



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»

Институт № 3

Кафедра № 301

Курсовая работа

по дисциплине

«Основы теории автоматического управления»

на тему:

**«Исследование динамики и синтез параметров САУ боковым движением
самолета»**

Выполнил: студент гр. МЗО-301Б-20

_____/Терентьев И.В.

Принял: доцент кафедры 301

_____/Белоногов В.Д.

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Задание.....	3
Технические требования к системе	5
1 Анализ динамики ОУ и выводы о динамических свойствах объекта	6
2 Корни характеристического уравнения.	9
3 Управляемость и наблюдаемость системы.	10
4 Выводы о динамических свойствах объекта и необходимости улучшения характеристик.....	11
5 Исследование закона управления плоским движением по рысканию.	12
6 Построение областей устойчивости по $K_{11}(\omega_x)$, $K_{12}(\beta)$ Error! Bookmark not defined.	
7 Выбор параметров закона управления в канале элеронов, обеспечивающего заданные требования.....	22
8 Выбор коэффициента K_x обратной связи от ручки летчика	25
9 Проверка технических требований к полной системе.....	28
10 Анализ динамики нелинейной системы с учетом нелинейности.....	29
Вывод	34
Список использованной литературы.....	35

Задание

Заданы:

- уравнения движения и параметры уравнений (дифф. ур. 3-го порядка)
- уравнения исполнительных устройств

Заданы требования к системе АУ.

Требуется:

- выбрать структуру и параметры закона управления

$$\begin{cases} \dot{\omega}_y = a_{11}\omega_y + a_{12}\beta + a_{13}\omega_x + b_{11}\delta_{\text{н}} + b_{12}\delta_{\text{э}} \\ \dot{\beta} = a_{21}\omega_y + a_{22}\beta + a_{23}\omega_x + b_{21}\delta_{\text{н}} + b_{22}\delta_{\text{э}} \\ \dot{\omega}_x = a_{31}\omega_y + a_{32}\beta + a_{33}\omega_x + b_{31}\delta_{\text{н}} + b_{32}\delta_{\text{э}} \end{cases}$$

$$X = \begin{pmatrix} \omega_y \\ \beta \\ \omega_x \end{pmatrix}, \quad \Delta = \begin{pmatrix} \delta_{\text{н}} \\ \delta_{\text{э}} \end{pmatrix}$$

$\dot{X} = AX + B\Delta$, матрицы А и В заданы в исходных данных.

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{\text{н}} = -\frac{\delta_{\text{н}}}{T_{\text{н}}} + \frac{U_{\text{н}}}{T_{\text{н}}} \\ \dot{\delta}_{\text{э}} = -\frac{\delta_{\text{э}}}{T_{\text{э}}} + \frac{U_{\text{э}}}{T_{\text{э}}} \end{cases}$$

На рисунке 1 изображена схема системы.

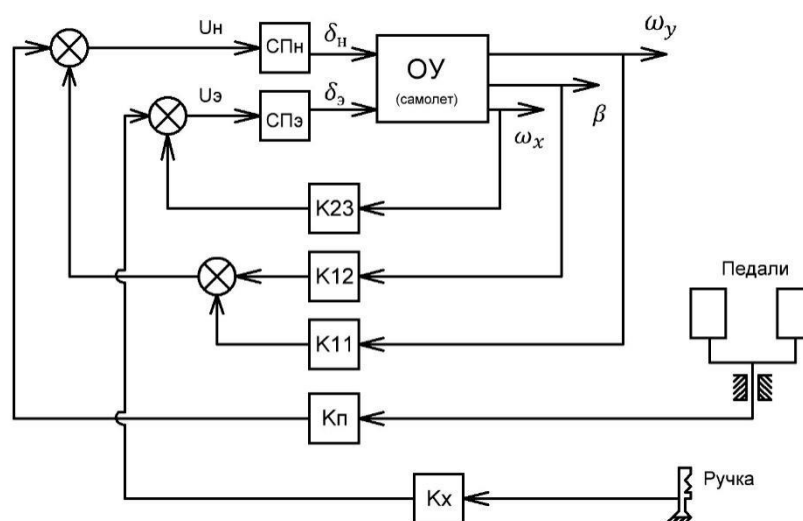


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема системы управления боковым движением самолета

Начальные данные:

$$A = \begin{pmatrix} -0.7 & -18.3 & -0.06 \\ 1 & -0.26 & 0.033 \\ -1.05 & -48 & -2.65 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} -3.2 & 0.75 \\ -0.009 & 0 \\ -3.4 & -4.7 \end{pmatrix}$$

$$T_z = 0.12$$

$$T_n = 0.12$$

Технические требования к системе:

1. Затухание короткопериодических колебаний при управлении по ω_y и β и при свободном движении должно быть не менее, чем в 10 раз за период колебаний.
2. Собственная частота колебаний по ω_y и β должна быть не менее $\omega_0 = 4$.
3. Время переходного процесса при управлении ω_x от ручки летчика не должно превышать $t^* = 1$ сек, при монотонном характере процесса.
4. Расход ручки в установившемся режиме управления по ω_x должен соответствовать величине R^* .
5. Параметры закона управления должны обеспечивать не менее, чем двукратный запас устойчивости по любому коэффициенту K .

1 Анализ динамики ОУ и выводы о динамических свойствах объекта

Построим переходный процесс объекта при отклонении элеронов на 5° .

Переходные процессы по каждой координате отображены на рисунке 2.

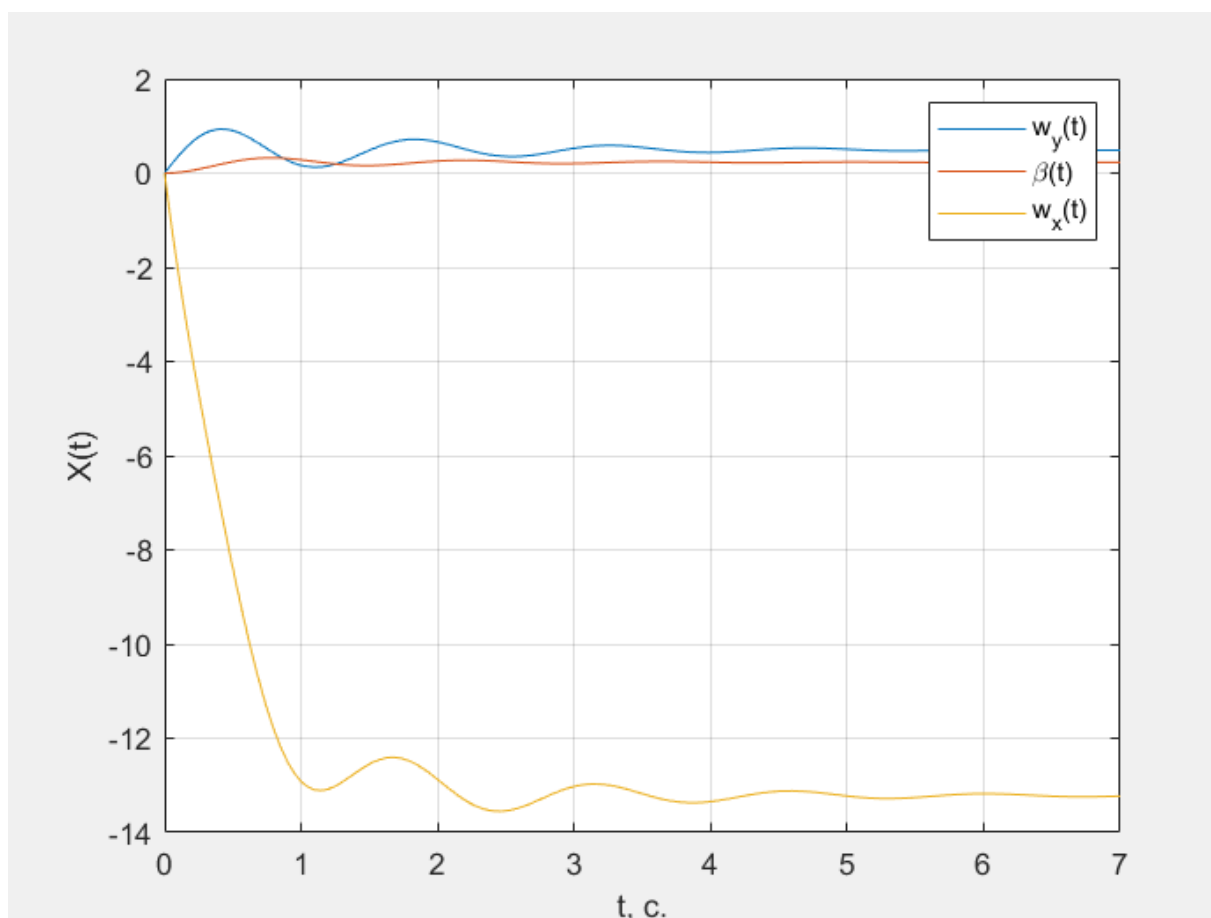


Рисунок 2. Переходные процессы при отклонении элеронов на 5° .

Построим переходный процесс объекта при ступенчатом отклонении руля направления на 5° . Переходные процессы отображены на рисунке 3.

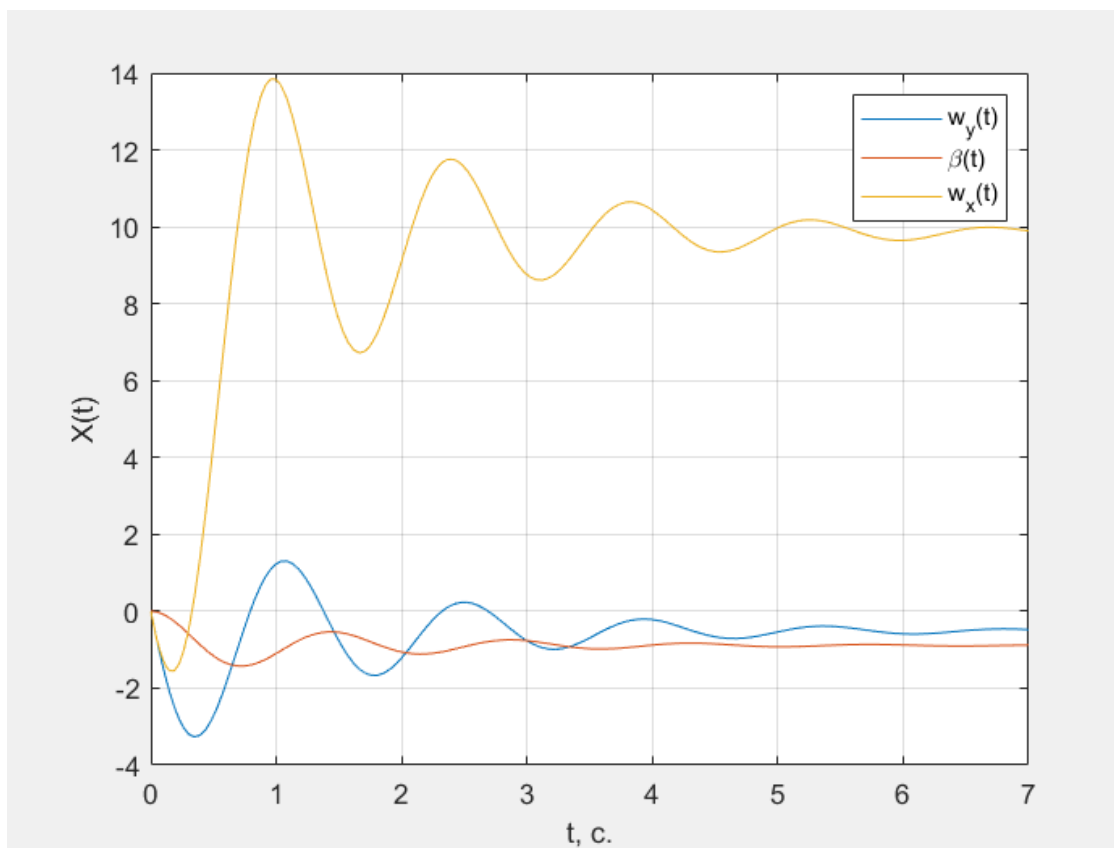


Рисунок 3. Переходные процессы при отклонении руля направления на 5° .

Построим п. процесс свободного движения в системе при заданных начальных условиях ($\omega_{y0} = 0$, $\beta_0 = 5^\circ$, $\omega_{x0} = 0$). Полученные переходные процессы отображены на рисунке 4.

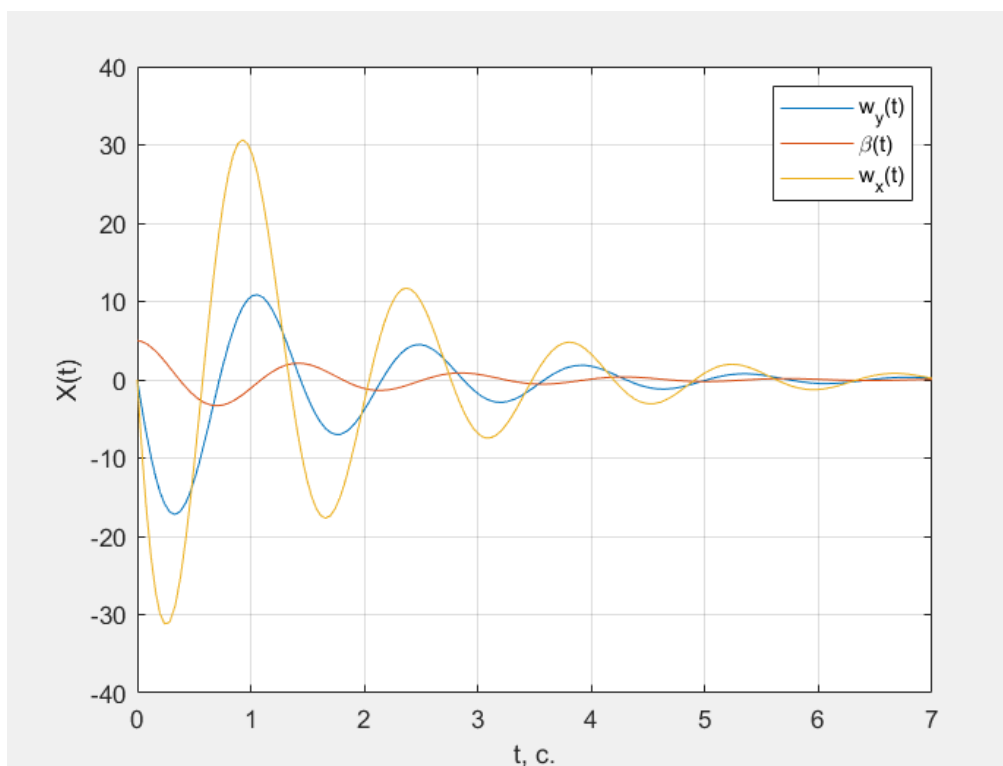


Рисунок 4. Переходные процессы свободного движения в системе при заданных начальных условиях ($\beta_0 = 5^\circ$)

2 Корни характеристического уравнения

Характеристическое уравнение:

$$\det(E * \lambda - A) = 0$$

$$\begin{vmatrix} \lambda + 0.7 & 18.3 & -0.06 \\ -1 & s + 0.19 & 0.033 \\ 1.05 & 48 & \lambda + 2.65 \end{vmatrix} = \lambda^3 + 3.61 * \lambda^2 + 22.547 * \lambda + 46.555625 = 0$$

Корни характеристического уравнения:

$$\lambda_1 = -0.6181 + 4.3853i$$

$$\lambda_2 = -0.6181 - 4.3853i$$

$$\lambda_3 = -2.3738$$

Действительная часть корней характеристического уравнения меньше нуля, значит система устойчива.

3 Управляемость и наблюдаемость системы

$$U_y = (B \mid A * B \mid A^2 * B)$$

$$U_y$$

$$= \left(\begin{array}{cc|cc|cc} -3.2 & 0.75 & 2.6087 & -0.243 & 55.824868 & -10.912395 \\ -0.009 & 0 & -3.30986 & 0.5949 & 3.8917296 & -0.0126465 \\ -3.4 & -4.7 & 12.802 & 11.6675 & 122.208845 & -59.218925 \end{array} \right)$$

Управляемость по

$$1 \text{ входу: } \left| \begin{array}{ccc} -3.2 & 2.6087 & 55.824868 \\ -0.009 & -3.30986 & 3.8917296 \\ -3.4 & 12.802 & 122.208845 \end{array} \right| = 787.5038 \neq 0$$

Система управляема по первому входу.

$$2 \text{ входу: } \left| \begin{array}{ccc} 0.75 & -0.243 & -10.912395 \\ 0 & 0.5949 & -0.0126465 \\ -4.7 & 11.6675 & -59.218925 \end{array} \right| = -56.8369391205 \neq 0$$

Система управляема по второму входу.

Делаем вывод, что система полностью управляема.

Составим матрицу наблюдаемости для системы:

$$H = (C^T \mid A^T * C^T \mid A^{T^2} * C^T)$$

$$C = (1 \quad 1 \quad 1)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & -19.06 & 2.2981 \\ 1 & 0.773 & -20.9667 \\ 1 & -51.7 & 119.1085 \end{pmatrix}$$

$$\det(H) = 1557 \neq 0$$

Матрица наблюдаемости имеет полный ранг, следовательно, система полностью наблюдаема.

4 Выводы о динамических свойствах объекта и необходимости улучшения характеристик

Так как действительная часть корней характеристического уравнения меньше 0, то можно сделать вывод о том, что система устойчива.

Рассчитаем собственную частоту системы:

$$\omega_c = \sqrt{(-s_1)(-s_2)} \approx 4.43 \text{ рад/с}$$

Таким образом, проанализировав реакцию данной системы на ступенчатые сигналы, можно сделать вывод о том, что требования к системе не выполняются. Собственная частота процессов меньше требуемой собственной частоты ($\omega_{тр} \geq 4.5$), затухание колебаний составляет $\varepsilon = 1 \div 3$, тогда как требуется $\varepsilon = 10$.

Необходима корректировка параметров системы.

5 Исследование закона управления плоским движением по рысканию

Выберем параметры закона управления: коэффициент передачи по заданным требованиям.

Требования к системе:

$$\text{Затухание колебаний: } \alpha = \frac{A_1}{A_2} = 10$$

$$\text{Собственная частота } \omega_0 \geq 4$$

Уравнения динамики плоского движения:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_y = a_{11}\omega_y + a_{12}\beta + b_{11}\delta_H \\ \dot{\beta} = a_{21}\omega_y + a_{22}\beta + b_{21}\delta_H \\ \dot{\delta}_H = -\frac{\delta_H}{T_H} + \frac{U_H}{T_H} \end{cases}$$

$$T_H = T_{\beta} = 0.12 \text{ с}$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} \\ a_{12} & a_{22} & b_{21} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_H} \end{pmatrix}, B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_H} \end{pmatrix}, C_1 = (1 \quad 0 \quad 0)$$

Далее выберем желаемые корни характеристического уравнения из условия выполнения требований по быстродействию системы:

$\xi = 0.7$ – определяет характер затухания колебаний;

$\omega_0 = 4.5$ – собственная частота.

Составим характеристический многочлен, используя условия:

$$(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)(s + 10)$$

$$(s^2 + 6.3s + 20.25)(s + 10)$$

Характеристическое уравнение

$$s^3 + 16.3s^2 + 83.25s + 202.5 = 0, \text{ корнями которого будут:}$$

$$s_{1,2} = -3.15 \pm 3.2136i, \quad s_3 = -10$$

По формуле Аккермана получим коэффициенты обратной связи К:

$$K = -(0 \quad 0 \quad 1) * U^{-1} * (A^3 + a_2^* A^2 + a_1^* A + a_0^* E), \text{ где}$$

U^{-1} – обратная матрица управляемости

Получаем коэффициенты:

$$K_{\omega_y} = 1.8862, K_{\beta} = -3.4247, K_{\delta_n} = -0.8408$$

Дифференциальные уравнения плоского движения с использованием обратной связи по состоянию в векторной форме:

$$\dot{X} = (A_1 + B_1 K) * X + B_1 g_0$$

Результат ввода в систему обратной связи для получения желаемых корней характеристического уравнения отображен на рисунке 5.

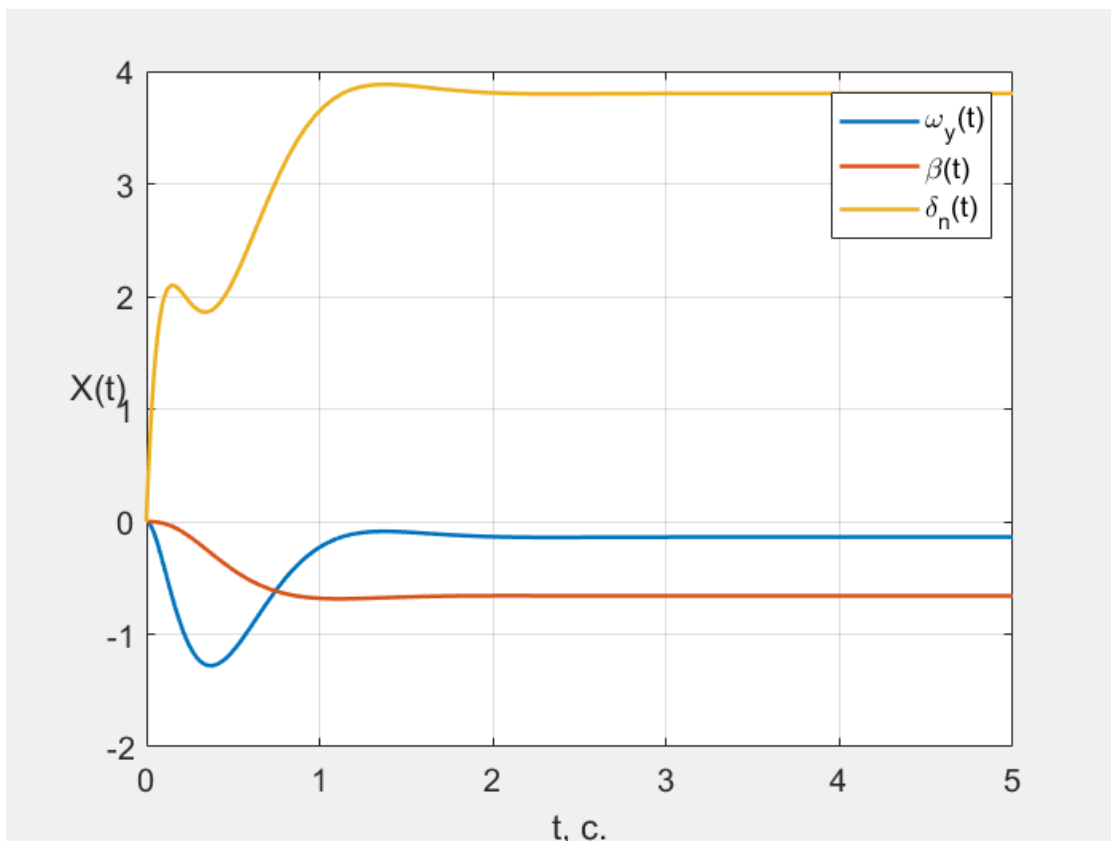


Рисунок 5 – Реакция системы на воздействие по входу управления рулем направления

После введения обратной связи по состоянию улучшилось быстродействие системы и уменьшилась колебательность системы.

Далее можно на основе полученной обратной связи по состоянию синтезируем линейный наблюдатель.

Система уравнений объекта:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases}$$

Система уравнений наблюдателя:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = A_n \hat{X} + B_n U + L(Y - \hat{Y}) \\ \hat{Y} = C_n \hat{X} \end{cases}$$

Характеристическое уравнение наблюдателя:

$$\det(Es - (A - LC))$$

Переходим к сопряженной системе и находим желаемые коэффициенты характеристического уравнения по формуле Аккермана:

$$\det(Es_j - A^T + C^T L^T) = s^3 + a_2^* s^2 + a_1^* s + a_0^* = 0$$

Наблюдатель должен иметь большее быстродействие, чем система, поэтому зададим на порядок большие желаемые корни характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение

$$s^3 + 163s^2 + 8325s + 202500 = 0, \text{ корнями которого будут:}$$

$$s_{1,2} = -31.5 \pm 32.136i, \quad s_3 = -100$$

Найдем матрицу L наблюдателя:

$$L = \begin{pmatrix} 154 \\ -1349 \\ 5533.3 \end{pmatrix}$$

Построим графики динамики наблюдателя относительно объекта при ступенчатом воздействии.

На рисунке 6 отображен график динамики наблюдателя по координате ω_y .

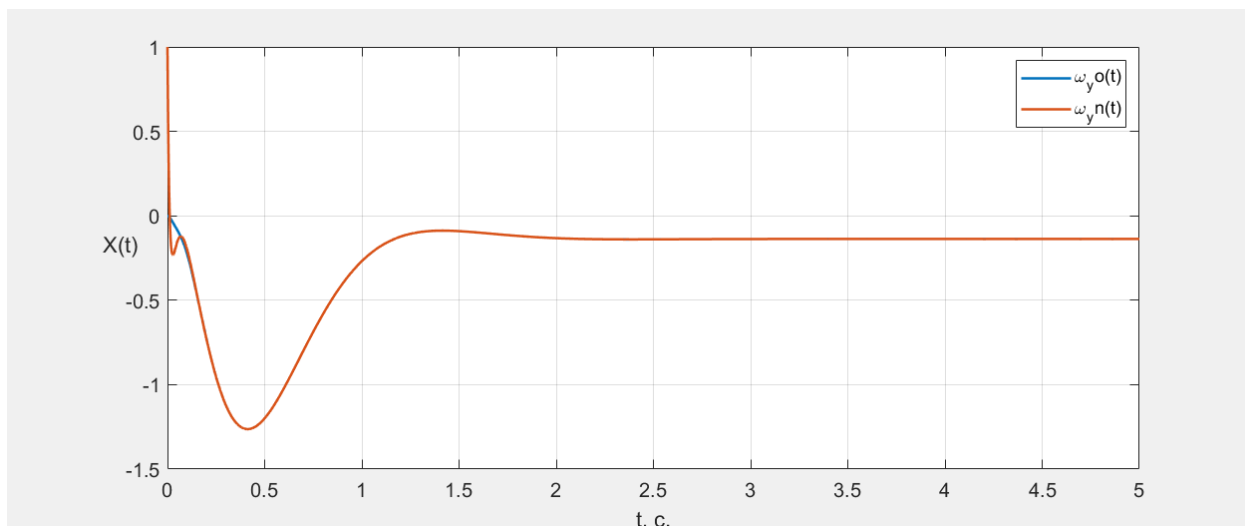


Рисунок 6 – График динамики наблюдателя (ω_{yn}) и объекта (ω_{yo}) при различных начальных условиях

На рисунке 7 отображен график динамики наблюдателя по координате β .

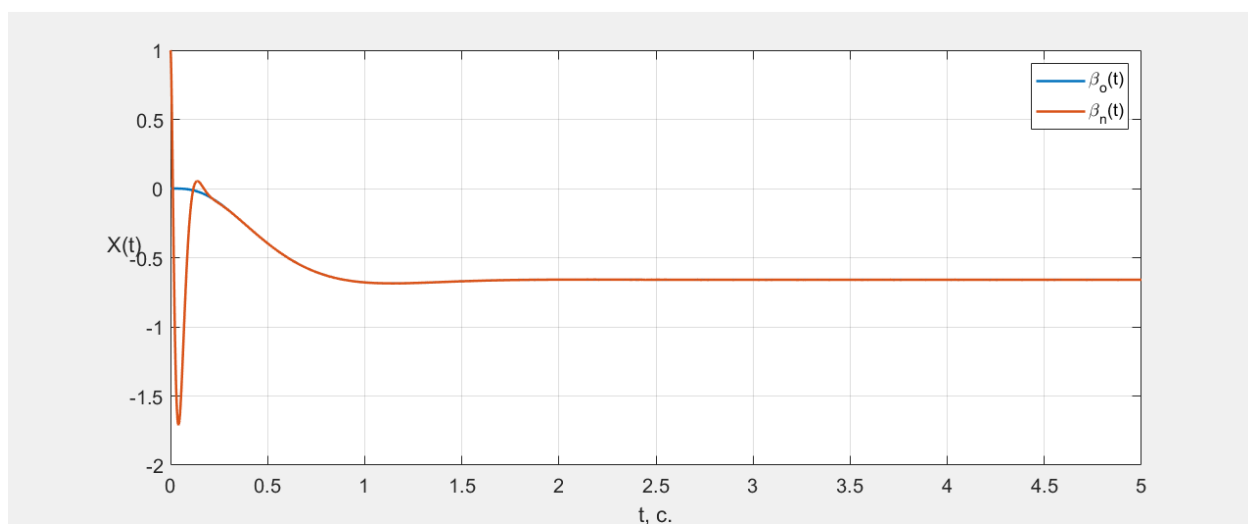


Рисунок 7 – График динамики наблюдателя (β_n) и объекта (β_o) при различных начальных условиях

На рисунке 8 отображен график динамики наблюдателя по координате δ_n .

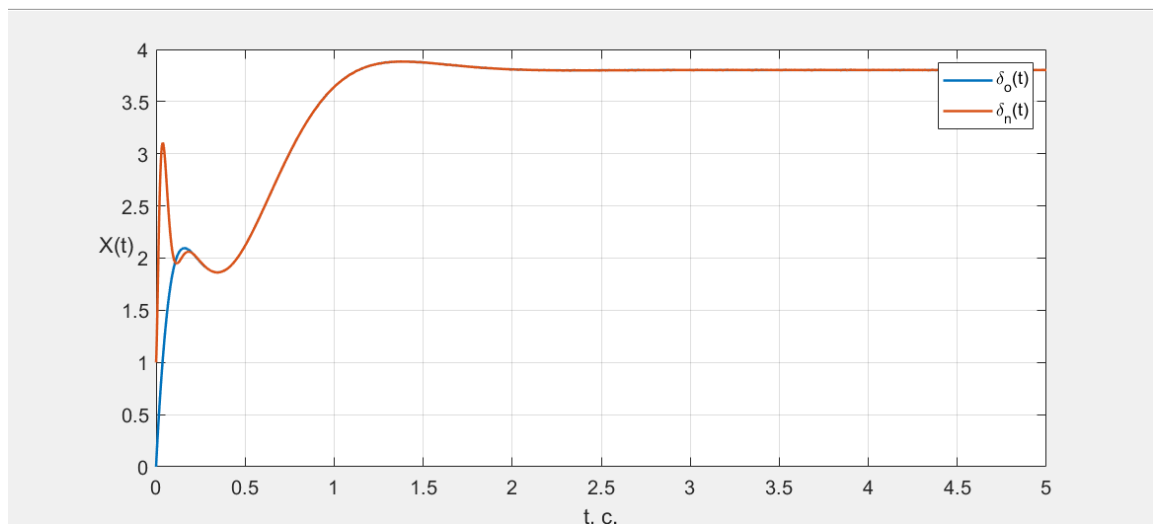


Рисунок 8 – График динамики наблюдателя (δ_n) и объекта (δ_o) при различных начальных условиях

Построим графики динамики процесса управления по оценкам вектора состояния.

Для этого введем в сигнал управления обратную связь по оценке:

$$U = -K_1 \hat{X} + g_0$$

На рисунке 9 отображена реакция системы с управлением по оценкам по координате ω_y .

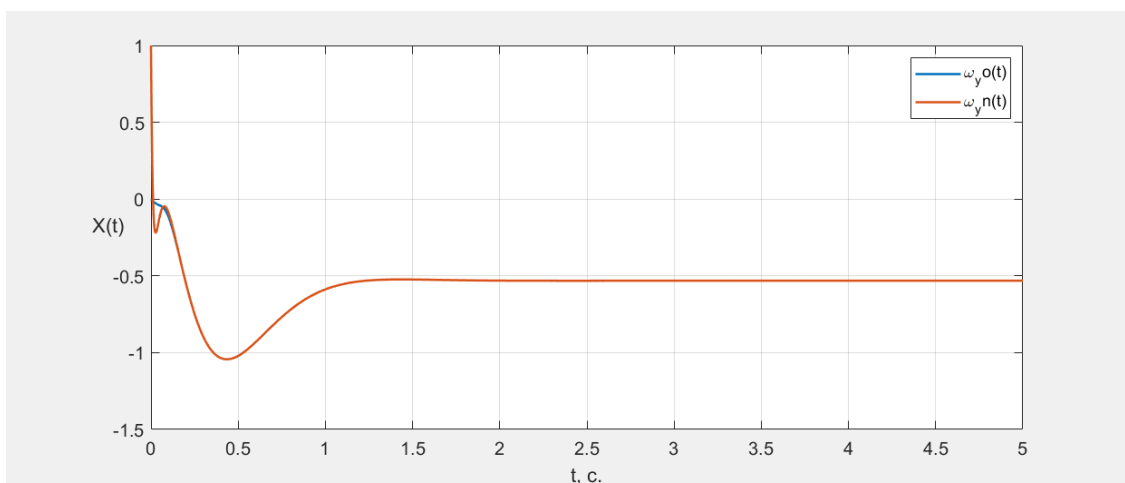


Рисунок 9 – Реакция системы с наблюдателем и управлением по оценкам на отклонение по координате ω_y

На рисунке 10 отображена реакция системы с управлением по оценкам по координате β .

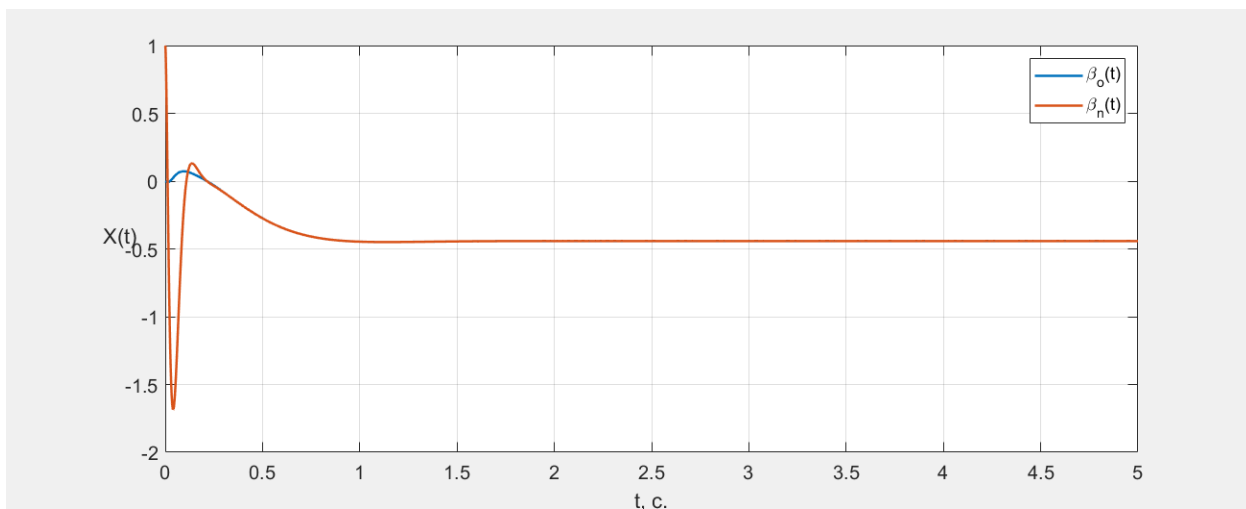


Рисунок 10 – Реакция системы с наблюдателем и управлением по оценкам на отклонение по координате β

На рисунке 11 отображена реакция системы с управлением по оценкам по координате δ .

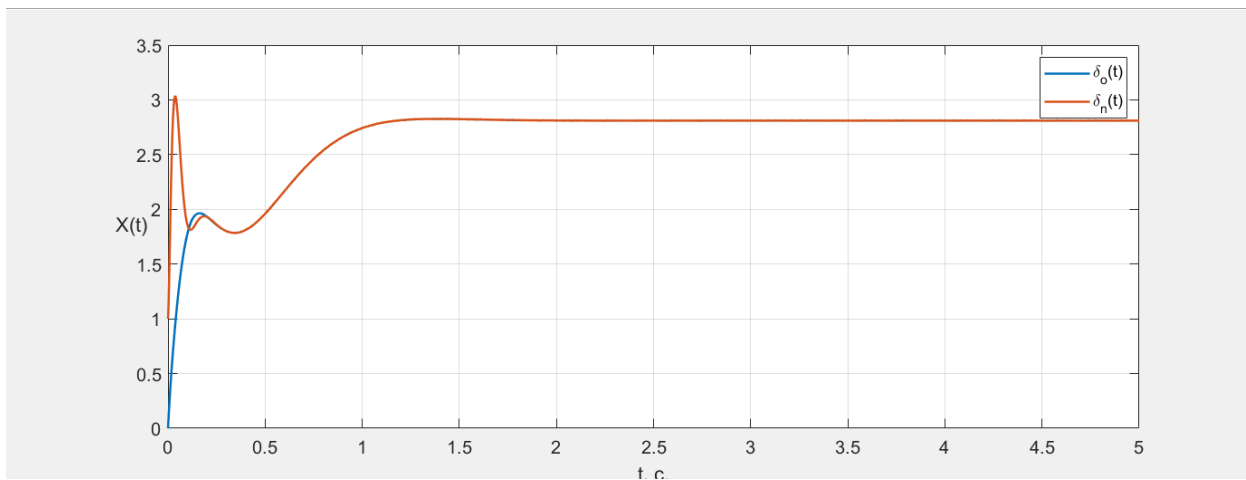


Рисунок 11 – Реакция системы с наблюдателем и управлением по оценкам на отклонение по координате δ

6 Построение области устойчивости K11 (ω_y), K12 (β)

$$A_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_H} \end{pmatrix}, B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_H} \end{pmatrix}, C_1 = (1 \quad 0 \quad 0)$$

$$K_{\omega_y} = K1, K_{\beta} = K2, K_{\delta_H} = -0.8408$$

Для построения области устойчивости воспользуемся методом D-разбиения. Получим уравнение кривой D-разбиения:

$$\dot{X} = (A_1 + B_1 K) * X + B_1 g_0$$

$$\det(Es - A_1 - B_1 K) = \begin{vmatrix} s + 0.7 & 18.3 & 3.2 \\ -1 & s + 0.26 & 0.009 \\ -8.3333 * K1 & -8.3333 * K2 & s + 15.61 \end{vmatrix} =$$

$$= s^3 + 16.57s^2 + (33.4676 + 26.6666 * K1 + 0.0745 * K2)s + 288.5040 + 5.5608 * K1 + 26.7191 * K2$$

$$s^3 + 16.57 + 33.4676s + 26.6666K1 * s + 0.0745K2 * s + 288.5040 + 5.5608 * K1 + 26.7191 * K2 =$$

$$= s^3 + 16.57s^2 + 33.4676s + 288.5040 + K1(26.6666s + 5.5608) + K2(0.0745s + 26.7191)$$

$$N(s) = 26.6666 * s + 5.5608$$

$$Q(s) = 0.0745 * s + 26.7191$$

$$R(s) = s^3 + 16.57s^2 + 33.4676s + 288.5040$$

Подставим $j\omega$ вместо s и определим действительные и мнимые части:

Re:

Im:

$$N^{Re}(\omega) = 5.5608$$

$$N^{Im}(\omega) = 26.6666\omega$$

$$Q^{Re}(\omega) = 26.7191$$

$$Q^{Im}(\omega) = 0.0745\omega$$

$$R^{Re}(\omega) = -16.57\omega^2 + 288.504$$

$$R^{Im}(\omega) = -\omega^3 + 33.4676\omega$$

$$\Delta(\omega) = \begin{vmatrix} N^{Re}(\omega) & Q^{Re}(\omega) \\ N^{Im}(\omega) & Q^{Im}(\omega) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5.5608 & 26.7191 \\ 26.6666\omega & 0.0745\omega \end{vmatrix} =$$

$$= -712.09\omega$$

$$\Delta_{K1}(\omega) = \begin{vmatrix} -R^{Re}(\omega) & Q^{Re}(\omega) \\ -R^{Im}(\omega) & Q^{Im}(\omega) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 16.57\omega^2 - 288.5040 & 26.7191 \\ \omega^3 - 33.4676\omega & 0.0745\omega \end{vmatrix} =$$

$$= -25.4846\omega^3 + 872.7306\omega$$

$$\Delta_{K2}(\omega) = \begin{vmatrix} N^{Re}(\omega) & -R^{Re}(\omega) \\ N^{Im}(\omega) & -R^{Im}(\omega) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5.5608 & 16.57\omega^2 - 288.504 \\ 26.6666\omega & \omega^3 - 33.4676\omega \end{vmatrix} =$$

$$= -436.3047\omega^3 + 7507.3141\omega$$

Уравнения кривой D-разбиения в области параметров K_{11} , K_{12} :

$$K1(\omega) = \frac{\Delta_{K1}(\omega)}{\Delta(\omega)} = \frac{-25.4846\omega^3 + 872.7306\omega}{-712.09\omega} = 0.0358\omega^2 - 1.2256$$

$$K2(\omega) = \frac{\Delta_{K2}(\omega)}{\Delta(\omega)} = \frac{-436.3047\omega^3 + 7507.3141\omega}{-712.09\omega} = 0.6127\omega^2 - 10.5426$$

Запишем уравнение концевой прямой:

$$288.504 + 5.5608 * K1 + 26.7191 * K2 = 0$$

$$K2(K1) = -\frac{288.504 + 5.5608 * K1}{26.7191}$$

Построим D-разбиение и определим область-претендент, а также отметим найденную в предыдущем пункте рабочую точку [1.8862, -3.4247] и проверим двукратные запасы устойчивости (Рисунок 12).

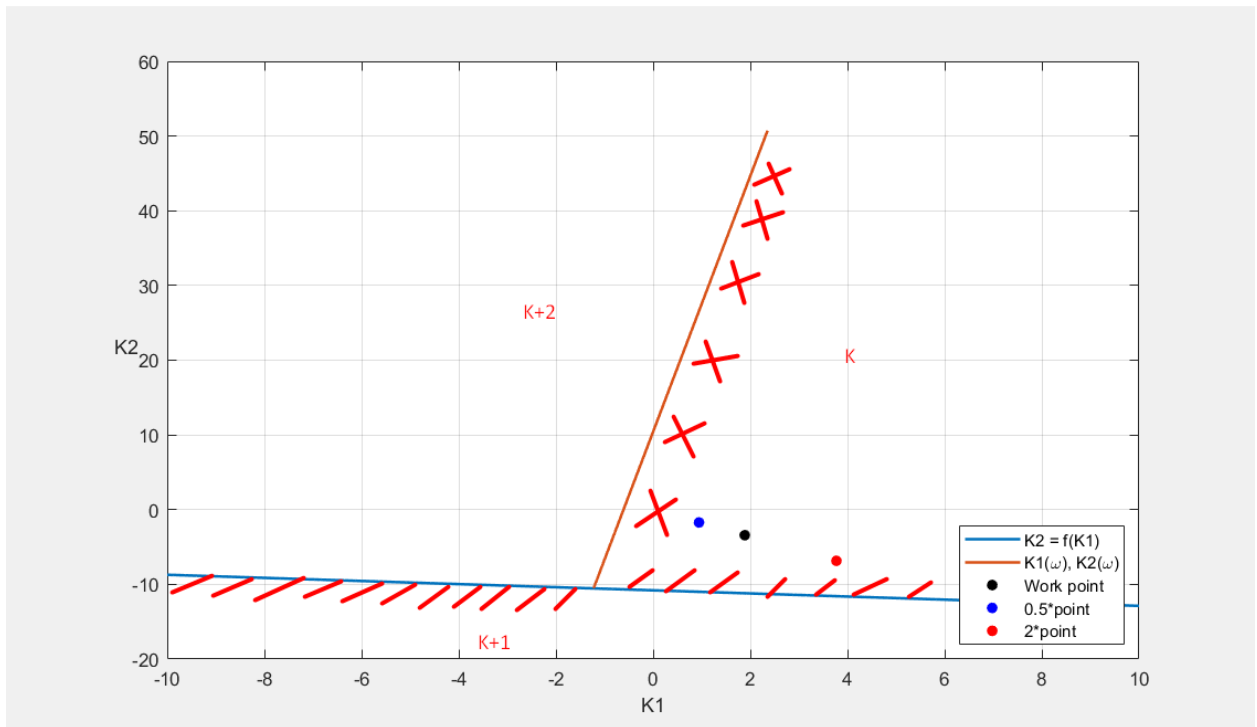


Рисунок 12 – Картина D-разбиения в области параметров K1, K2 и штриховка.

Областью-претендентом является область с k правых корней, проверим значения параметров из данной области на устойчивость:

Пусть $K_1 = 2$, $K_2 = 0$:

$$\begin{aligned}
 \det(Es - A_1 - B_1 K) &= \\
 &= s^3 + 16.57s^2 + 33.4676s + 288.5040 + K_1(26.6666s + 5.5608) \\
 &\quad + K_2(0.0745s + 26.7191) \\
 &= s^3 + 16.57s^2 + 140.134s + 299.6256
 \end{aligned}$$

Корни данного характеристического уравнения

$$s_{1,2} = -6.77 \pm 7.3i, \quad s_3 = -3.02$$

имеют отрицательную действительную часть, таким образом, система при данных параметрах устойчива.

Проверим также большие значения: $K_1 = 2000$, $K_2 = 10000$:

$$\begin{aligned} \det(Es - A_1 - B_1K) = \\ = s^3 + 16.3s^2 + 23.8659s + 204.4129 + K_1(35.8333s + 4.6417) \\ + K_2(0.1667s + 35.9167) = s^3 + 16.57s^2 + 54111s + 278601 \end{aligned}$$

Корни данного характеристического уравнения:

$$s_{1,2} = -5.70 \pm 232.42i, \quad s_3 = -5.15$$

Следовательно, найденная область-претендент является областью устойчивости для параметров $K_{\omega_y} = K_1$, $K_\beta = K_2$ при $K_{\delta_n} = -0.8408$.

Выбранная рабочая точка находится в области устойчивости и имеет, как минимум, двукратные запасы устойчивости.

7 Выбор параметров закона управления в канале элеронов, обеспечивающего заданные требования

Есть система дифференциальных уравнений пятого порядка.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_y = a_{11}\omega_y + a_{12}\beta + a_{13}\omega_x + b_{11}\delta_H + b_{12}\delta_3 \\ \dot{\beta} = a_{21}\omega_y + a_{22}\beta + a_{23}\omega_x + b_{21}\delta_H + b_{22}\delta_3 \\ \dot{\omega}_x = a_{31}\omega_y + a_{32}\beta + a_{33}\omega_x + b_{31}\delta_H + b_{32}\delta_3 \\ \dot{\delta}_H = -\frac{1}{T_H}\delta_H + \frac{(K_{11}\omega_y + K_{12}\beta)}{T_H} + \frac{1}{T_H}g_H \\ \dot{\delta}_3 = -\frac{1}{T_3}\delta_3 + \frac{K_{23}\omega_x}{T_3} + \frac{1}{T_3}g_3 \end{cases}$$

$$X = \begin{pmatrix} \omega_y \\ \beta \\ \omega_x \\ \delta_H \\ \delta_3 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_{21} & b_{22} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} \end{pmatrix}; \quad U = \begin{pmatrix} g_H \\ g_3 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_H} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_3} \end{pmatrix};$$

$$C = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0); \quad K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{23} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Запишем уравнения системы в векторно-матричной форме:

$$\begin{cases} \dot{X} = (A + B * K)X + BU \\ Y = CX \end{cases}$$

K_{11} , K_{12} были найдены в пункте 3, необходимо выбрать коэффициент K_{23} так, чтобы время переходного процесса не превышало $t^* = 1$ с.

Рассмотрим переходный процесс системы по координате ω_x при $K_{23} = 0$, он изображен на рисунке 13.

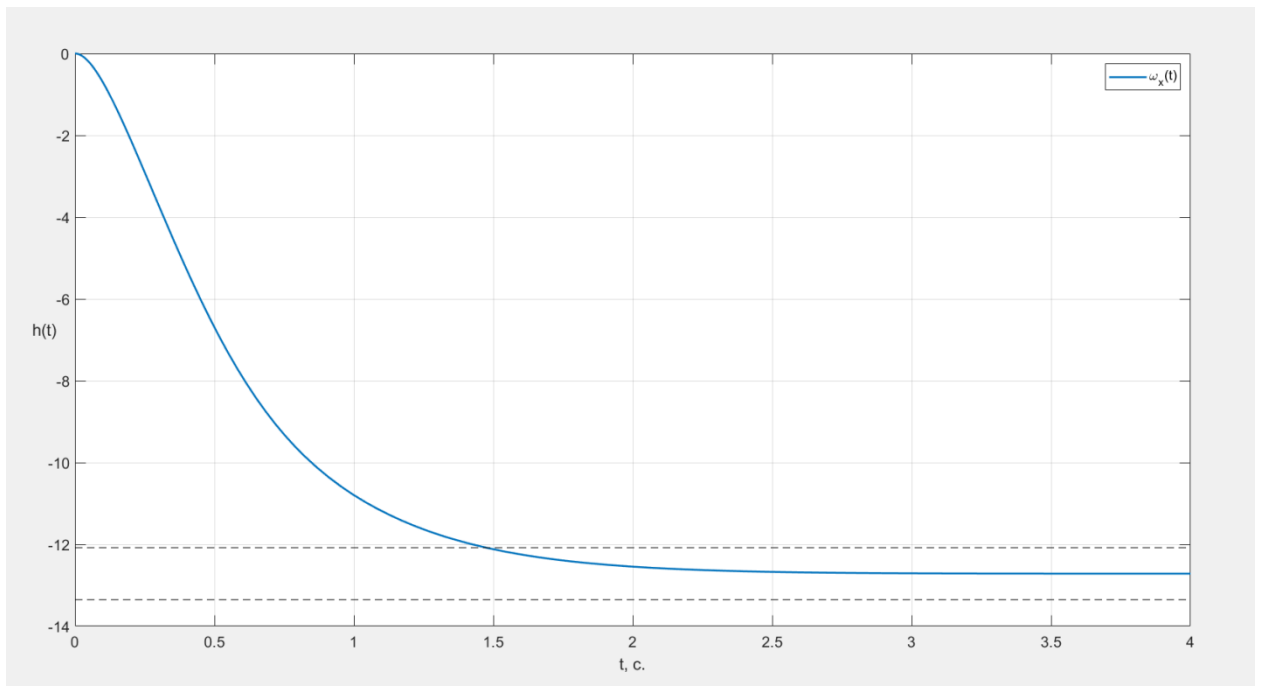


Рисунок 13 – Переходная функция системы по координате ω_x при $K_{23} = 0$

Делаем вывод, что требование по времени переходного процесса не соблюдается

Вводим коэффициент обратной связи $K_{23} = 0.2$ для улучшения быстродействия системы.

Переходный процесс по координате ω_x при $K_{23} = 0.2$ изображен на рисунке 14.

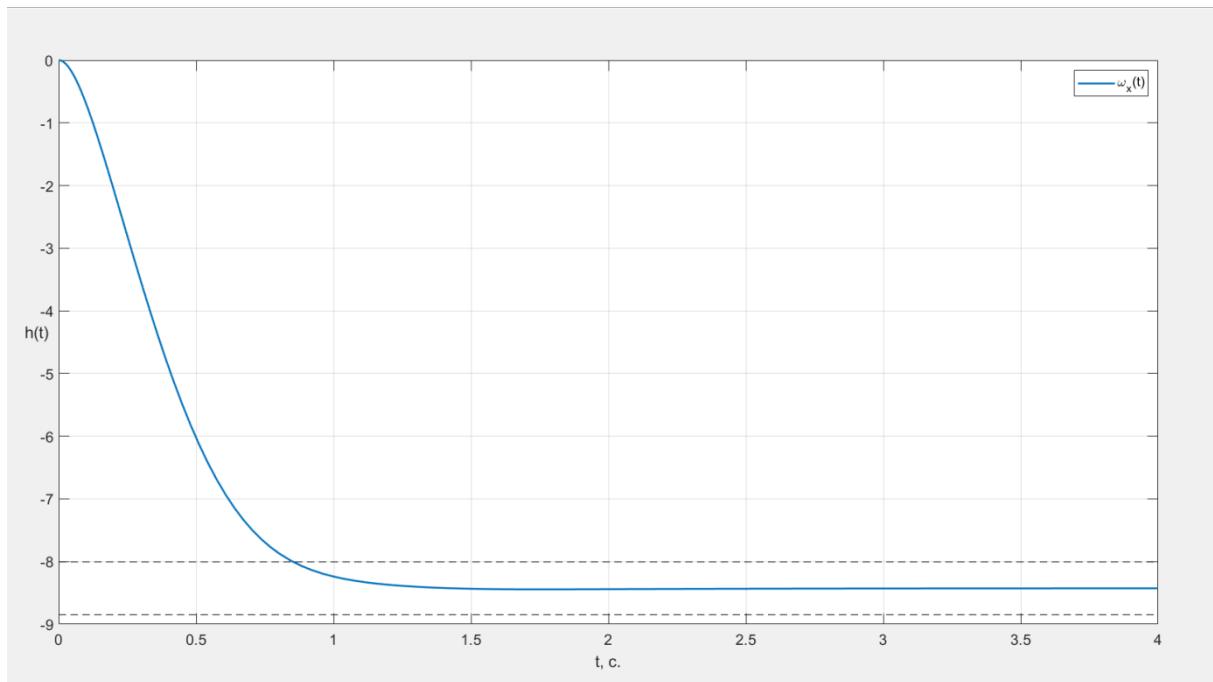


Рисунок 14 – Переходная функция системы по координате ω_x при $K_{23} = 0.2$

Для проверки коэффициента K_{23} на двукратный запас устойчивости найдем корни характеристического уравнения системы при $K_{23} = 0.4$.

$$\begin{aligned} \det(Es - A - BK) &= \\ &= s^5 + 19.157s^4 + 254.04s^3 + 1661.5s^2 + 7363.5s + 8402.3 \\ s_{1,2} &= -4.05 \pm 6.83i, \quad s_{3,4} = -5.33 \pm 3.41i, \quad s_5 = -1.51 \end{aligned}$$

Все корни имеют отрицательную действительную часть, значит система имеет как минимум двукратный запас устойчивости по K_{23} .

8. Выбор коэффициента K_x обратной связи от ручки летчика.

Отклонение ручки на 20 мм соответствует изменению ω_x на 25 град/сек.

Получаем коэффициент передачи: $\frac{25}{20} = 1.25$

$$K_x * g_x * W_{\omega_x}(0) = 25$$

Далее мы можем найти передаточную функцию $W_{\omega_x}(s)$ по входу управления элеронами.

$$W(s) = C_{\omega_x} * (Es - (A + BK))^{-1} * B$$

$$W_{\omega_x}(s)$$

$$= \frac{-39.16(s^3 + 9.46 * s^2 + 94.15 * s + 122.79)}{s^5 + 20.28 * s^4 + 210.03 * s^3 + 1209.34 * s^2 + 3294.79 * s + 2853.63}$$

$$W_{\omega_x}(0) = -1.68$$

Рассчитает коэффициент связи от ручки:

$$K_x = -\frac{25}{20 * (-1.68)} = 0,74$$

Переходный процесс ω_x при отклонении ручки летчика на 20 мм изображен на рисунке 15.

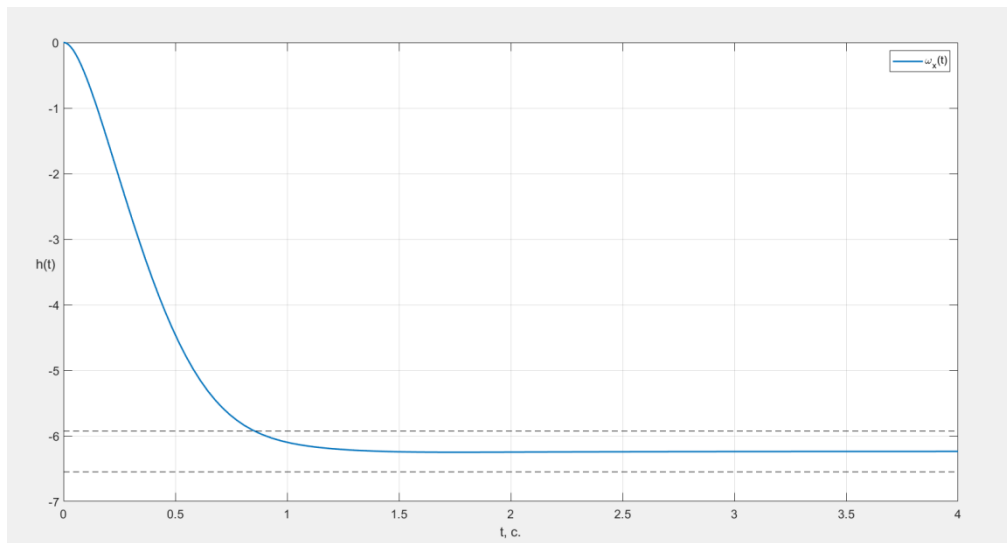


Рисунок 15 – Переходная функция системы по координате ω_x при $K_x = 0.74$

При отклонении ручки на 20 мм приращение ω_x составляет 25 град/сек.

Для проверки требований построим переходные процессы в системе 5 порядка по координатам $\omega_y, \beta, \omega_x$. Переходные процессы при управлении по элеронам изображены на рисунке 16.

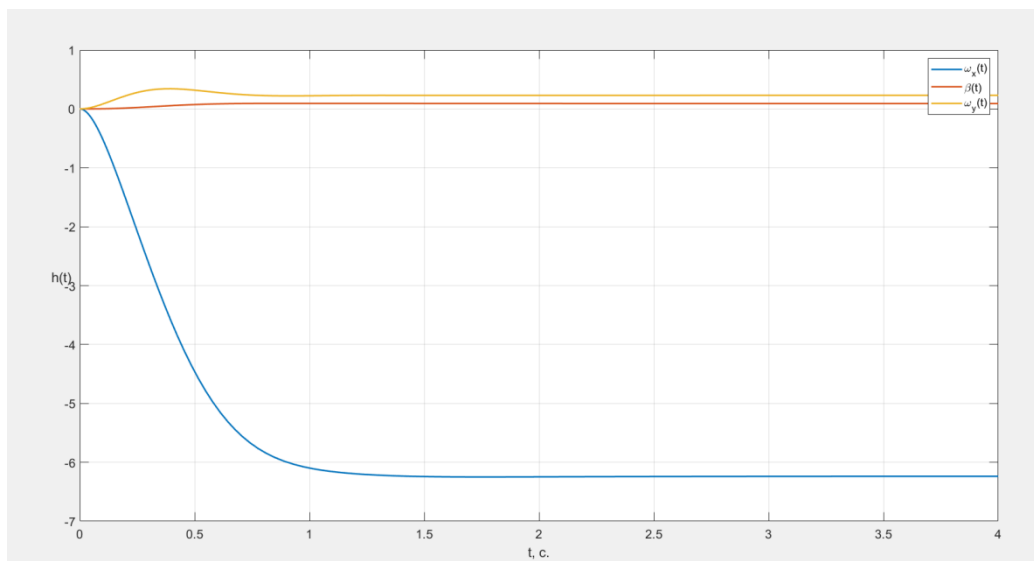


Рисунок 16 – Переходные процессы при отклонении элеронов на 5° .

Переходные процессы при управлении по рулю направления изображены на рисунке 17.

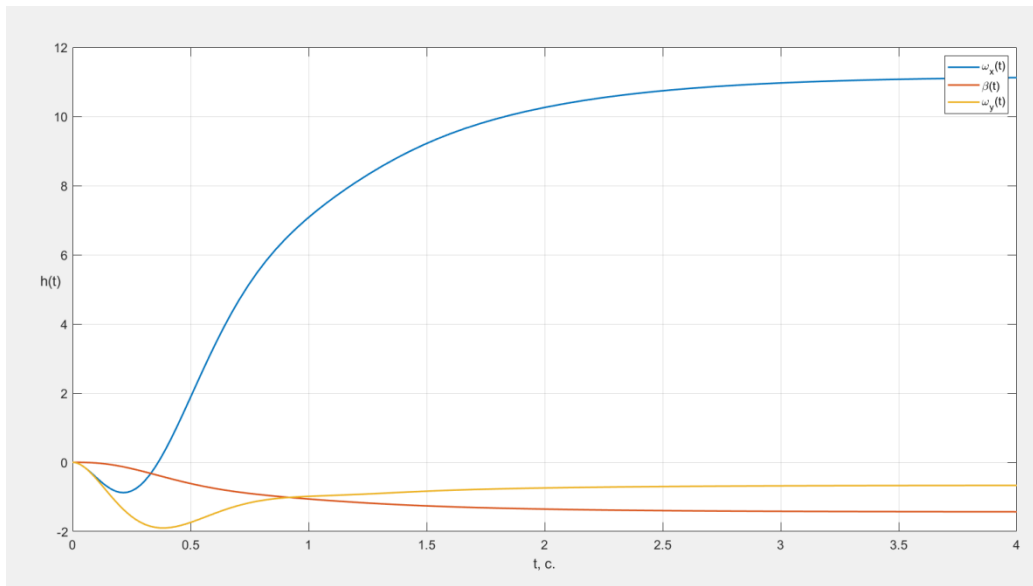


Рисунок 17 – Переходные процессы при отклонении руля направления на 5° .

Переходные процессы при управлении при начальных условиях $\beta(0) = 5^\circ$ изображены на рисунке 18.

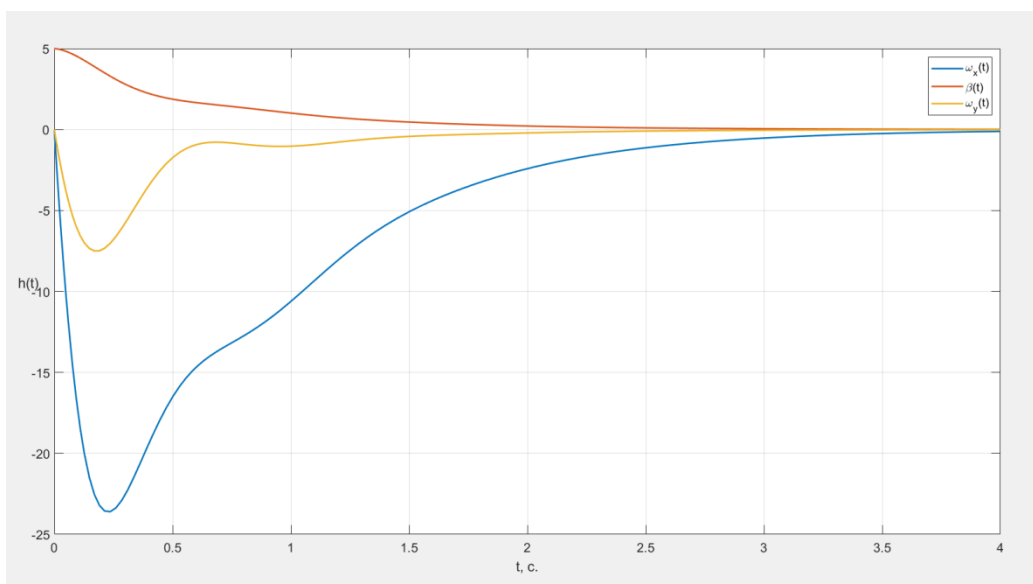


Рисунок 18 – Переходные процессы свободного движения в системе 5 порядка при заданных начальных условиях ($\beta_0 = 5^\circ$)

9 Проверка технических требований к полной системе

1. Затухание короткопериодических колебаний при управлении по координатам ω_y и β и при свободном движении не менее, чем в 10 раз за период колебаний (Рисунок 16, рисунок 17, рисунок 18).
2. Собственная частота $\omega_0 = 4.5$ для системы за счет введения обратных связей с коэффициентами $K_{11} = 1.8862$, $K_{12} = -3.4247$, $K_{13} = -0.8408$.
3. Время переходного процесса при управлении ω_x от ручки летчика $t^* < 1$ сек при монотонном характере процесса за счет введения коэффициента обратной связи $K_{23} = 0.2$ (Рисунок 14).
4. Расход ручки в установившемся режиме управления по ω_x соответствует $R^* = 20$ мм для приращения $\omega_x = 25$ град/сек (Рисунок 15).
5. Параметры закона управления обеспечивают не менее, чем двукратные запасы устойчивости по любому коэффициенту K (рисунок 12).

10 Анализ динамики нелинейной системы с учетом нелинейности

Исследуем возможность возникновения автоколебаний при учете релейного привода в канале элеронов.

Структурная схема нелинейного привода и канала руля элеронов с нелинейным приводом приведена на рисунке 19 и 20 соответственно



Рисунок 19 – Структурная схема нелинейного привода

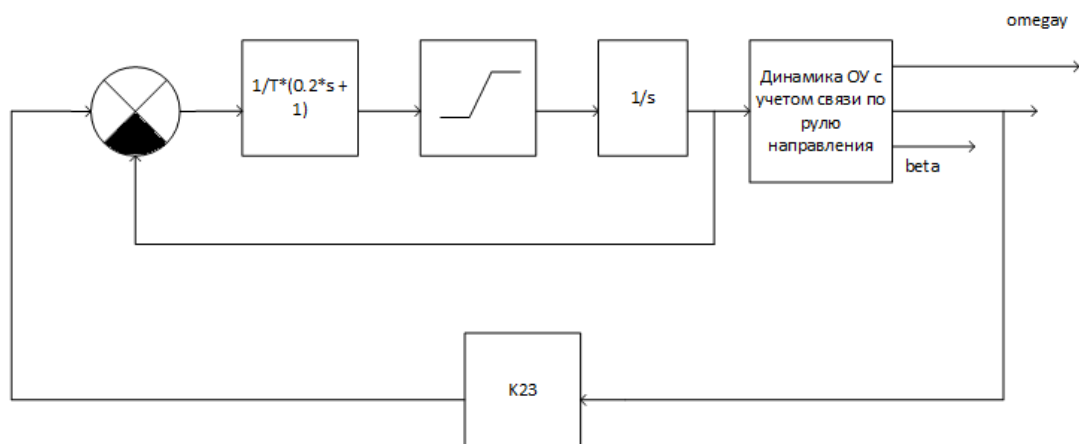


Рисунок 20 – Структурная схема канала руля элеронов с нелинейным приводом

Ограничение -25, линейная зона-13

Для исследования возникновения автоколебаний по методу Гольдфарба приведем данную схему к схеме Винера-Гаммерштейна, которая изображена на рисунке 21.

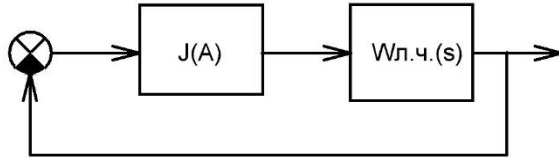


Рисунок 21 – Схема Винера-Гаммерштейна

Получим гармонический коэффициент передачи нелинейного звена $J(A)$.

$$J(A) = q(A) + jq_1(A)$$

Так как нелинейность представляет собой ограничение, то коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$q(A) = \frac{2K}{\pi} \arcsin\left(\frac{B}{A} + \frac{B}{A} \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}}\right)$$

$$q(A) = \frac{5.4}{\pi} \arcsin\left(\frac{13}{A} + \frac{13}{A} \sqrt{1 - \frac{169}{A^2}}\right)$$

$$q_1(A) = 0$$

$$J(A) = \frac{5.4}{\pi} \arcsin\left(\frac{13}{A} + \frac{13}{A} \sqrt{1 - \frac{169}{A^2}}\right)$$

Для определения передаточной функции линейной части построим эквивалентную схему, которая изображена на рисунке 22.

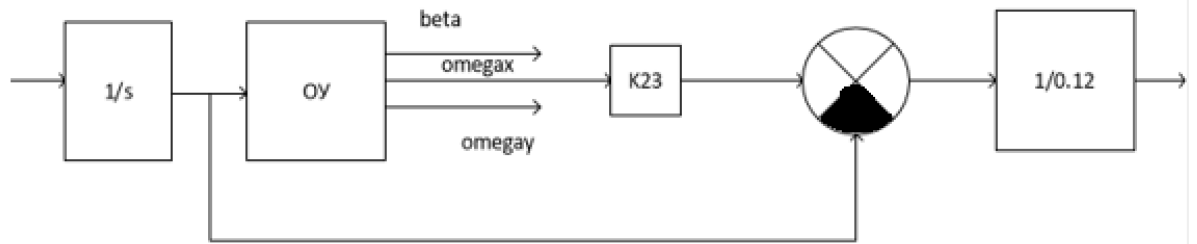


Рисунок 22 – Эквивалентная схема линейной части

Получим передаточную функции объекта управления с обратной связью по рулю направления для выходов ω_x :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases}$$

$$X = \begin{pmatrix} \omega_y \\ \beta \\ \omega_x \\ \delta_H \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_{11} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_{21} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_{31} \\ \frac{K_{11}}{T_H} & \frac{K_{12}}{T_H} & 0 & -\frac{1}{T_H} \end{pmatrix}; \quad U = (\delta_3);$$

$$B = \begin{pmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ b_{32} \\ 0 \end{pmatrix}; \quad C = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)$$

$$W^{\omega_x}(s) = -4.7 * \frac{s^3 + 9.46s^2 + 35.58s + 218.21}{s^4 + 11.94s^3 + 42.26s^2 + 201.71s + 328.92}$$

$$W_{\text{л. ч.}}(s) = -\frac{K_{23}W^{\omega_x}(s) - 1}{0.12s}$$

$$W_{\text{л. ч.}}(s) = 8.3333 \frac{(s^4 + 12.88s^3 + 51.15s^2 + 235.15s + 534.04)}{(s^5 + 11.94s^4 + 42.26s^3 + 201.71s^2 + 328.92s)}$$

$$W_{\text{л. ч.}}(j\omega) = 8.3333 \frac{(\omega^4 - 12.88j\omega^3 - 51.15\omega^2 + 235.15j\omega + 534.04)}{(j\omega^5 + 11.94\omega^4 - 42.26j\omega^3 - 201.71\omega^2 + 328.92j\omega)}$$

Построим АФЧХ линейной части и $-\frac{1}{J(A)}$ и определим возможные периодические режимы в системе. Графики изображены на рисунке 23.

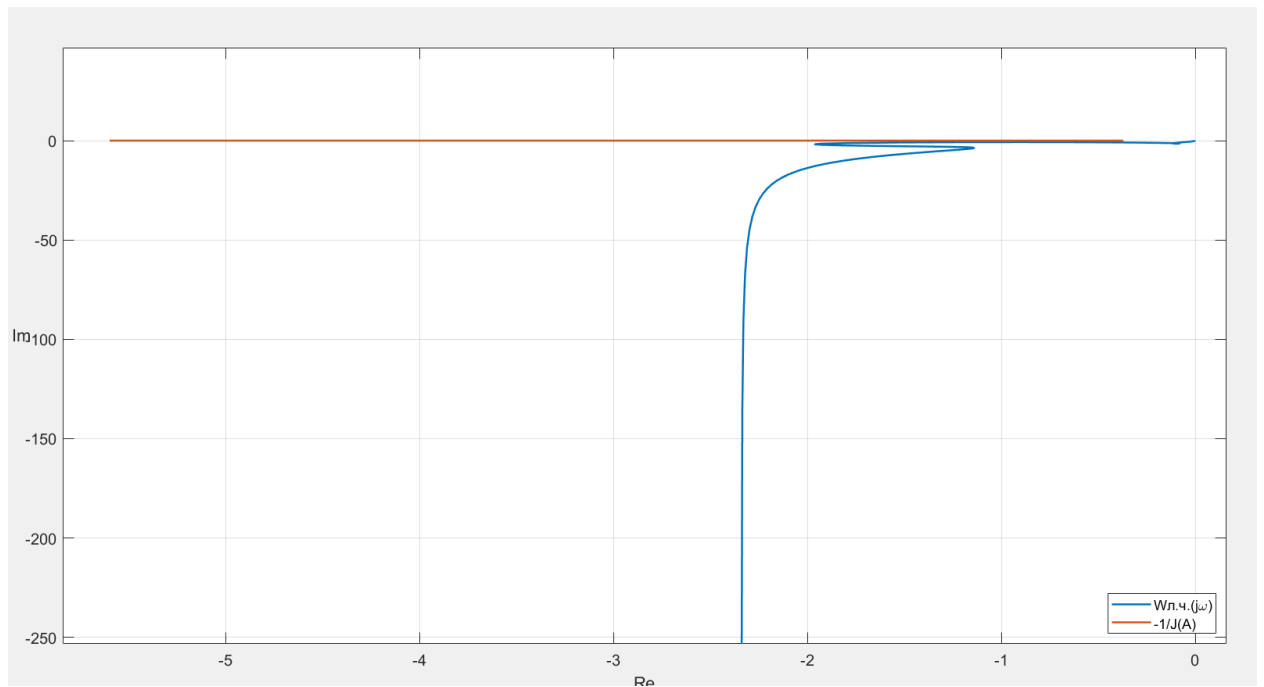


Рисунок 22 – АФЧХ линейной части и $-\frac{1}{J(A)}$

На рисунке 23 изображен график вблизи нуля.

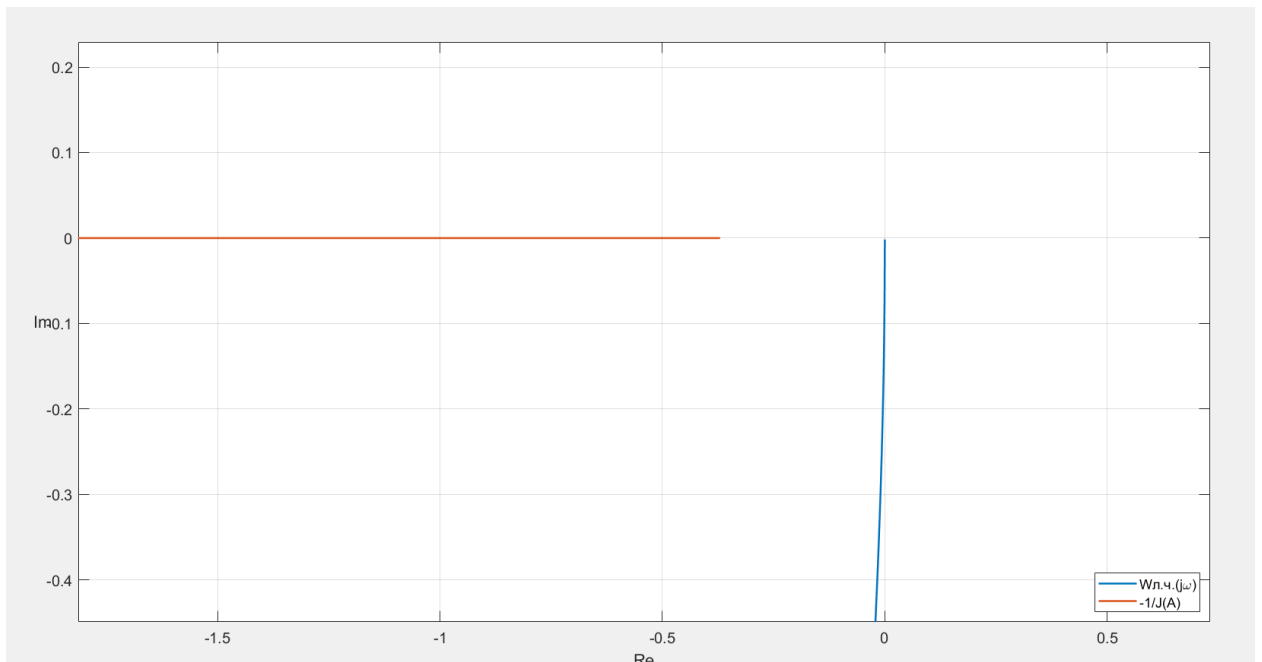


Рисунок 23 – АФЧХ линейной части и $-\frac{1}{J(A)}$ вблизи нуля

Характеристики не пересекаются. Можно сделать вывод, что в система отсутствует возможность появления одночастотных периодических режимов.

Вывод

В ходе работы был проведен анализ динамики данного объекта управления, сделаны выводы о несоответствии показателей качества требованиям, предъявляемым к системе: собственная частота системы $\omega_c = 4.43$ рад/с меньше частоты, заданной в требованиях; затухание колебаний $\alpha = 1 \div 3$ при заданном $\alpha = 10$; время переходного процесса по координате ω_x больше, чем $t^* = 1$ с.

Были выбраны параметры закона управления плоским движением по рысканию, соответствующие заданным требованиям – коэффициенты K обратной связи по состоянию. Синтезирован линейный наблюдатель для отслеживания изменения координат состояния.

Для соответствия системы заданным требованиям выбраны некоторые параметры управления в канале элеронов – коэффициент K_{23} обратной связи, коэффициент передачи от ручки летчика для определенного значения при заданном отклонении. В результате были улучшены характеристики системы до соответствующих техническим требованиям. Время переходного процесса при управлении ω_x от ручки летчика $t^* = 0.8$ сек при монотонном характере процесса за счет введения коэффициента обратной связи $K_{23} = 0.2$. Расход ручки в установившемся режиме управления по ω_x соответствует $R^* = 20$ мм для приращения $\omega_x = 25$ град/сек.

При учете релейного привода в канале руля направления была исследована возможность возникновения автоколебаний, был проведен анализ динамики нелинейной системы. Был получен результат об отсутствии возможности появления одночастотных периодических режимов

Список использованной литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов – 4-е изд. – СПб: Профессия, 2003. – 752 стр.
2. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие – 2-е изд. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 стр.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Том 1. Линейные системы. / Д.П. Ким – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 312 стр.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Том 2. / Д.П. Ким – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 440 стр.
5. Поляков К.Ю. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2012. – 234 с.