

**Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.**

**Использование метода ЛАЧХ для синтеза
регуляторов манипулятора с гибким стержнем.**

Выполнил Скалов Б. Ю

Руководитель работы: к.т.н., доц. Смарунь А.Б.

Актуальность работы

- Манипулятор с рабочим органом в виде вязкоупругого стержня – сложная комбинированная система, состоящая из сосредоточенных и распределенных элементов. Для синтеза регулятора таких систем используются методы параметрической оптимизации, которые сложны и не наглядны.
- Является актуальным использовать для синтеза регулятора таких систем хорошо известный инженерам и наглядный метод логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик.

Цель работы

- Целью работы является исследование возможности применения метода логарифмических амплитудно-частотных характеристик для синтеза регулятора системы управления манипулятором с упругим стержнем.

Схема системы управления манипулятором

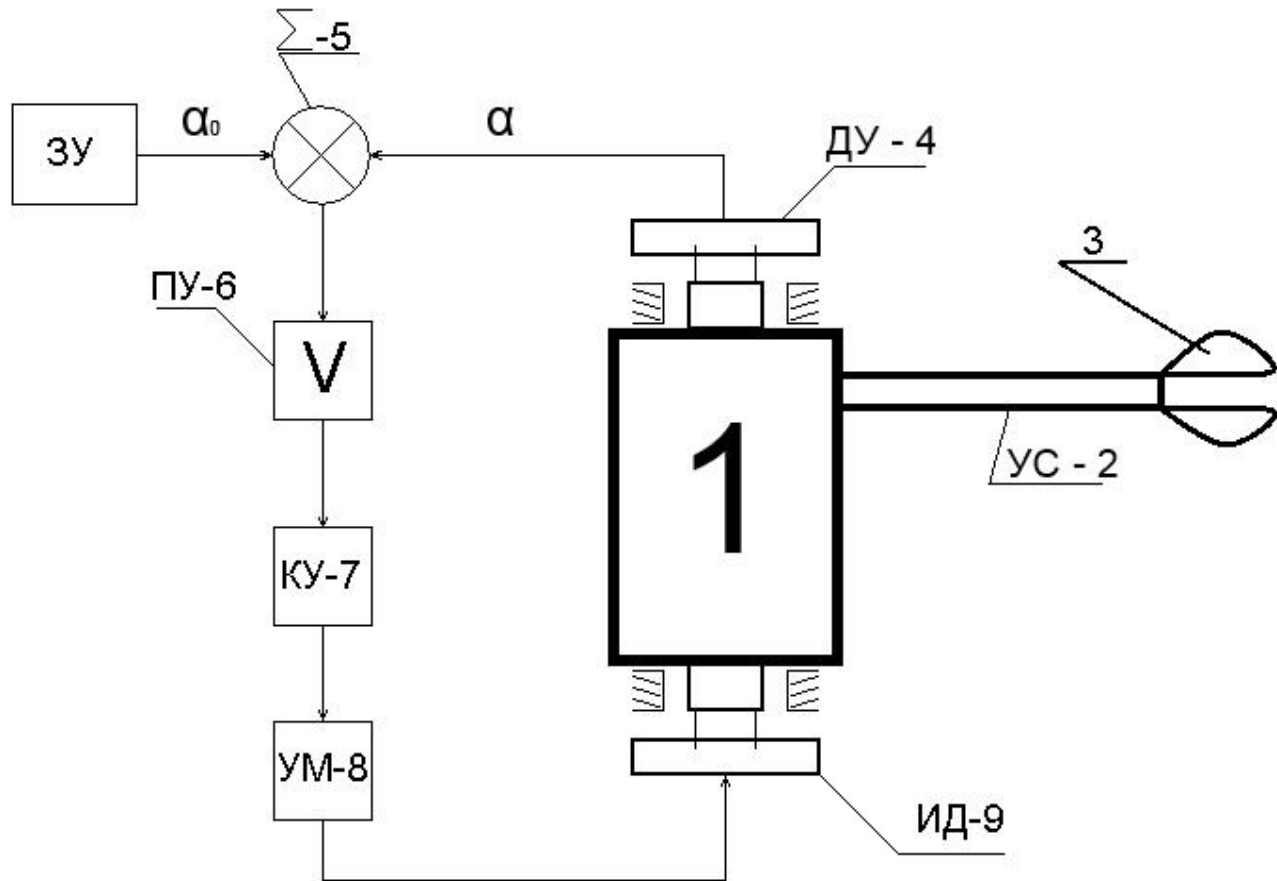
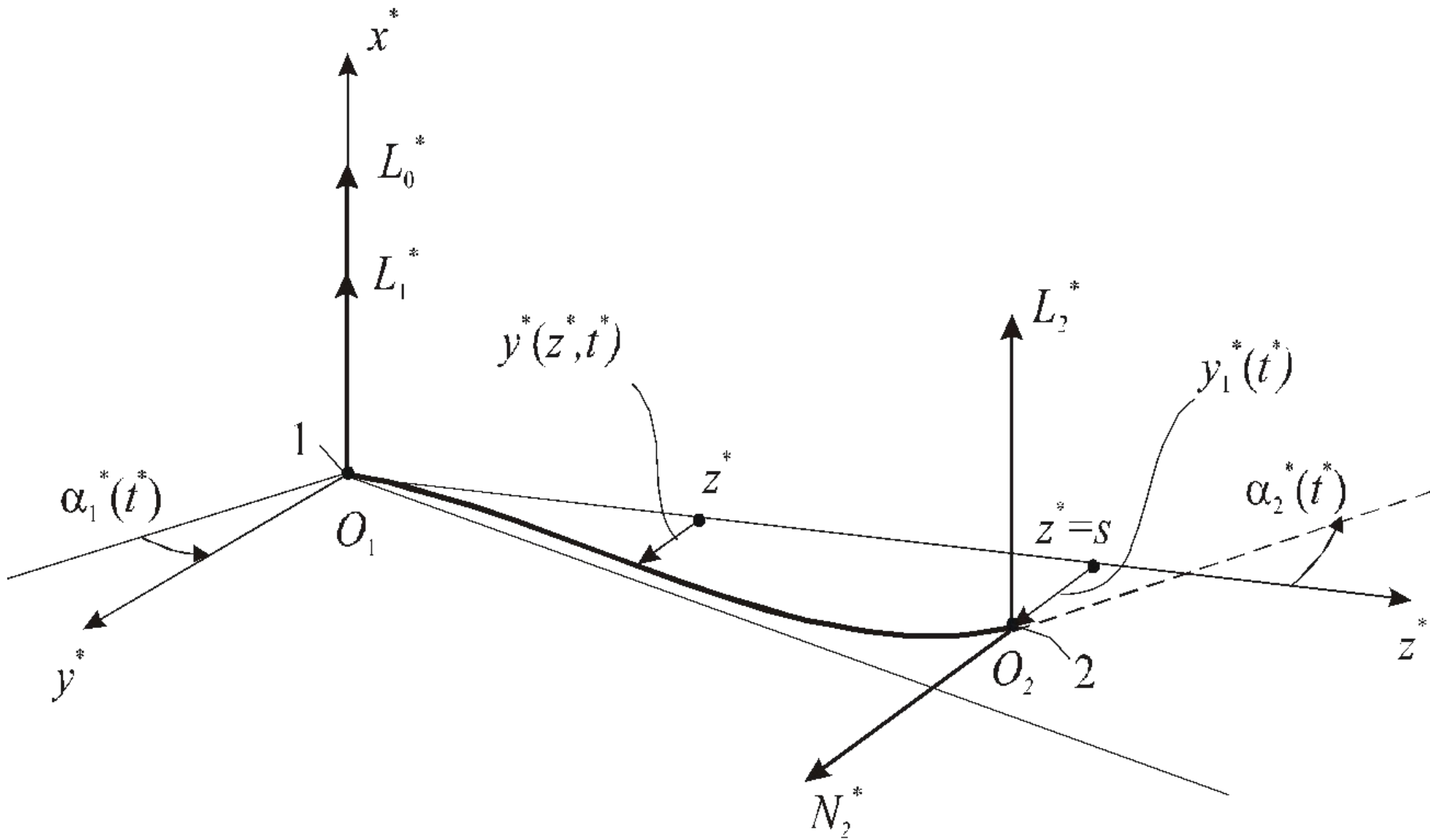


Схема движения манипулятора



Уравнения движения манипулятора в размерной форме

Уравнение углового движения абсолютно жесткого вала

$$J_0^* \ddot{\alpha}_1^* = \alpha_0^* - \Pi \alpha_1^* - k_0^* \alpha_1^* + L_1^*,$$

Уравнение углового движения исполнительного органа манипулятора

$$J_2^* (\ddot{\alpha}_1^* + \ddot{\alpha}_2^*) = L_2^*$$

Уравнение линейного перемещения исполнительного органа

$$m_2^* (\ddot{y}_1^* - s \ddot{\alpha}_1^*) = N_2^*,$$

Уравнение изгиба тонкого стержня

$$\rho(y^*(z^*, t^*) - z^* \alpha_1^*) = -EJ(1 + h \frac{D}{Dt^*}) y^{*''''}(z^*, t^*), \quad ()' = \frac{D}{Dz^*}$$

Уравнения движения манипулятора в размерной форме

Задаем граничные условия

$$z^* = 0: y^*(0, t^*) = 0, y^{*'}(0, t^*) = 0$$

$$z^* = s: y^*(s, t^*) = y_1(t^*), y^{*'}(s, t^*) = -\alpha_2^*(t^*)$$

и прогиб стержня в начальный момент времени $t^* = 0$:

$$\alpha_1^*(0) = 0, \varphi_1^*(0) = 0, \alpha_2^*(0) = 0, \varphi_2^*(0) = 0$$

$$y_1(0) = 0, \varphi_1(0) = 0, y^*(z^*, 0) = 0, \varphi^*(z^*, 0) = 0$$

Уравнения связи

$$L_1^* = -EJ \left(1 + h \frac{D}{Dt^*} \right) y^{*''}(0, t^*), L_2^* = EJ \left(1 + h \frac{D}{Dt^*} \right) y^{*''}(s, t^*)$$

$$N_2^* = EJ \left(1 + h \frac{D}{Dt^*} \right) y^{*'''}(s, t^*)$$

Приведение уравнений к безразмерной форме

Известно , что в гибких стержнях характерные процессы определяются такими параметрами стержней и их материала:

E – модуль Юнга упругости материала;

J – момент инерции поперечного сечения стержня;

s – длина стержня;

ρ – плотность материала стержня.

Из этих параметров можно составить комбинацию имеющую размерность времени

$$T = \left(\rho \frac{s^4}{EJ} \right)^{1/2}$$

Эта комбинация представляет собой характерное время протекающих в стержнях процессов

Приведение уравнений к безразмерной форме

Имея единый масштаб длины можно ввести безразмерные переменные

$y_1 = y_1^* / \delta$, y_1 - безразмерное упругое перемещение конца стержня;
 $y = y^* / \delta$, y - безразмерный прогиб стержня;
 $z = z^* / s$, z - безразмерная координата поперечного сечения стержня.

$$\alpha_0 = \alpha_0^* / \left(\frac{\delta}{s} \right), \quad \alpha_1 = \alpha_1^* / \left(\frac{\delta}{s} \right), \quad \alpha_2 = \alpha_2^* / \left(\frac{\delta}{s} \right), \quad \frac{\delta}{s} \ll 1$$

$$J_0 = J_0^* / (\rho s^3), \quad J_2 = J_2^* / (\rho s^3), \quad m_2 = m_2^* / (\rho s), \quad k_0 = k_0^* \frac{EJT}{s},$$

$$L_1 = L_1^* / L, \quad L_2 = L_2^* / L, \quad L = \frac{EJ\delta}{s^2}, \quad N_2 = N_2^* / N, \quad N = \frac{EJ\delta}{s^3}, \quad \gamma = h / T$$

Уравнения движения манипулятора в безразмерной форме

Обыкновенные дифференциальные уравнения движения абсолютно твердых вала и исполнительного органа.

$$J_0 \ddot{\alpha}_1 + P \alpha_1 + k_0 \alpha_1 - L_1 = \alpha_0, \quad J_2 (\ddot{\alpha}_1 + \ddot{\alpha}_2) - L_2 = 0$$

$$\alpha = \alpha_1 - y_1, \quad m_2 (\ddot{y}_1 - \ddot{\alpha}_1) - N_2 = 0$$

Дифференциальное уравнение с частными производными, моделирующее процессы изгиба стержня.

$$\ddot{y} + \left(1 + \gamma \frac{D}{Dt}\right) y'''' = z \alpha_1, \quad ()' = \frac{D}{Dz}$$

Граничные условия.

$$z = 0: y(0, t) = 0, \quad y'(0, t) = 0$$

$$z = 1: y(1, t) = y_1(t), \quad y'(1, t) = -\alpha_2$$

Начальные условия.

$$t = 0: \alpha_1(0) = \ddot{\alpha}_1(0) = \alpha_2(0) = \ddot{\alpha}_2(0) = y_1(0) = \ddot{y}_1(0) = y(z, 0) = \ddot{y}(z, 0) = 0$$

Уравнения связи абсолютно твердых вала и исполнительного органа через гибкий стержень.

$$L_1 = - \left(1 + \gamma \frac{D}{Dt}\right) y''(0, t), \quad L_2 = \left(1 + \gamma \frac{D}{Dt}\right) y''(1, t)$$

$$N_2 = \left(1 + \gamma \frac{D}{Dt}\right) y''''(1, t)$$

Уравнения системы управления манипулятором в изображениях

$$(J_0\lambda^2 + k_0\lambda + \Pi(\lambda)p)\alpha_1(\lambda) - L_1(\lambda) = p\alpha_0(\lambda) \quad J_2\lambda^2(\alpha_1(\lambda) + \alpha_2(\lambda)) - L_2(\lambda) = 0$$

$$m_2\lambda^2(y_1(\lambda) - \alpha_1(\lambda)) - N_2(\lambda) = 0, \quad \alpha(\lambda) = \alpha_1(\lambda) - y_1(\lambda), \quad \Pi(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{B(\lambda)}$$

$$y''''(z, \lambda) - k^4 y(z, \lambda) = -k^4 z\alpha_1(\lambda), \quad k^4 = -\frac{\lambda^2}{1 + \gamma\lambda}$$

$$z = 0: y(0, \lambda) = 0, \quad y'(0, \lambda) = 0 \quad z = 1: y(1, \lambda) = y_1(\lambda), \quad y'(1, \lambda) = -a_2(\lambda)$$

$$L_1(\lambda) = -(1 + \gamma\lambda)y''(0, \lambda), \quad L_2(\lambda) = (1 + \gamma\lambda)y''(1, \lambda) \quad N_2(\lambda) = (1 + \gamma\lambda)y'''(1, \lambda)$$

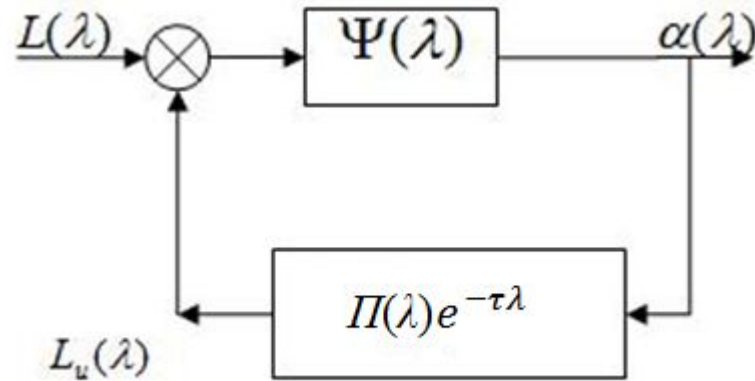
Здесь $\alpha_0(\lambda)$, $\alpha_1(\lambda)$, $\alpha_2(\lambda)$, $y_1(\lambda)$, $y(z, \lambda)$, $L_1(\lambda)$, $L_2(\lambda)$, $N_2(\lambda)$ – изображения соответствующих оригиналов; $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ – многочлены; $\Pi(\lambda)$ – рациональная дробь; λ – произвольный комплексный параметр.

Выберем характерный прогиб δ стержня используя методы теории упругости.

Согласно этой теории в стержне будут отсутствовать пластические деформации, если его характерный прогиб δ удовлетворяет условию

$$\delta \leq \frac{s^2}{d} \cdot 10^{-3} [M] \quad ; \quad \text{поэтому принимаем} \quad \delta = \frac{s^2}{d} \cdot 10^{-3} [M] \quad , \text{где } d \text{ - характерный диаметральный размер поперечного сечения стержня в направлении изгиба.}$$

Передаточные функции замкнутой и разомкнутой систем стабилизации манипулятора



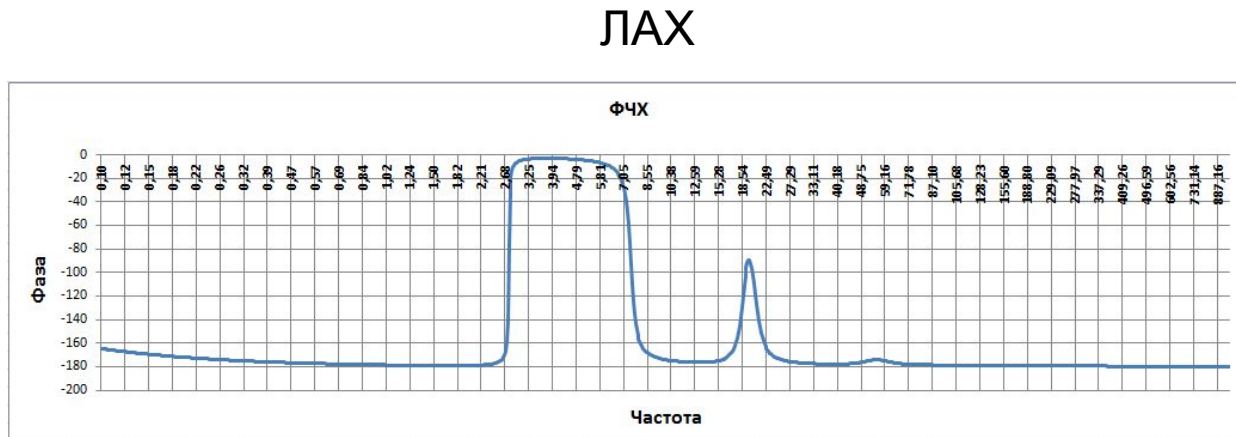
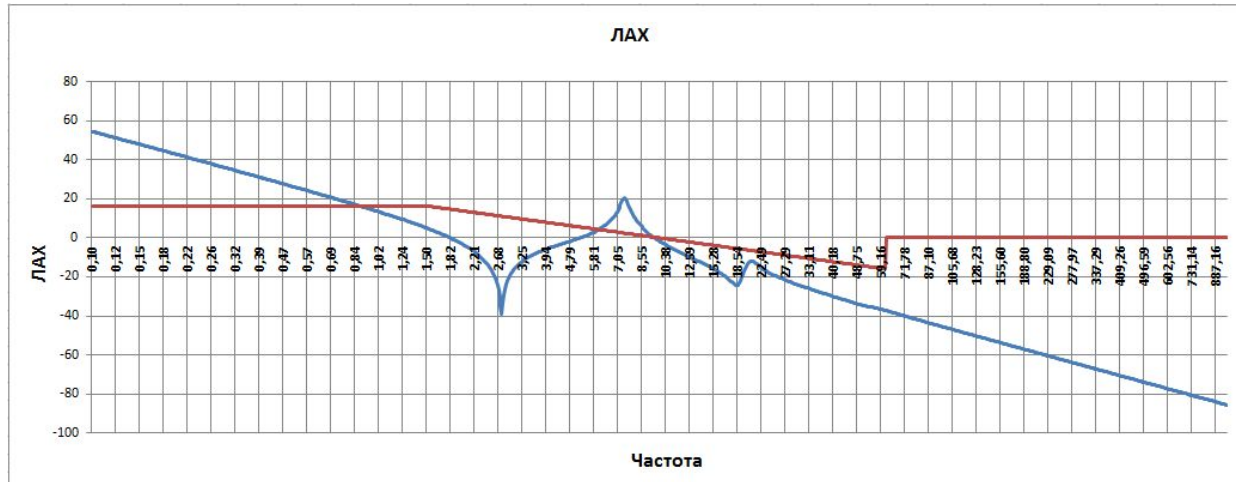
Структурная схема системы стабилизации манипулятора с регулятором самого общего вида

$$\Phi(\lambda) = \frac{\Psi(\lambda)}{1 + \Psi(\lambda)\Pi(\lambda)e^{-\tau\lambda}} = \frac{\alpha(\lambda)}{L(\lambda)} \quad \Psi(\lambda)\Pi(\lambda)e^{-\tau\lambda} = \frac{L_{\mu}(\lambda)}{L(\lambda)}$$

передаточная функция замкнутой системы управления

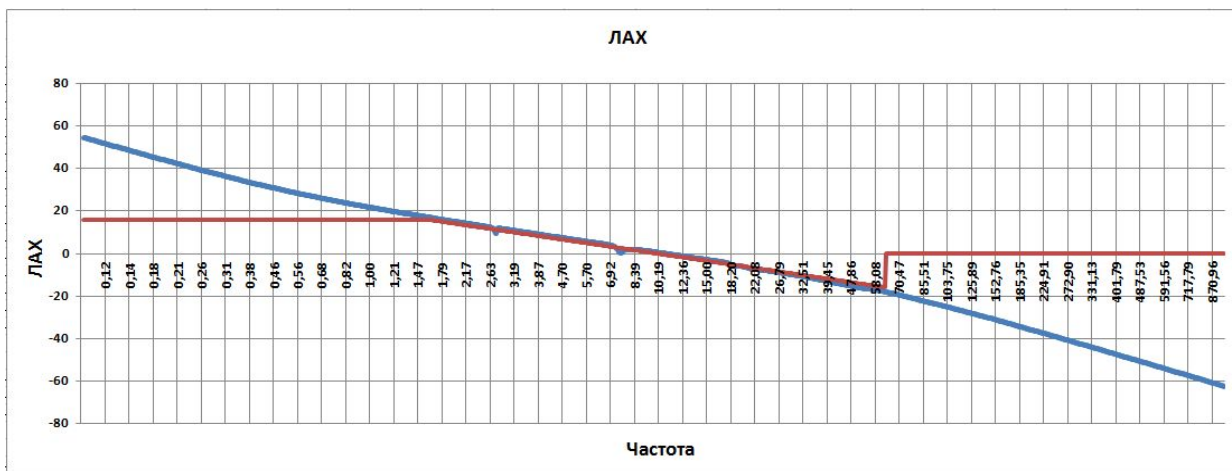
передаточная функция разомкнутой системы управления

Синтез регулятора для системы управления манипулятором по методу ЛАЧХ

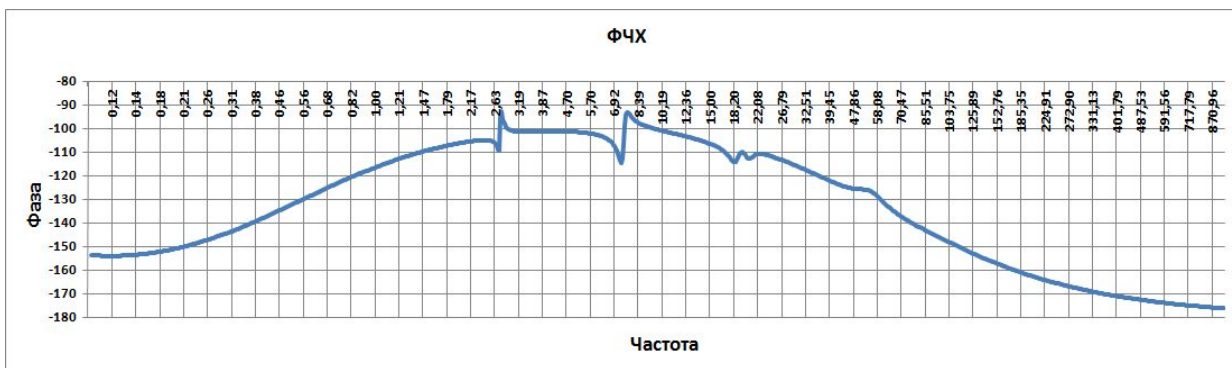


ФЧХ

ЛАФЧХ системы управления при $T=0.36$

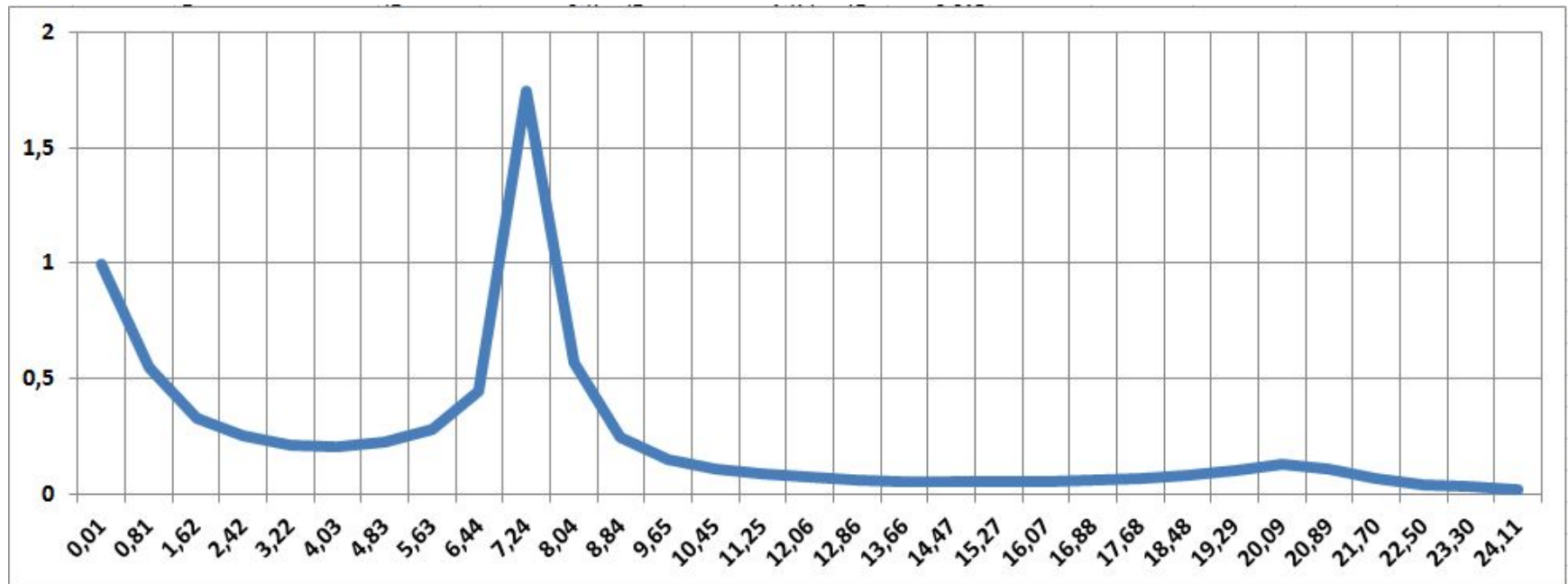


ЛАХ



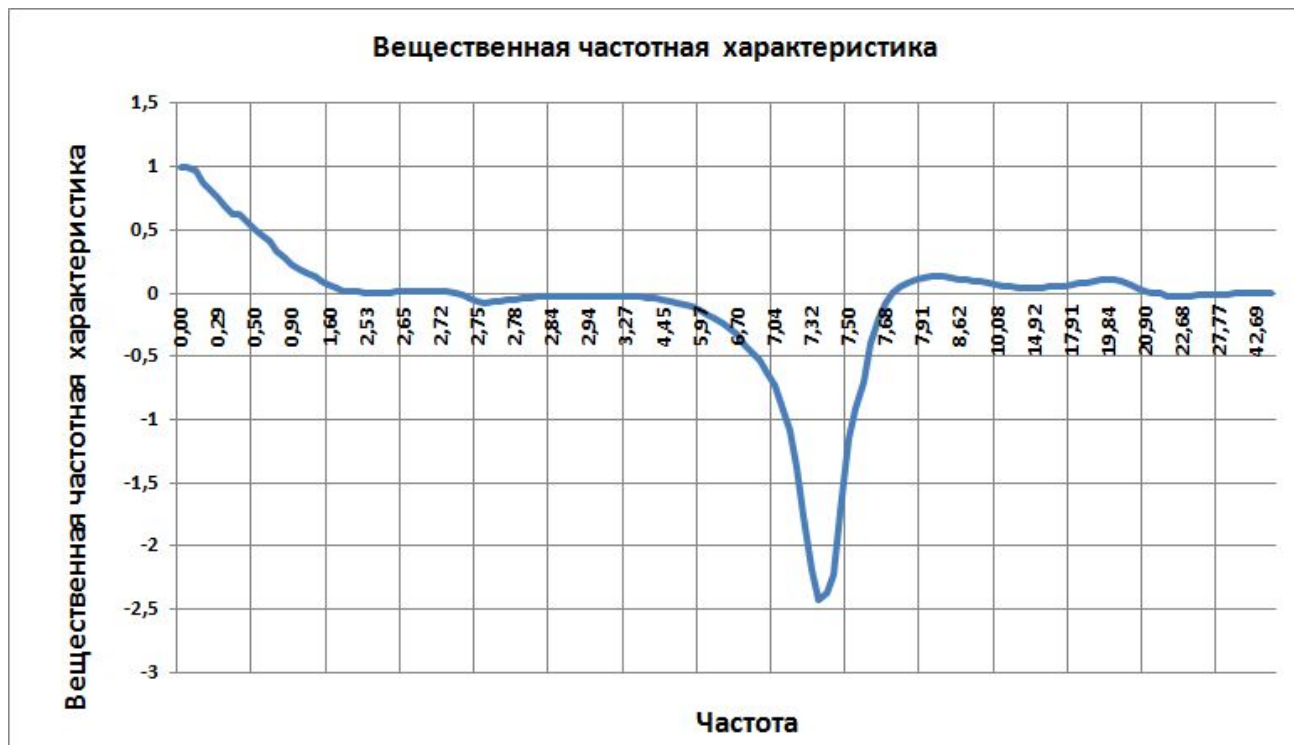
ФЧХ

Амплитудная частотная характеристика замкнутой системы



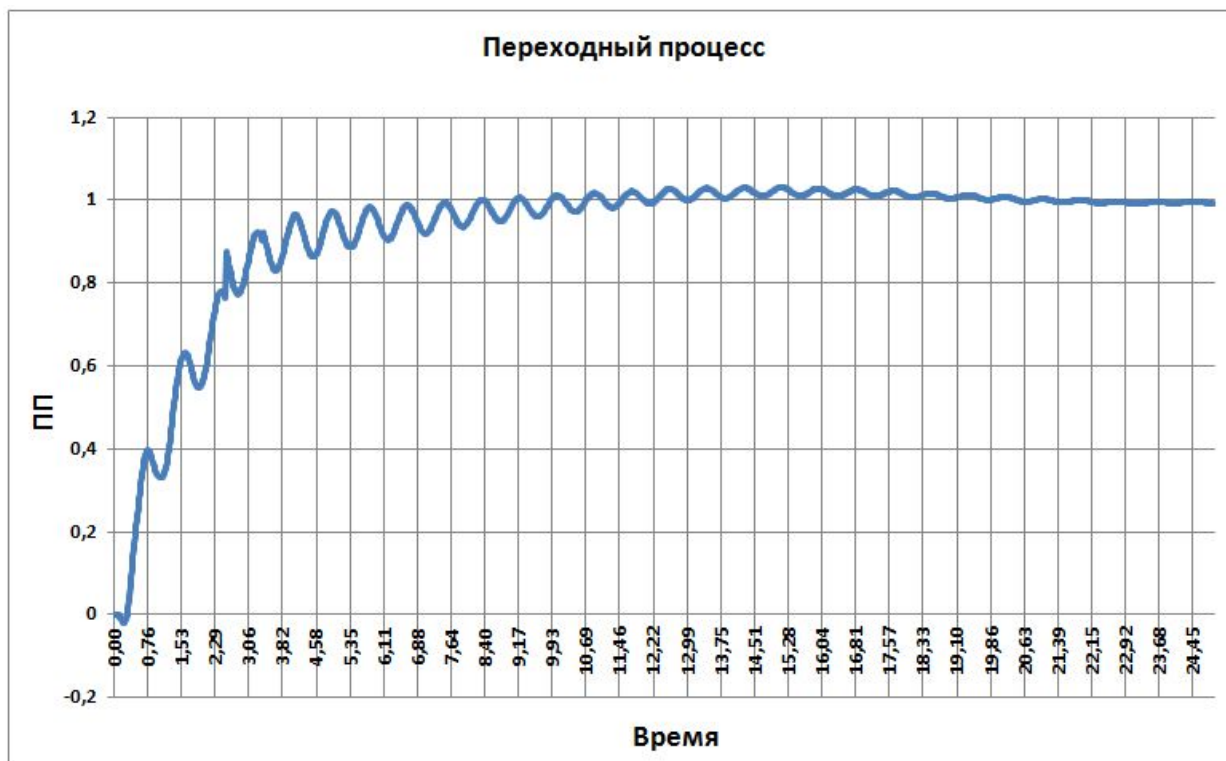
АЧХ

Вещественная частотная характеристика замкнутой системы

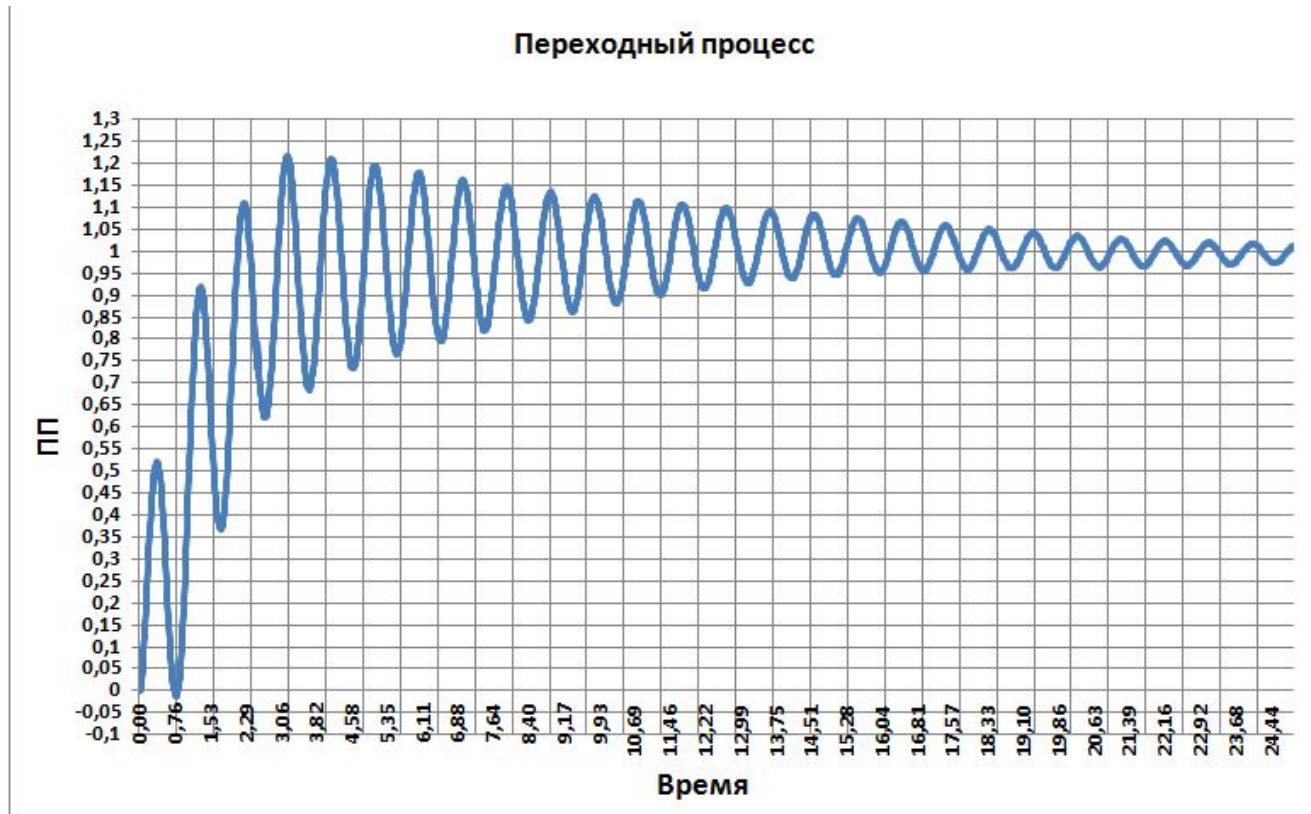


ВЧХ

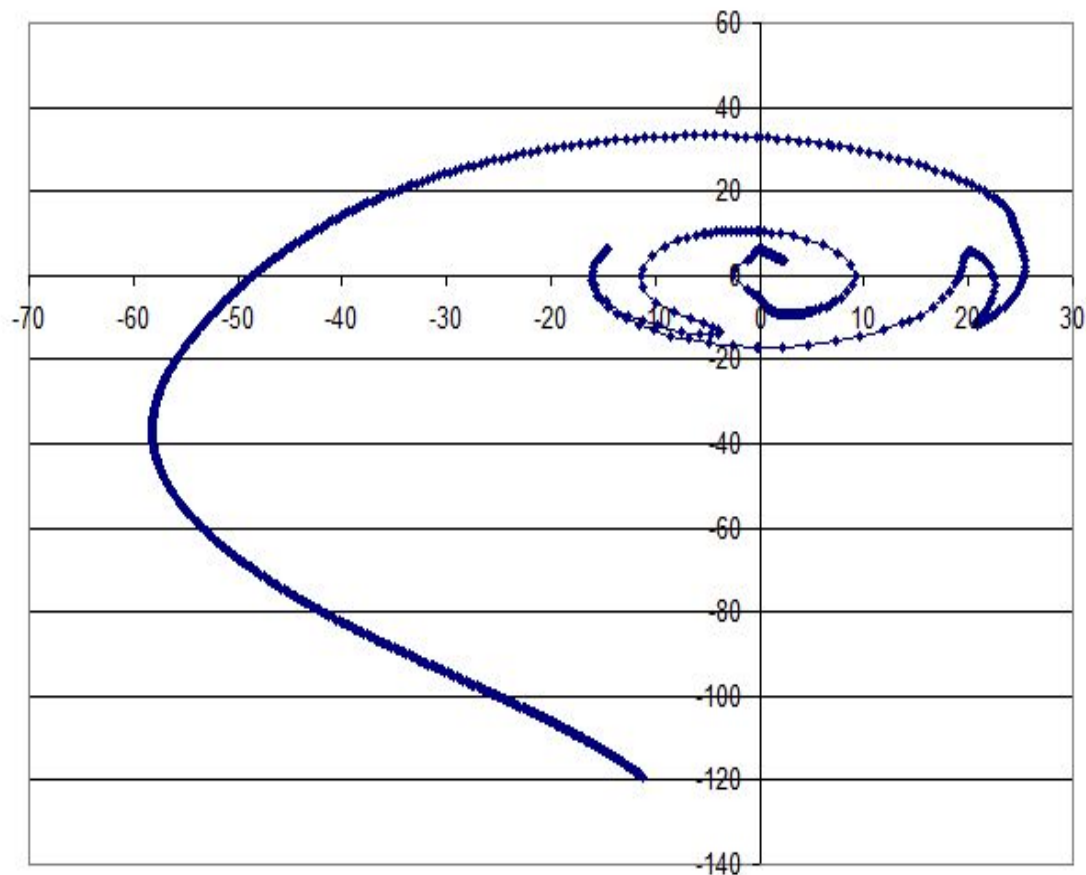
Переходный процесс по углу поворота вала



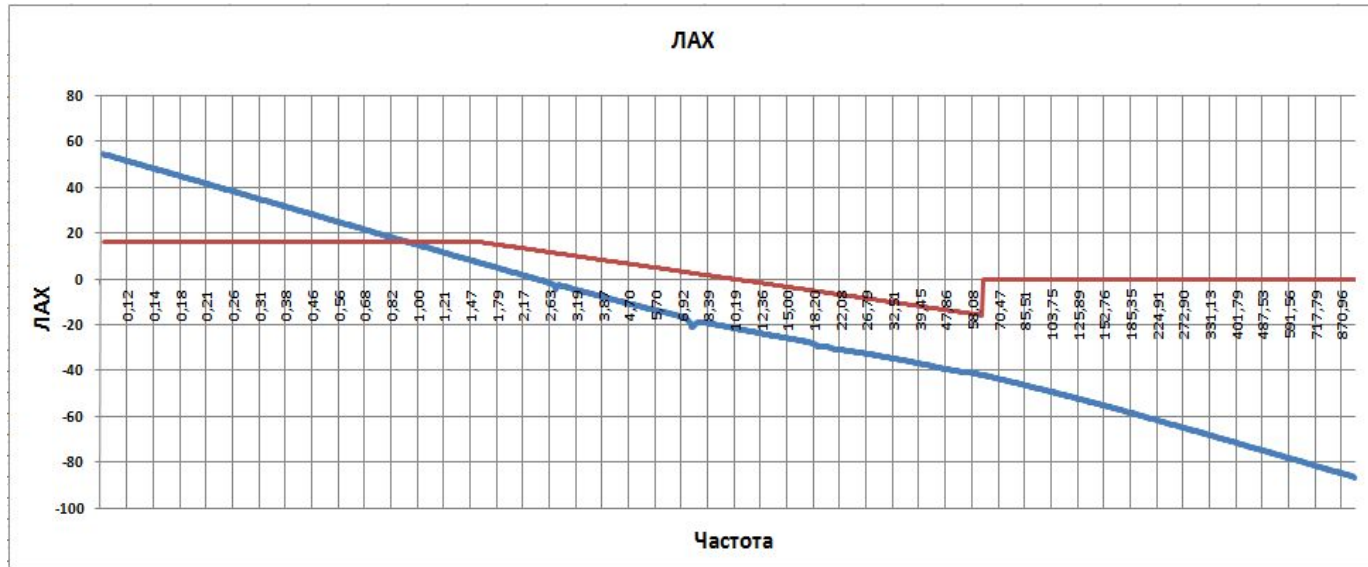
Переходный процесс по углу поворота стержня манипулятора



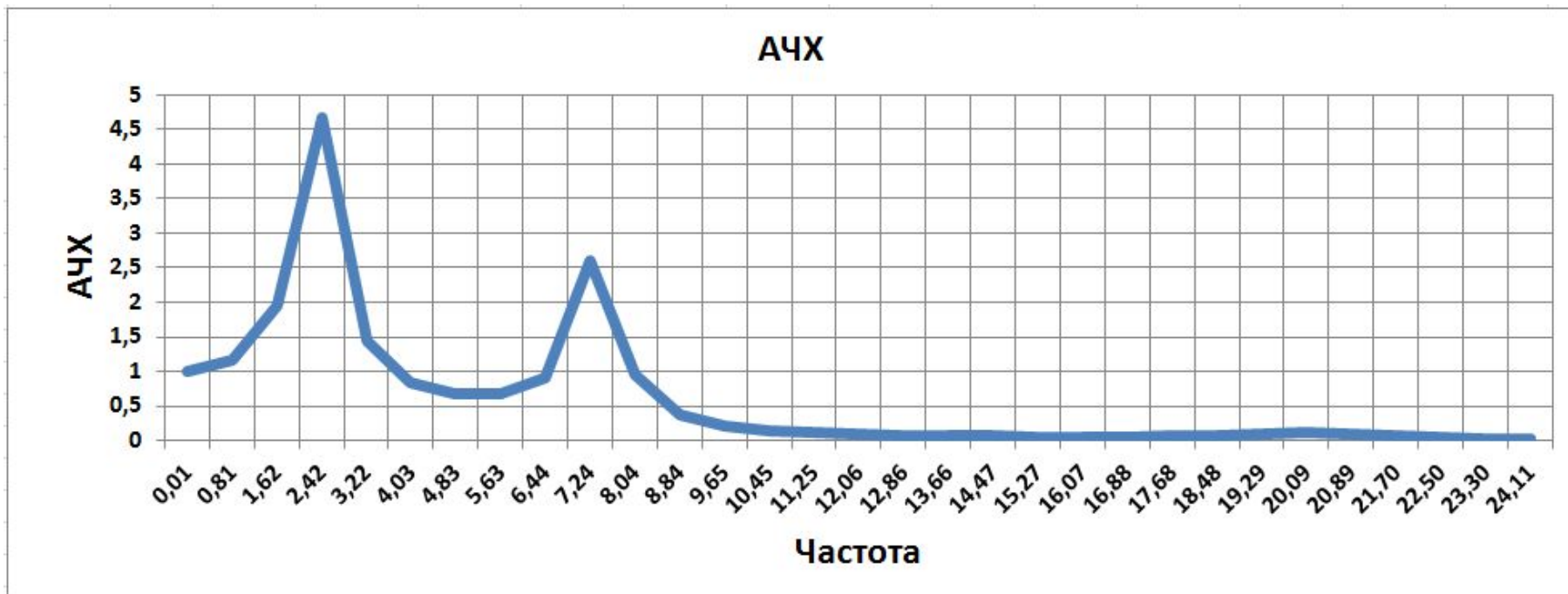
Исследование устойчивости системы управления манипулятором по критерию Михайлова



ЛАФЧХ системы управления при $T=0.125$

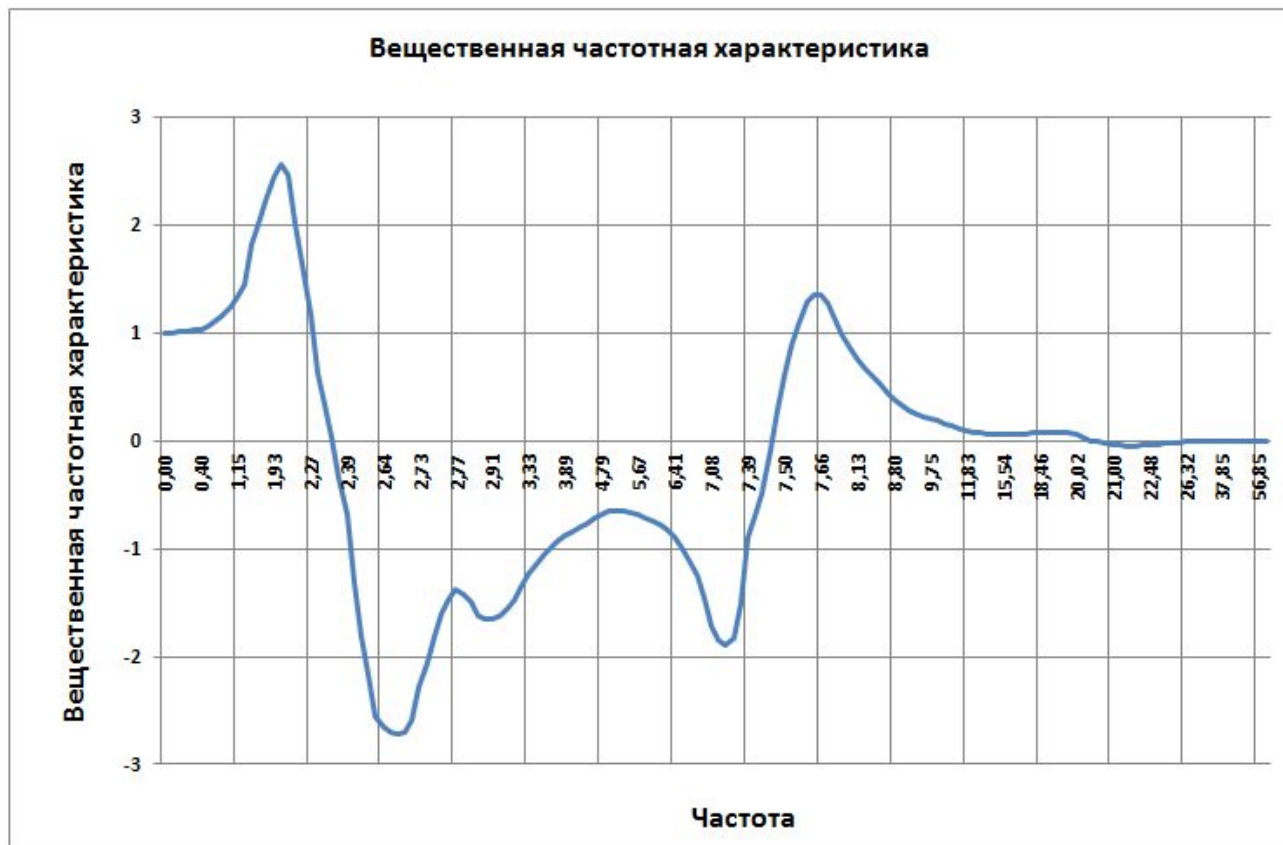


Амплитудная частотная характеристика замкнутой системы



АЧХ

Вещественная частотная характеристика замкнутой системы



ВЧХ

Переходный процесс по углу поворота вала



Переходный процесс по углу поворота стержня манипулятора



Таблица частотных характеристик

Постоянная времени дифф. звена	Параметр ЛФЧХ			АЧХ Показатель колеб.	ВЧХ		ПП	
	Частота ср. $\omega_{ср}$	Запас по фазе ϕ	Запас по амплитуде L		P_{max}	$\Omega_{сн}$	Время t.	Перерегулирование
1.50	9.75	80	∞	1	1	7.64	9.17	1.05
1	5.3	75	∞	1	1	7.56	3.28	1.05
0.5	2.99	56	∞	1.2	1	7.49	3.06	1.2
0.25	2.31	36	∞	2.1	1.35	7.46	6	1.5
0.125	2.25	13	∞	4.6	2.5	7.44	12	1.7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- СФОРМУЛИРУЕМ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ:
- 1. Разработаны размерная и безразмерная математические модели системы управления манипулятора с рабочим инструментом в виде вязкоупругого стержня.
- 2. Сформирована структурная схема системы управления плоским движением манипулятора с вязкоупругим стержнем. Получены передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем управления манипулятором.
- 3. Методом логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик получены корректирующие устройства для системы управления плоским движением манипулятора с вязкоупругим стержнем, для разных значений частотных показателей качества управления.
- 4. Показано, что для системы управления манипулятора с рабочим инструментом в виде вязкоупругого стержня для получения приемлемых показателей переходных процессов требуются более высокие частотные показатели качеств по сравнению с системами с сосредоточенными параметрами.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ