



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 «Информатика и системы управления» _____

КАФЕДРА _____ ИУ-2 «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» _____

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К НИРС
по высокоточным системам навигации

НА ТЕМУ:
Курсовой гироскоп с динамическим демпфером
по оси наружной рамки

Вариант №10

Студент _____ ИУ1-72 _____ 20/12/2020 _____ Кочнов А.А..
(Группа) (Подпись, дата) (И.О. Фамилия)

Руководитель курсового проекта _____ 20/12/2020 _____ Щеглова Н.Н..
(Подпись, дата) (И.О. Фамилия)

Консультант _____ _____ Щеглова Н.Н..
(Подпись, дата) (И.О. Фамилия)

Кафедра _____ Факультет _____ ИУ _____
ИУ2 _____

З А Д А Н И Е

на курсовую работу

по курсу _____ Высокоточные системы навигации _____)

Студент _____ Кочнов А.А. _____ ИУ1-72 _____
(фамилия, инициалы) (индекс группы)

Руководитель _____ Щеглова Н.Н. _____
(фамилия, инициалы)

Срок выполнения проекта по графику: 10 % к 3_нед., 50 % к 7_нед., 75 % к 10_нед.,
100% к 15_нед.

Защита работы2020г.

I. Тема работы _____ Курсовой гироскоп с динамическим демпфером по оси наружной рамки.

II. Техническое задание _____ Исследовать динамическую систему с динамическим демпфером и сопутствующей нелинейностью:

1. Пояснить назначение и принцип работы прибора.
2. Записать уравнения движения с сопутствующей нелинейностью.
3. Для идеализированной линейной системы преобразовать исходные уравнения к векторно-матричной форме и записать уравнения для передаточной функции гиросистемы:
а) как объекта управления;
б) как объекта стабилизации.
4. Осуществить оптимизацию параметров упруго-диссипативной связи для динамических элементов гиросистемы по критерию $\min_{\omega} |W(j\omega)|$.
5. Построить АЧХ механической части гиросистемы с оптимальными параметрами μ и C .
6. Осуществить синтез цепи обратной связи на условия заданной статической точности и необходимых запасов устойчивости.
7. Построить переходной процесс по интересующим координатам при действии постоянного возмущающего момента.
8. Построить АЧХ податливости замкнутой гиросистемы.
9. Построить АЧХ динамического коэффициента подавления колебаний.
10. Построить структурную схему гиросистемы с сопутствующей нелинейностью и преобразовать ее к одноконтурной, выделив нелинейный элемент и приведенную линейную часть. Записать выражение для передаточной функции приведенной линейной части.
11. Обосновать возможность применения метода гармонической линеаризации. Построить ЛАЧХ приведенной линейной части.
12. Осуществить гармоническую линеаризацию нелинейной системы. Записать условие амплитудно-фазового баланса.
13. Решить уравнение амплитудно-фазового баланса на комплексной плоскости. Построить АФХ приведенной линейной части и инверсную характеристику гармонически линеаризованного нелинейного элемента.
14. Численным методом решить нелинейные уравнения, полученные в п.1. Записать переходный процесс. Определить параметры автоколебаний.
15. Сравнить результаты, полученные в п. 13 и п.14.
16. Сделать выводы о влиянии сопутствующей нелинейности на устойчивость гиросистемы.

III. Объем и содержание проекта (графических работ _____ нет _____ листов
формата А1, расчетно-пояснительная записка на _____ 30-40 _____ листах формата А4) _____

Студент

Руководитель проекта.....

Дата выдачи «...3...»...сентября..2020.г.

Параметры механической части:

Момент инерции системы относительно оси y $A_1 = 50 \text{ гсмс}^2$;

Момент инерции системы относительно оси x $B = 10 \text{ гсмс}^2$

Момент инерции маховика динамического демпфера относительно оси y $A_2 = 10 \text{ гсмс}^2$;

Кинетический момент гироскопа..... $H = 10^4 \text{ гсмс}$;

Статическая ошибка по углу β $\beta^* \leq 30''$;

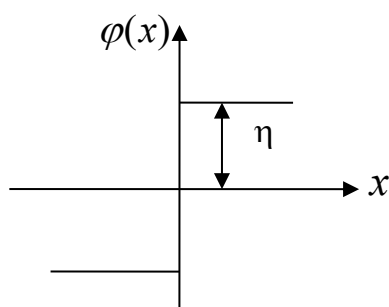
Статическая ошибка по углу α $\alpha^* \leq 10''$;

Возмущающий момент..... $M_a = 100 \text{ гсм}$.

Сопутствующая нелинейность:

$\varphi(x)$ – сухое трение в оси наружной рамки.

$\eta = 10 \text{ гсм}$



РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Ч.1.
2. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч.2.
3. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации.
4. Солодовников В.В. Теория автоматического управления техническими системами.
5. Черников С.А. Динамика систем гироскопической стабилизации.
6. Попов Е.П. Учебное пособие для ИУ1 по гармонической линеаризации.

Оглавление

1.	Назначение и принцип работы прибора	6
2.	Уравнения движения ГПК с соответствующей нелинейностью	7
3.	Расчёт выражения для передаточных функций гиросистемы как объекта управления и как объекта стабилизации . . .	7
4.	Оптимизация параметров упруго-диссипативной связи динамических элементов гиросистемы по критерию $\min \max W(j\omega) $. . .	8
5.	АЧХ механической части гиросистемы с оптимальными параметрами μ и C	11

Используемые обозначения и сокращения

Сокращения

ДД	динамический демпфер
ПФ	передаточная функция
ОДЗ	область допустимых значений (функции)

Обозначения

x, y	оси внутренней и наружной рамок соответственно
α, β	углы поворота вокруг осей y и x
$\alpha_d = \alpha_2$	угол поворота ДД по оси y
$A = A_1$	суммарный момент инерции системы относительно оси наружной рамки y
$A_{\text{ДД}} = A_2$	момент инерции маховика динамического демпфера относительно оси y
B	суммарный момент инерции системы относительно оси внутренней рамки x
H	кинематический момент ротора гироскопа
μ_α, μ_β	коэффициенты вязкого трения в осях наружной и внутренней рамок
$K_{\text{ОС}}$	коэффициент обратной связи
M_α, M_β	внешние моменты, действующие на систему по осям y и x
$\varphi(\dot{\alpha}), \eta$	функция и коэффициент нелинейности сухого трения в оси наружной рамки
C, μ	коэффициенты упругой и диссипативной связей
$M_{\text{ДД}}$	момент упруго-диссипативного взаимодействия кожуха курсового гироскопа с инерционной массой динамического демпфера

1. Назначение и принцип работы прибора

Заданный курсовой прибор является гиropolукомпасом, так как предназначен для отслеживания заданного азимута. Гиropolукомпас (ГПК) – курсовой гироскопический прибор, построенный на основе трехстепенного астатического гироскопа, имеет системы горизонтальной и азимутальной коррекции. Кинематическая схема ГПК приведена на рисунке 1. Система горизонтальной коррекции состоит из ЧЭ – датчика угла ДУ₁, расположенного по оси внутренней рамки гироскопа, и исполнительного элемента – электродвигателя ЭДВ, создающего момент относительно оси наружной рамки Oy_1 . Базовая система координат $O\xi\eta\zeta$ - географическая.

При отклонении вектора H от плоскости горизонта на угол β на выходе ДУ₁ появляется напряжение $U = K_{\text{ДУ}}\beta$ при $\beta < \beta_{\text{п}}$. ЭДВ при наличии тока создает момент $M_{\text{ЭДВ}} = E\beta$ относительно оси наружной рамки Oy_1 , из-за чего возникает прецессия гироскопа $\dot{\beta} = \frac{M_{\text{ЭДВ}}}{H} = \frac{E\beta}{H} = \varepsilon\beta$.

Датчик момента ДМ азимутальной коррекции управляется напряжением, поступающим с пульта, и компенсирует величину $\omega_{\zeta} \approx U \sin(\varphi)$. Момент ДМ азимутальной коррекции $M_{\text{ДМ}_2} \approx H\omega_{\zeta} = HU/\sin(\varphi)$. Система азимутальной коррекции позволяет скомпенсировать постоянную составляющую ω_0 собственной скорости прецессии. Поэтому на пульте устанавливаются 2 потенциометра со шкалами φ (в градусах – широта), и ω_0 (гр/ч). Величину ω_0 определяют по показаниям ГПК в сравнении с показаниями других средств (GPS, магнитный компас) на стоянке аэродрома или в прямолинейном полете с постоянной линейной скоростью. Момент азимутальной коррекции с учетом ω_0 : $M_{\text{ДМ}_2} \approx H(U \sin(\varphi) + \omega_0)$.

ГПК предназначены для отслеживания азимута (заданного направления) и находят широкое применение в авиации и наземных объектах.

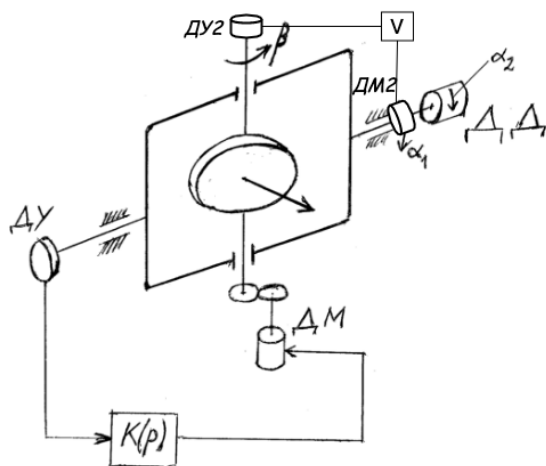


Рисунок 1 — Общий вид системы

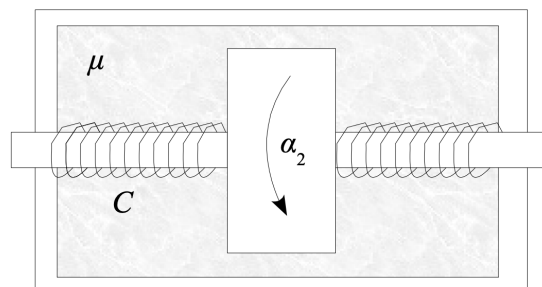


Рисунок 2 — Демпфер

2. Уравнения движения ГПК с соответствующей нелинейностью

1) Уравнение движения наружной рамки:

$$A\ddot{\alpha} + M_{\text{ДД}} - H\dot{\beta} - K_{\text{OC}}\beta + \varphi(\dot{\alpha}) = M_{\alpha}$$

2) Уравнение движения внутренней рамки

$$B\ddot{\beta} + \mu\dot{\beta} + H\dot{\alpha} = M_{\beta}$$

3) Уравнение движения динамического демфера

$$A_{\text{д}}\ddot{\alpha}_{\text{д}} - M_{\text{ДД}} = M_{\alpha_{\text{д}}}$$

4) Момент динамического демфера

$$M_{\text{ДД}} = \mu(\dot{\alpha} - \dot{\alpha}_{\text{д}}) + C(\alpha - \alpha_{\text{д}})$$

3. Расчёт выражения для передаточных функций гиросистемы как объекта управления и как объекта стабилизации

Запишем уравнения движения без учета трения в опорах (и, соответственно, нелинейности):

$$\begin{cases} A\ddot{\alpha} + \mu(\dot{\alpha} - \dot{\alpha}_{\text{д}}) + C(\alpha - \alpha_{\text{д}}) - H\dot{\beta} - K_{\text{OC}}\beta = M_{\alpha}, \\ B\ddot{\beta} + H\dot{\alpha} = M_{\beta}, \\ A_{\text{д}}\ddot{\alpha}_{\text{д}} - \mu(\dot{\alpha} - \dot{\alpha}_{\text{д}}) - C(\alpha - \alpha_{\text{д}}) = M_{\alpha_{\text{д}}} \end{cases} \quad (1)$$

Преобразуем систему уравнений по Лапласу:

$$\begin{cases} A\alpha s^2 + \mu s(\alpha - \alpha_{\text{д}}) + C(\alpha - \alpha_{\text{д}}) - H\beta s - K_{\text{OC}}\beta = M_{\alpha}, \\ B\beta s^2 + H\alpha s = M_{\beta}, \\ A_{\text{д}}\alpha_{\text{д}} s^2 - \mu s(\alpha - \alpha_{\text{д}}) - C(\alpha - \alpha_{\text{д}}) = M_{\alpha_{\text{д}}}, \end{cases} \quad (2)$$

и запишем в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} As^2 + \mu s + C & -Hs - K_{\text{OC}} & -\mu s - C \\ Hs & Bs^2 & 0 \\ -\mu s - C & 0 & A_{\text{д}}s^2 + \mu s + C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \alpha_{\text{д}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\alpha} \\ M_{\beta} \\ M_{\alpha_{\text{д}}} \end{bmatrix}.$$

Разрешим полученную систему уравнений относительно вектора $[\alpha \ \beta \ \alpha_d]^T$:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \alpha_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{M_\alpha}^\alpha & W_{M_\beta}^\alpha & W_{M_{\alpha_d}}^\alpha \\ W_{M_\alpha}^\beta & W_{M_\beta}^\beta & W_{M_{\alpha_d}}^\beta \\ W_{M_\alpha}^{\alpha_d} & W_{M_\beta}^{\alpha_d} & W_{M_{\alpha_d}}^{\alpha_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_\alpha \\ M_\beta \\ M_{\alpha_d} \end{bmatrix}.$$

Заметим, что искомая матрица передаточных функций - ни что иное как обратная матрица системы уравнений. Получим её с помощью возможностей символьного вычисления Matlab. Для дальнейшей работы необходимы лишь две передаточных функции, их и запишем:

1) системы как объекта управления

$$W_{M_\alpha}^\beta = \frac{-H(A_d s^2 + \mu s + C)}{\Delta},$$

2) системы как объекта стабилизации

$$W_{M_\alpha}^\alpha = \frac{Bs(A_d s^2 + \mu s + C)}{\Delta},$$

Здесь Δ - определитель матрицы системы (после сокращения одной s):

$$\begin{aligned} \Delta = & AA_d B s^5 + \mu B(A + A_d) s^4 + (A_d H^2 + BC(A + A_d)) s^3 + \\ & + H(A_d K_{OC} + H\mu) s^2 + H(CH + K_{OC}\mu) s + CH K_{OC}. \end{aligned}$$

Получили передаточные функции системы как объекта управления и объекта стабилизации в общем виде.

4. Оптимизация параметров упруго-диссипативной связи динамических элементов гиросистемы по критерию $\min \max |W(j\omega)|$

Проведём оптимизацию параметров μ и C для ДД. Для этого рассмотрим разомкнутую ПФ курсового гироскопа как объекта стабилизации (принимая $K_{OC} = 0$).

Запишем полное выражение вышеназванной ПФ с указанными допущениями:

$$W_{M_\alpha}^\alpha = \frac{Bs(A_d s^2 + \mu s + C)}{AA_d B s^5 + \mu B(A + A_d) s^4 + (A_d H^2 + BC(A + A_d)) s^3 + H^2 \mu s^2 + CH^2 s} \quad (3)$$

Эта ПФ обладает замечательным свойством: при одном значении C , но разных μ , на АЧХ будут существовать две инвариантные точки (все АЧХ пересекаются в них). При изменении C эти точки будут перемещаться.

Целью оптимизации является минимизация максимумов АЧХ ПФ, а именно минимизация резонансных пиков АЧХ. Таким образом, учитывая особенности нашей ПФ, оптимизация сводится к следующим двум этапам:

- Поиск значения C^* , при котором инвариантные точки будут располагаться на одном уровне, тем самым обеспечивается минимальное значение амплитуды в обеих инвариантных точках;
- Поиск значения μ^* , обеспечивающего минимальное значение резонансных пиков.

Поиск значения C^*

Условие инвариантности имеет следующий вид:

$$|W(j\omega)|_{\mu=0} = |W(j\omega)|_{\mu=\infty}$$

После раскрытия модуля получаем:

$$W(j\omega)_{\mu=0} = -W(j\omega)_{\mu=\infty}$$

С помощью Matlab вычислим пределы:

$$\begin{aligned} \frac{B(A_d(j\omega)^2 + C)}{AA_d B(j\omega)^4 + (A_d H^2 + BC(A + A_d))(j\omega)^2} &= \frac{-B}{B(A + A_d)(j\omega)^2 + H^2} \\ \frac{B(A_d \omega^2 - C)}{AA_d B \omega^4 - (A_d H^2 + BC(A + A_d))\omega^2 + CH^2} &= \frac{B}{H^2 - B(A + A_d)\omega^2} \quad (4) \end{aligned}$$

Решаем уравнение относительно C . В результате получаем четыре корня. Два из них отрицательные и не удовлетворяют ОДЗ. Два других же вполне соответствуют инвариантным точкам ω_1 и ω_2 :

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{A_d H^2 + BC(A + A_d) \pm \sqrt{B^2 C^2 (A^2 + A_d^2) + 2AA_d BC^2 - 2AA_d B C H^2 + A_d^2 H^4}}{A_d B (2A + A_d)}}$$

Подставив численные значения, получаем следующие функции:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{10^6 + 0,6C \pm \sqrt{0,36C^2 - 10^6 C + 10^{12}}}{11}}$$

Известно, что в инвариантных точках значения амплитуд равны, что можно записать как

$$|W(j\omega)|_{\mu=0}^{\omega=\omega_1} = |W(j\omega)|_{\mu=0}^{\omega=\omega_2}$$

Подставим сюда ПФ из правой части (4) и раскроем модуль:

$$\begin{aligned} & \frac{B(A_d\omega_1^2 - C)}{AA_dB\omega_1^4 - (A_dH^2 + BC(A + A_d))\omega_1^2 + CH^2} = \\ & = \frac{B(A_d\omega_2^2 - C)}{AA_dB\omega_2^4 - (A_dH^2 + BC(A + A_d))\omega_2^2 + CH^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Имея значения частот от С, решим уравнение (5) относительно С. Получаем $C^* = \frac{12500000}{9} \approx 13,89 \cdot 10^5$.

С учетом полученного значения рассчитаем ω_1, ω_2 :

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 465,5 & \omega_2 &= 341,2 \\ \lg \omega_1 &= 2,668 & \lg \omega_2 &= 2,53 \end{aligned}$$

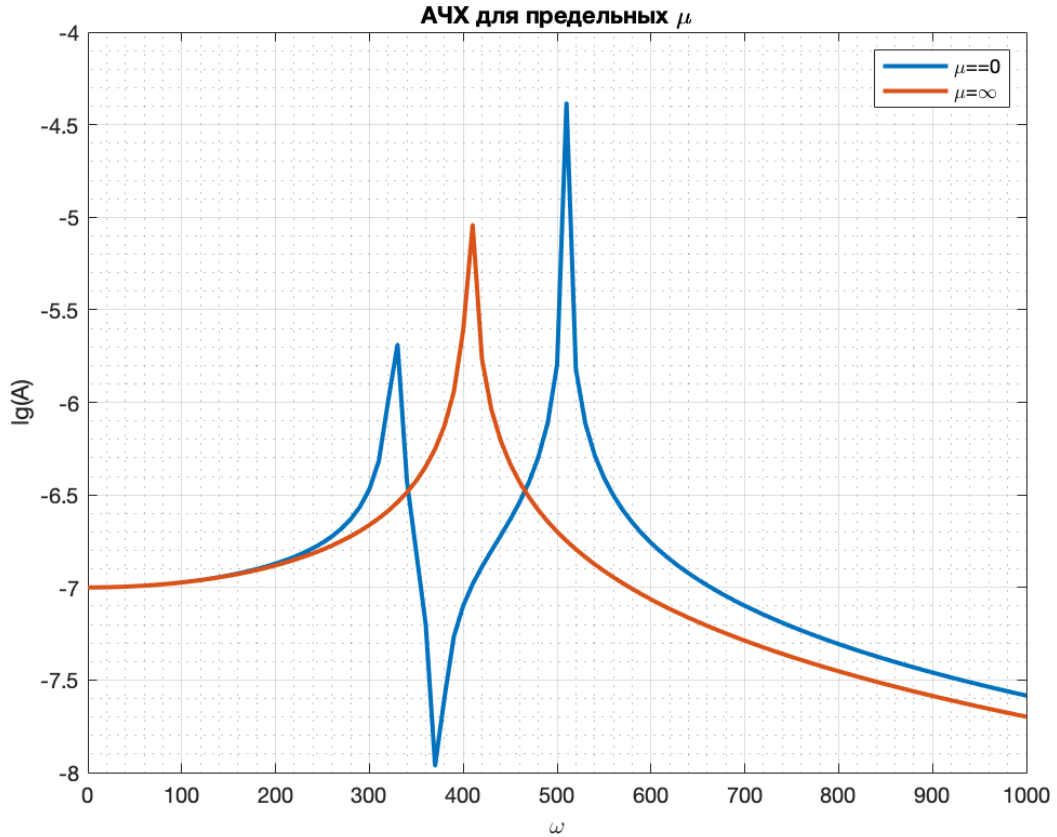


Рисунок 3 — АЧХ системы для оптимального C^* и предельных μ

Поиск значения μ^*

Для определения значения μ^* следует определить значения μ_1 и μ_2 , при которых в каждой из инвариантных точек будет экстремум АЧХ (это обеспечивает минимум «всплеска» АЧХ в соответствующих инвариантных точках). Тогда

$$\mu^* = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

Запишем условия поиска:

$$\begin{cases} \frac{\partial |W(j\omega)|}{\partial \omega} \big|_{\omega=\omega_1} = 0, \\ \frac{\partial |W(j\omega)|}{\partial \omega} \big|_{\omega=\omega_2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$W(j\omega) = \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)},$$

где

$$\begin{cases} M(j\omega) = B(A_d(j\omega)^2 + \mu(j\omega) + C), \\ N(j\omega) = AA_d B(j\omega)^4 + \mu B(A + A_d)(j\omega)^3 + \\ + (A_d H^2 + BC(A + A_d))(j\omega)^2 + H^2 \mu j\omega + CH^2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} M(j\omega) = B(-A_d \omega^2 + j\mu \omega + C), \\ N(j\omega) = AA_d B \omega^4 - \mu B(A + A_d) j \omega^3 - \\ - (A_d H^2 + BC(A + A_d)) \omega^2 + H^2 \mu j \omega + CH^2 \end{cases} \quad (8)$$

Для каждого ω решим уравнение. Получим:

$$\begin{cases} \mu_1 = 1767,26 \\ \mu_2 = 1954,77 \end{cases} \quad (9)$$

Тогда $\mu^* = 1861,01$.

Построим АЧХ для этого значения (см рис. 4).

5. АЧХ механической части гиросистемы с оптимальными параметрами μ и C

Построим АЧХ системы на основе функции (3), куда подставим найденные оптимальные параметры (см рис. 4).

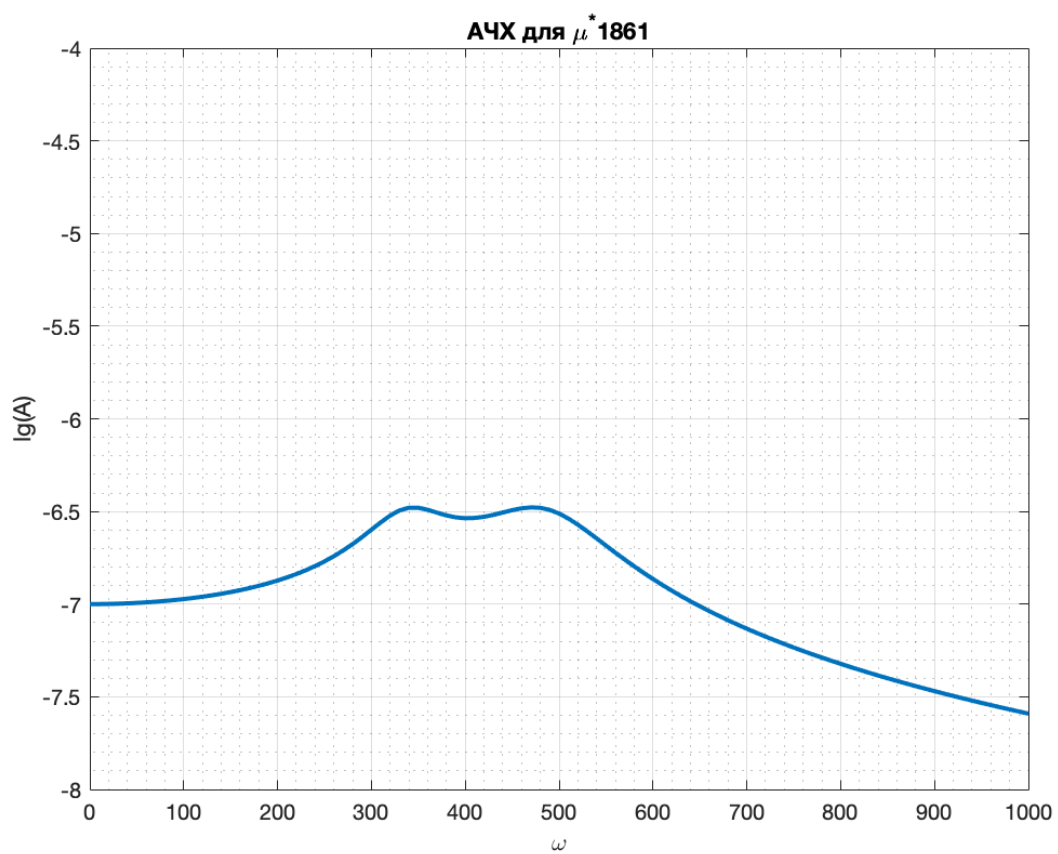


Рисунок 4 — АЧХ системы для оптимальных C^* и μ^*