7 + 1125.8 = 4082.7 \text{ сНсм}$$

Данным значениям моментов удовлетворяют коллекторные моментные двигатели постоянного тока бескорпусного исполнения:

По оси платформы:

Двигатель	Крутизна, сН·см/А	I _{max} , А	I _{ном} , А	Вес, г	M _{пуск} , сНсм
ДМ-10	2600	1.5	0.6	350	3900

По оси рамы:

Двигатель	Крутизна, сН·см/А	I _{max} , А	I _{ном} , А	Вес, г	M _{пуск} , сНсм
ДМ-3	3700	1.6	0.6	420	5920

Момент обкатки

Коэффициент демпфирования двигателя: $D = \frac{M_{\text{пуск}}}{\omega_{xx}}$

$$M_{\text{пуск}} = I_{\text{макс}} \cdot K_{\text{ДМ}}$$

Где $I_{\text{макс}}$ – Максимальный пусковой ток,

$K_{\text{ДМ}}$ – крутизна ДМ

$$M_{\text{пуск}}^x = 1.6 \cdot 3700 = 5920 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

$$M_{\text{пуск}}^y = 1.5 \cdot 2600 = 3900 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

$$D_x = \frac{M_{\text{пуск}}^x}{\omega_{\text{хх}}} = \frac{5920}{\left(\frac{1000}{60}\right) \cdot 2 \cdot \pi} = 56.5 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}$$

$$D_y = \frac{M_{\text{пуск}}^y}{\omega_{\text{хх}}} = \frac{3900}{\left(\frac{1000}{60}\right) \cdot 2 \cdot \pi} = 37.2 \text{ сН} \cdot \text{см} \cdot \text{с}$$

Угловая скорость управления: $\omega_{\text{упр}} = 10^\circ/\text{с}$;

Угловая скорость объекта, на котором установлен прибор: $\omega_{\text{осн}} = 50^\circ/\text{с}$

Момент обкатки равен:

$$M_{\text{обк}}^x = D_x \cdot (\omega_{\text{упр}} + \omega_{\text{осн}}) = 56.5 \cdot \frac{10 + 50}{57.3} = 59.16 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

$$M_{\text{обк}}^y = D_y \cdot (\omega_{\text{упр}} + \omega_{\text{осн}}) = 37.2 \cdot \frac{10 + 50}{57.3} = 38.95 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

Момент сухого трения

По оси рамы возьмем момент сухого трения из паспортных характеристик ДМ-3

$$M_{\text{сух тр.}}^x = 70 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

По оси рамы возьмем момент сухого трения из паспортных характеристик ДМ-10

$$M_{\text{сух тр.}}^y = 220 \text{ сН} \cdot \text{см}$$

Суммарный возмущающий момент

В реальных условиях эксплуатации маловероятна ситуация, при которой все возмущающие моменты действуют одновременно и достигают своих максимальных значений. Однако при проверке правильности выбора двигателя необходимо считать суммарный внешний момент как сумму максимальных значений всех возмущающих моментов.

По внутренней оси:

$$M_{\Sigma}^{BH} = M_{\text{вн}}^{HЖ} + M_{\text{вн}}^{HB} + M_{\text{вн}}^{ТП} + M_{\text{вн}}^{TP} + M_{\text{упр}}^y + M_{\text{обк}}^y + M_{\text{сух тр.}}^y$$

$$M_{\Sigma}^{BH} = 16.07 + 126.16 + 33 + 154.2 + 894.7 + 38.95 + 220 =$$

$$= 1483 \text{ сНсм} < M_{\text{пуск}}^y$$

По наружной оси:

$$M_{\Sigma}^{HAP} = M_{\text{вн}}^{IH} + M_{\text{вн}}^{HЖ} + M_{\text{вн}}^{HB} + M_{\text{вн}}^{ТП} + M_{\text{вн}}^{TP} + M_{\text{упр}}^x + M_{\text{обк}}^x + M_{\text{сух тр.}}^x$$

$$M_{\Sigma}^{HAP} = 2510 + 26.2 + 164 + 28.9 + 227.7 + 1125.8 + 59.16 + 70 =$$

$$= 4211.76 \text{ сНсм} < M_{\text{пуск}}^x$$

Следовательно, ДМ-10 подходит для установки по внутренней оси (Оу).

ДМ-3 подходит для установки по наружной оси (Ох).

Математическая модель каналов ГС

Математические уравнения такой системы по наружной и внутренней оси в форме Лапласа имеют следующий вид:

$$J_x S^2 \beta + D_{\text{нар}}^{\text{пр}} S \beta + K_{\text{нар}}^c \beta = M_x^B$$

$$J_y S^2 \alpha + D_{\text{вн}} S \alpha + K_{\text{вн}}^c \alpha = M_y^B$$

где $J_x^{\text{нар}}, J_y^{\text{вн}}$ – суммарные приведенные моменты инерции по наружной и внутренней осям

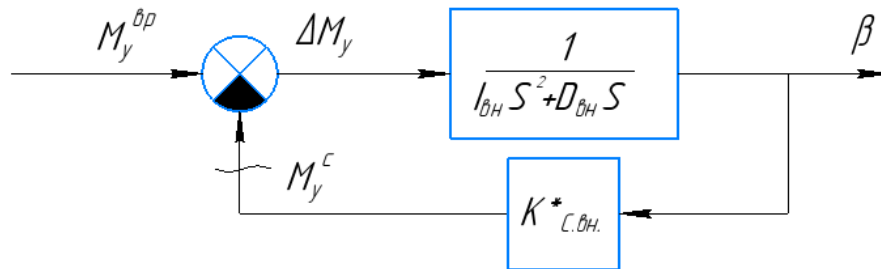
$D_{\text{нар}}^{\text{пр}}, D_{\text{вн}}$ – приведенные моменты инерции по наружной и внутренней осям

$K_{\text{нар}}^c, K_{\text{вн}}^c$ – коэффициенты усиления обратной связи каналов стабилизации по наружной оси и внутренней рамы

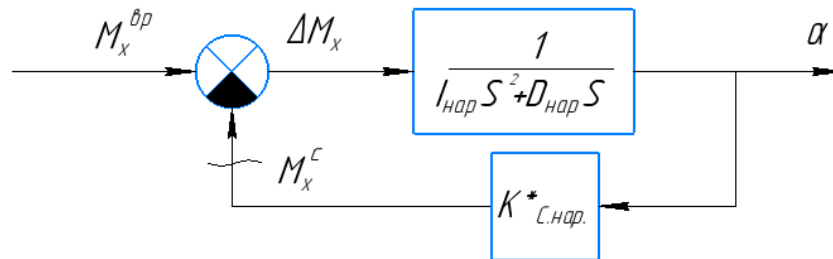
M_x^B, M_y^B – суммарные возмущающие моменты

Структурные схемы каналов стабилизации для такой системы имеют вид:

Канал внутренней оси:



Канал наружной оси:



Рассчитаем параметры входящие в структурную схему.

Исходные данные для расчета: угловая погрешность стабилизации

$$\Delta\beta = \Delta\alpha < 0.5' = 1.454 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$$

Коэффициент усиления обратной связи:

$$K_{\text{вн}}^c = \frac{M_{\Sigma}^{\text{вн}}}{\Delta\beta} = \frac{1483}{1.454 \cdot 10^{-4}} = 10^7 \frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\text{рад}}$$

$$K_{\text{нар}}^c = \frac{M_{\Sigma}^{\text{нар}}}{\Delta\alpha} = \frac{4211.76}{1.454 \cdot 10^{-4}} = 2.9 \cdot 10^7 \frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\text{рад}}$$

Возьмем запас по коэффициенту усиления $n_{\varepsilon} = 1.2$

$$K_{\text{с вн}}^* = K_{\text{вн}}^c \cdot n_{\varepsilon} = 10^7 \cdot 1.2 = 1.2 \cdot 10^7 \frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\text{рад}}$$

$$K_{с\text{ нар}}^* = K_{нар}^c \cdot n_{\varepsilon} = 2.9 \cdot 10^7 \cdot 1.2 = 3.48 \cdot 10^7 \frac{\text{сН} \cdot \text{см}}{\text{рад}}$$

Постоянные времени:

$$T_{п\text{ вн}} = \frac{J_y^{\text{вн}}}{D_{\text{вн}}} = \frac{233}{37.2} = 6.26 \text{ с}$$

$$T_{п\text{ нар}} = \frac{J_x^{\text{нар}}}{D_{нар}^{\text{пр}}} = \frac{293.2}{56.5} = 4.12 \text{ с}$$

Добротности по скорости:

$$K_{\text{вн}}^v = \frac{K_{с\text{ вн}}^*}{D_{\text{вн}}} = \frac{1.2 \cdot 10^7}{37.2} = 322580 \frac{1}{\text{с}}$$

$$K_{нар}^v = \frac{K_{с\text{ нар}}^*}{D_{нар}^{\text{пр}}} = \frac{3.48 \cdot 10^7}{56.5} = 615929 \frac{1}{\text{с}}$$

Исследование устойчивости ГС

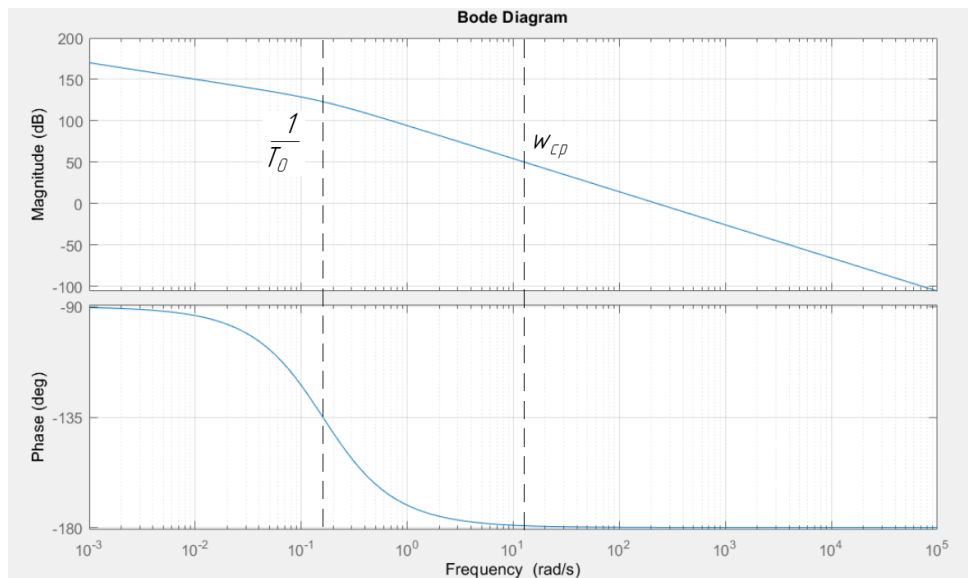
Исследование устойчивости произведем по критерию Найквиста с использованием логарифмических амплитудночастотных и фазочастотных характеристик (ЛАФЧХ) разомкнутой системы.

По каналу внутренней оси

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

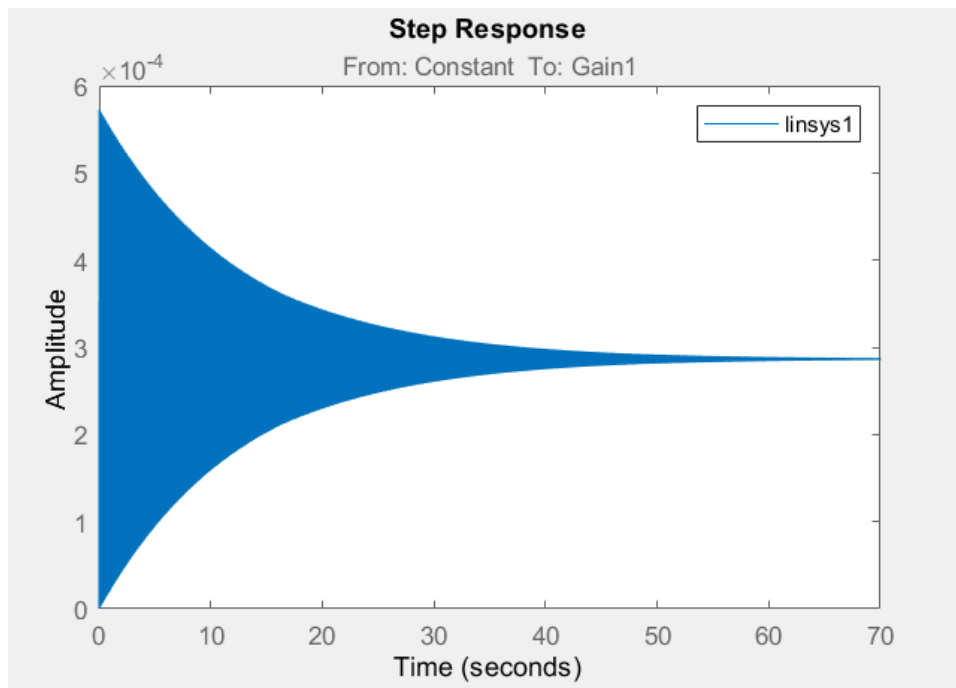
$$W(S) = \frac{K_{с\text{ вн}}^*}{D_{\text{вн}}S} \cdot \frac{1}{T_{п\text{ вн}}S + 1} = \frac{1.2 \cdot 10^7}{37.2 \cdot S} \cdot \frac{1}{6.26S + 1}$$

ЛАФЧХ такой системы имеет вид:



ЛФЧХ не пересекает уровень -180° , а лишь стремится к нему. Запас по фазе в данном случае стремится к нулю ($\Delta\varphi \rightarrow 0$), а запас по амплитуде, напротив, стремится к бесконечности ($\Delta L \rightarrow 0$). В целом это говорит о том, что система находится на границе устойчивости и требует коррекции. Это можно подтвердить экспериментально построив график переходного процесса средствами компьютерного моделирования.

Переходной процесс нескорректированной системы:



Чтобы увеличить запас по фазе, необходимо ввести корректирующее дифференцирующее звено $W_{\text{дифф}}(S) = T_{1\text{вн}}S + 1$. Если правильно выбрать постоянные времен $T_{1\text{вн}}$ и $T_{\text{вн}2}$, мы обеспечим необходимый запас

устойчивости и, тогда на частоте среза ЛАЧХ будет пересекать ось 0 дБ под наклоном -20 дБ/дек. Введением апериодического звена $W_{анер}(S) = \frac{1}{T_{2\theta H}S + 1}$ на несколько большей частоте вернем систему в исходное состояние. Также для подавления возникающих в контуре обратной связи высокочастотных помех введем ещё одно апериодическое звено $W_{nn}(S) = \frac{1}{T_{3\theta H}S + 1}$.

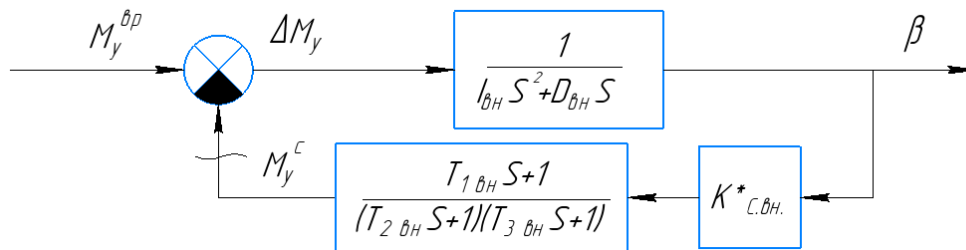
Постоянные времени корректирующего звена:

$$T_{1\theta H} = 0.0065 \text{ с}; T_{2\theta H} = 0.00065 \text{ с}; T_{3\theta H} = 0.000065 \text{ с}.$$

Передаточная функция такого корректирующего звена будет иметь вид:

$$W_{кор.вн.}(S) = \frac{T_{1\text{ вн}}S + 1}{T_{2\text{ вн}}S + 1} \cdot \frac{1}{T_{3\text{ вн}}S + 1} = \frac{0.0065S + 1}{0.00065S + 1} \cdot \frac{1}{0.000065S + 1}$$

Структурная схема канала с введенной коррекцией:

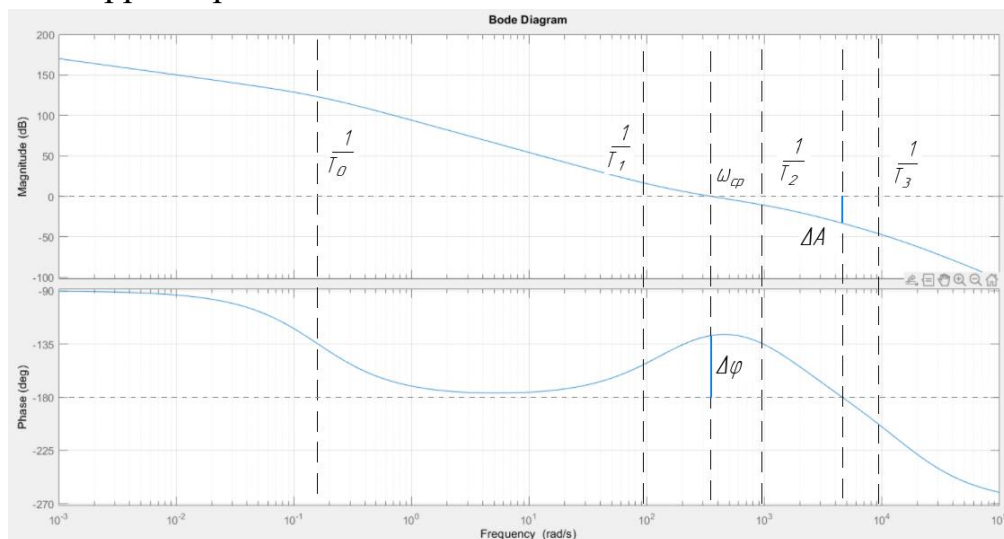


Передаточная функция разомкнутой скорректированной системы:

$$W_{скор.}(S) = \frac{K_{с\text{ вн}}^*}{D_{\text{вн}}S} \cdot \frac{1}{T_{\text{п вн}}S + 1} \cdot \frac{T_{1\text{ вн}}S + 1}{T_{2\text{ вн}}S + 1} \cdot \frac{1}{T_{3\text{ вн}}S + 1}$$

$$W_{скор.}(S) = \frac{1.2 \cdot 10^7}{37.2 \cdot S} \cdot \frac{1}{6.26 S + 1} \cdot \frac{0.0065S + 1}{0.00065S + 1} \cdot \frac{1}{0.000065 S + 1}$$

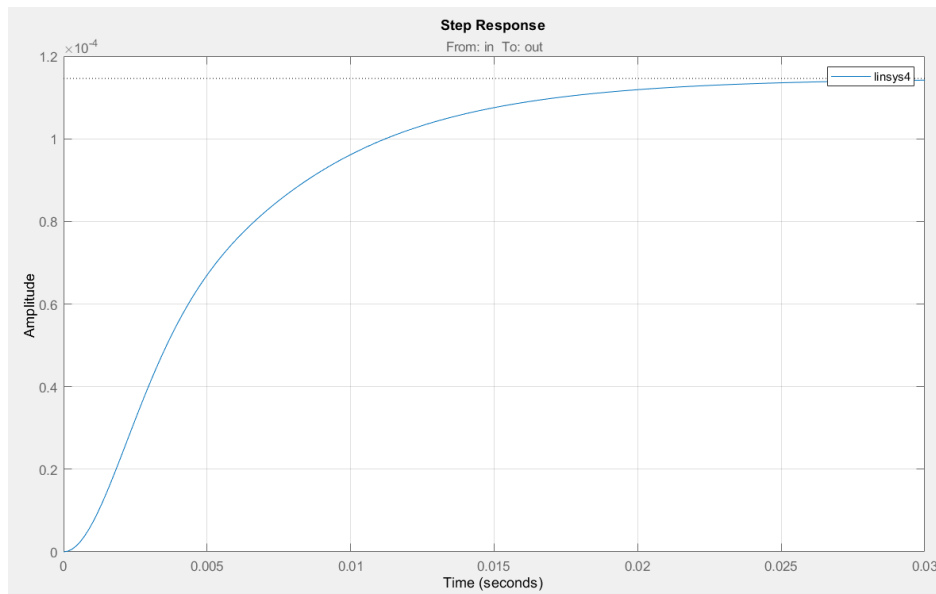
ЛАФЧХ скорректированной системы имеет вид:



В результате корректировки получены следующие запасы:

1. По фазе $\Delta\varphi = 53^\circ$
2. По амплитуде $\Delta L = 33$ дБ

Переходный процесс скорректированной системы:



Переходной процесс устойчив. Время пп $t_{п_вн} = 0.02$ с.

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что корректировка достигла своей цели.

Поскольку при построении переходного процесса на вход системы подавалось ступенчатое воздействие по величине равное суммарному возмущающему моменту, установившееся значение будет равно ошибке стабилизации.

Таким образом, полученная ошибка стабилизации по внутренней оси:

$$\beta_{уст} = 0.000116 \text{ рад} = 0.41' < \Delta\beta$$

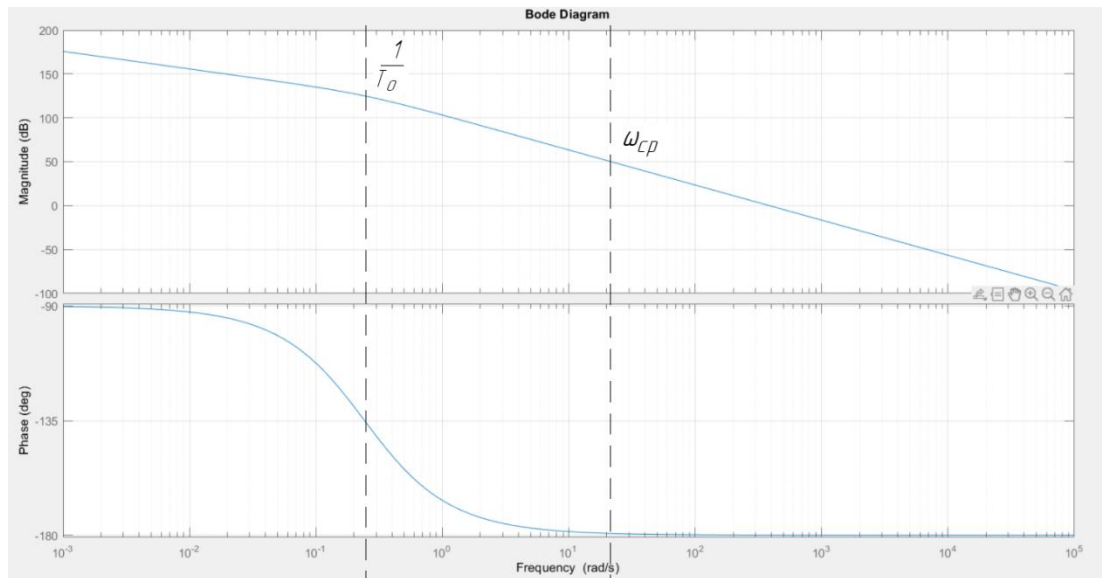
Так как установившееся значение ошибки меньше заданной по ТЗ, можно утверждать, что требования ТЗ по точности выполнены.

По каналу наружной оси

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

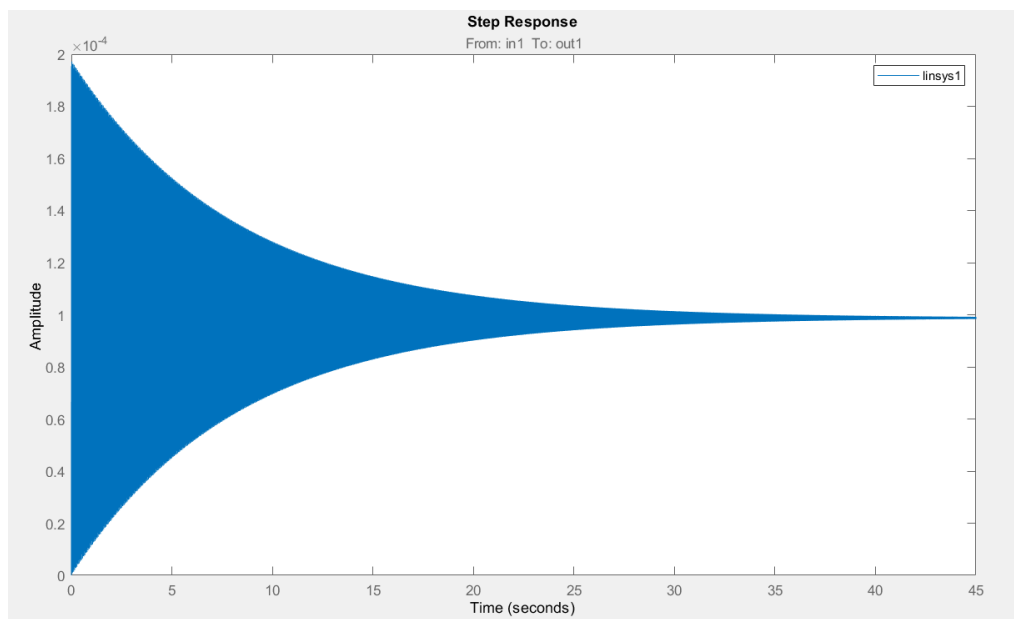
$$W(S) = \frac{K_{с\text{ нар}}^*}{D_{нар}S} \cdot \frac{1}{T_{п\text{ нар}}S + 1} = \frac{3.48 \cdot 10^7}{56.5 \cdot S} \cdot \frac{1}{4.12S + 1}$$

ЛАФЧХ такой системы имеет вид:



ЛФЧХ не пересекает уровень -180° , а лишь стремится к нему. Запас по фазе в данном случае стремится к нулю ($\Delta\varphi \rightarrow 0$), а запас по амплитуде, напротив, стремится к бесконечности ($\Delta L \rightarrow 0$). В целом это говорит о том, что система находится на границе устойчивости и требует коррекции. Это можно подтвердить экспериментально построив график переходного процесса средствами компьютерного моделирования.

Переходной процесс нескорректированной системы:



Чтобы увеличить запас по фазе, необходимо ввести корректирующее дифференцирующее звено $W_{\text{дифф}}(S) = T_{1\text{нар}}S + 1$. Если правильно выбрать

постоянные времени $T_{1нар}$ и $T_{2нар}$, мы обеспечим необходимый запас устойчивости и, тогда на частоте среза ЛАЧХ будет пересекать ось 0 дБ под наклоном -20 дБ/дек. Введением аperiodического звена $W_{анер}(S) = \frac{1}{T_{2нар}S+1}$ на несколько большей частоте вернем систему в исходное состояние. Также для подавления возникающих в контуре обратной связи высокочастотных помех введем ещё одно аperiodическое звено $W_{nn}(S) = \frac{1}{T_{3нар}S+1}$.

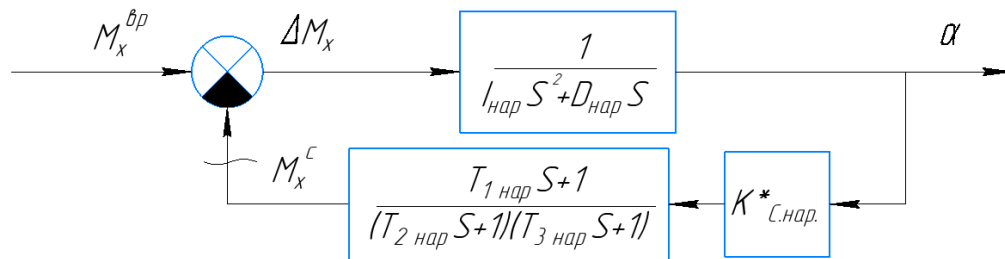
Постоянные времени корректирующего звена:

$$T_{1нар} = 0.004 \text{ с}; T_{2нар} = 0.0004 \text{ с}; T_{3нар} = 0.00004 \text{ с}.$$

Передаточная функция такого корректирующего звена будет иметь вид:

$$W_{кор.вн.}(S) = \frac{T_{1нар}S + 1}{T_{2нар}S + 1} \cdot \frac{1}{T_{3нар}S + 1} = \frac{0.004S + 1}{0.0004S + 1} \cdot \frac{1}{0.00004S + 1}$$

Структурная схема канала с введенной коррекцией:

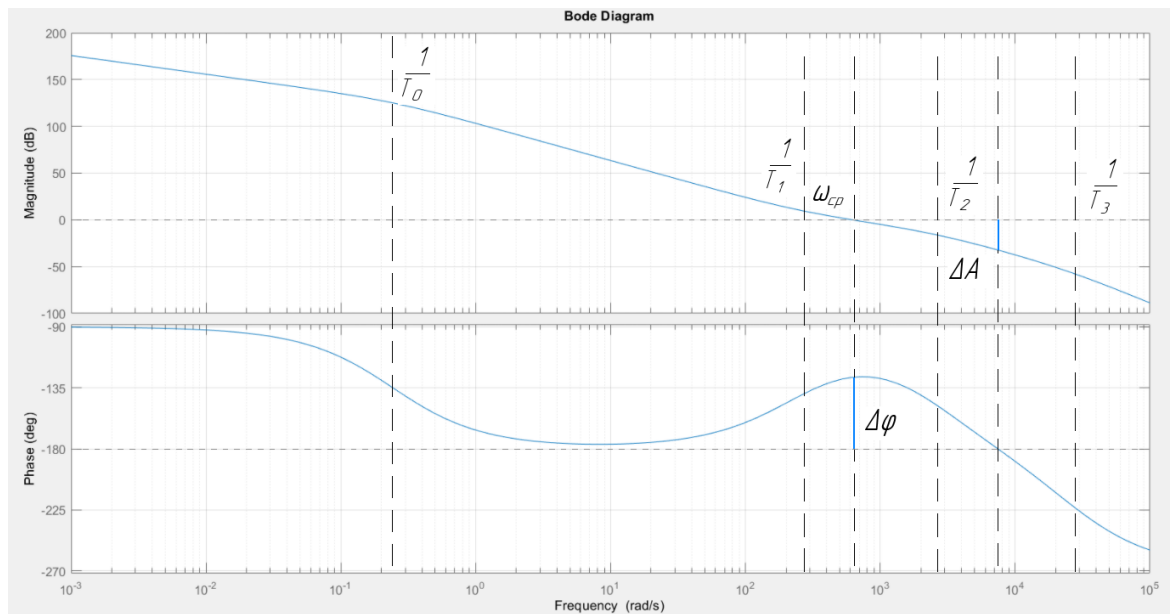


Передаточная функция разомкнутой скорректированной системы:

$$W_{скор.}(S) = \frac{K_{с нар}^*}{D_{нар}S} \cdot \frac{1}{T_{п нар}S + 1} \cdot \frac{T_{1 нар}S + 1}{T_{2 нар}S + 1} \cdot \frac{1}{T_{3 нар}S + 1}$$

$$W_{скор.}(S) = \frac{3.48 \cdot 10^7}{56.5 \cdot S} \cdot \frac{1}{4.12 S + 1} \cdot \frac{0.004S + 1}{0.0004S + 1} \cdot \frac{1}{0.00004 S + 1}$$

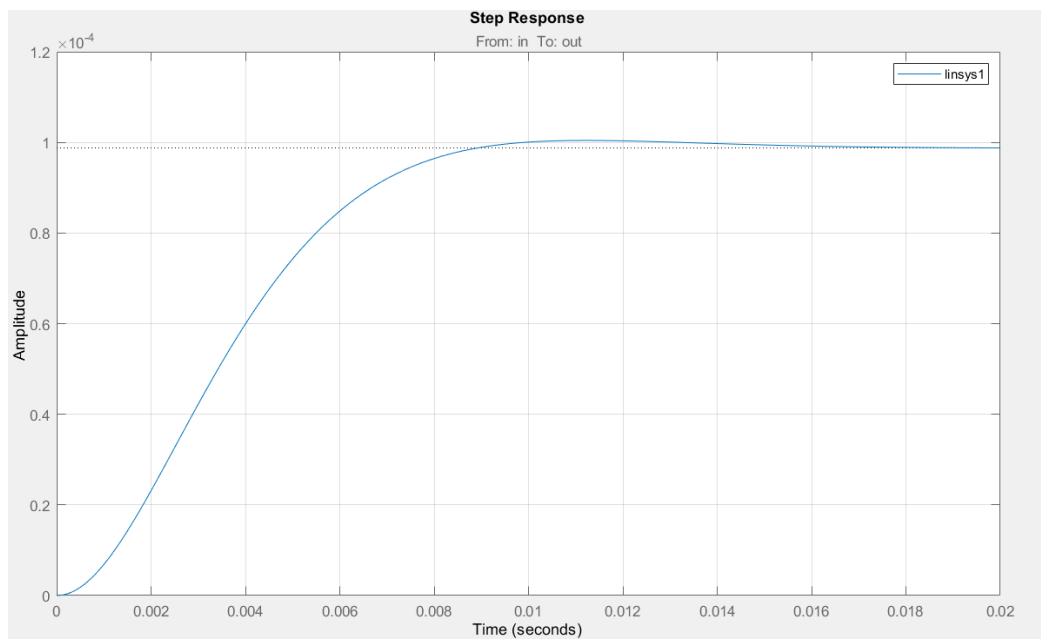
ЛАФЧХ скорректированной системы имеет вид:



В результате корректировки получены следующие запасы:

1. По фазе $\Delta\varphi = 53^\circ$
2. По амплитуде $\Delta L = 31.6$ дБ

Переходный процесс скорректированной системы:



Переходной процесс устойчив. Время пп $t_{п_вн} = 0.012$ с.

Величина перерегулирования $\sigma = 1.5\%$

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что корректировка достигла своей цели.

Поскольку при построении переходного процесса на вход системы подавалось ступенчатое воздействие по величине равное суммарному

возмущающему моменту, установившееся значение будет равно ошибке стабилизации.

Таким образом, полученная ошибка стабилизации по внутренней оси:

$$\alpha_{\text{уст}} = 0.000099 \text{ рад} = 0.34' < \Delta\alpha$$

Так как установившееся значение ошибки меньше заданной по ТЗ, можно утверждать, что требования ТЗ по точности выполнены.