МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
ФГБОУ ВПО «СамГТУ»

Институт заочного образования
Кафедра: «Автоматизации и управление технологическими процессами»

Курсовая работа по дисциплине «Теория автоматического управления»

Вариант 5

Выполнила:
студентка гр. 41-А
Николаева Н.А.

Принял:
Асс. Дьяконов Артем Игоревич

г. Самара
2020

Задание

Задание 1. Получить передаточную функцию объекта управления из дифференциального уравнения, где y(t)- управляемая величина, x(t) - управляющее воздействие. Значения параметров выбрать в соответствии с вариантом из таблицы 1.

$$T_1\frac{d^2y(t)}{dt^2}+T_2\frac{dy(t)}{dt}+y(t)=K_1\frac{d^2x(t)}{dt^2}+K_2\frac{dx(t)}{dt}+K_3x(t)$$

Таблица 1

Вариант	K_1	K_2	T_1	T_2	T_3	x	Вариант	K_1	K_2	T_1	T_2	T_3
1	0	0	2	1	3	x	15	0	0	1	17	1
2	0	0	11	19	7	x	16	0	0	12	8	8
3	0	0	4	15	1	x	17	0	0	33	5	3
4	0	0	8	1	18	x	18	0	0	6	5	14
5	0	0	5	4	14	x	19	0	0	23	4	6
6	0	0	6	1	7	x	20	0	0	1	5	5
7	0	0	7	6	1	x	21	0	0	2	21	1
8	0	0	18	1	15	x	22	0	0	3	1	8
9	0	0	3	1	1	x	23	0	0	7	5	17
10	0	0	10	8	19	x	24	0	0	6	4	6
11	0	0	1	12	5	x	25	0	0	2	22	7
12	0	0	7	16	4	x	26	0	0	15	4	6
13	0	0	10	13	8	x	27	0	0	7	18	4
14	0	0	10	4	1	x	28	0	0	5	1	1

Задание 2. Получить описание в пространстве состояний для передаточной функции из задания 1.

Построить граф заданного объекта на интеграторах, реализовать полученный граф в пакете VisSim или MatLab.

Задание 3. Получить частотную передаточную функцию для передаточной функции из задания 1. Записать выражения для АЧХ, ФЧХ, АФХ. Построить данные частотные характеристики с помощью пакета MS Excel или аналогичного. Диапазон изменения частоты согласовать индивидуально для каждого варианта. Сделать выводы.

Задание 4. Найти корни характеристических уравнений разомкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 и замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1. Сделать выводы о характере переходных процессов, устойчивости систем.

Задание 5. Оценить устойчивость разомкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 и замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1 с помощью критерия устойчивости Гурвица.

Задание 6. Оценить устойчивость замкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 с помощью критерия устойчивости Михайлова.

Задание 7. Оценить устойчивость замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1, используя разомкнутую систему.

Задание 8. Построить переходные характеристики разомкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 и замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1 с помощью пакетов VisSim или MatLab. Оценить показатели качества процесса управления (время переходного процесса, перерегулирование, статическую ошибку. Сделать выводы.

Задание 9. Получить эквивалентную передаточную для структурной схемы согласно варианту из таблицы 2.

Таблица 2

Вар.	K_1	K_2	K_3	K_4	T_1	T_2	a	Схема	x	Вар.	K_1	K_2	K_3	K_4	T_1	T_2	a	Схема
1	5	12	1	11	3	12	1	1	x	15	4	3	10	12	8	20	1	2
2	3	11	2	5	17	10	2	1	x	16	8	5	12	2	20	2	2	2
3	4	10	10	4	15	11	3	1	x	17	7	4	11	8	3	18	3	2
4	8	9	12	12	18	1	4	1	x	18	6	6	9	13	22	20	4	2
5	7	8	11	2	20	3	5	1	x	19	1	12	5	9	9	12	5	2
6	6	7	9	8	22	5	6	1	x	20	2	11	3	1	18	19	6	2
7	1	6	5	13	19	4	7	1	x	21	10	9	4	3	11	13	7	2
8	2	2	3	9	6	6	8	1	x	22	12	5	8	7	4	7	8	2
9	10	18	4	1	9	22	9	1	x	23	11	6	7	2	7	6	9	2
10	12	20	8	3	8	18	10	1	x	24	9	8	6	8	13	9	10	2
11	11	12	7	7	16	15	11	1	x	25	13	2	6	3	3	8	11	2
12	9	19	6	11	7	12	12	1	x	26	1	2	5	6	11	7	12	2
13	5	7	1	5	14	7	13	1	x	27	5	7	3	5	8	2	13	2
14	3	6	2	4	5	3	14	1	x	28	6	7	4	7	10	4	14	2

Схема 1

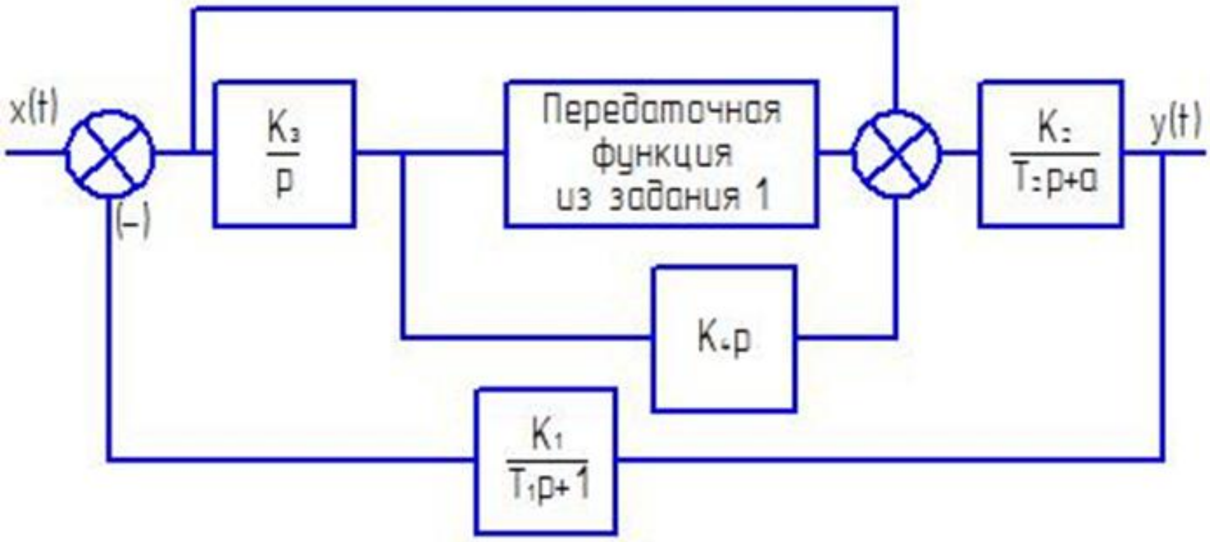
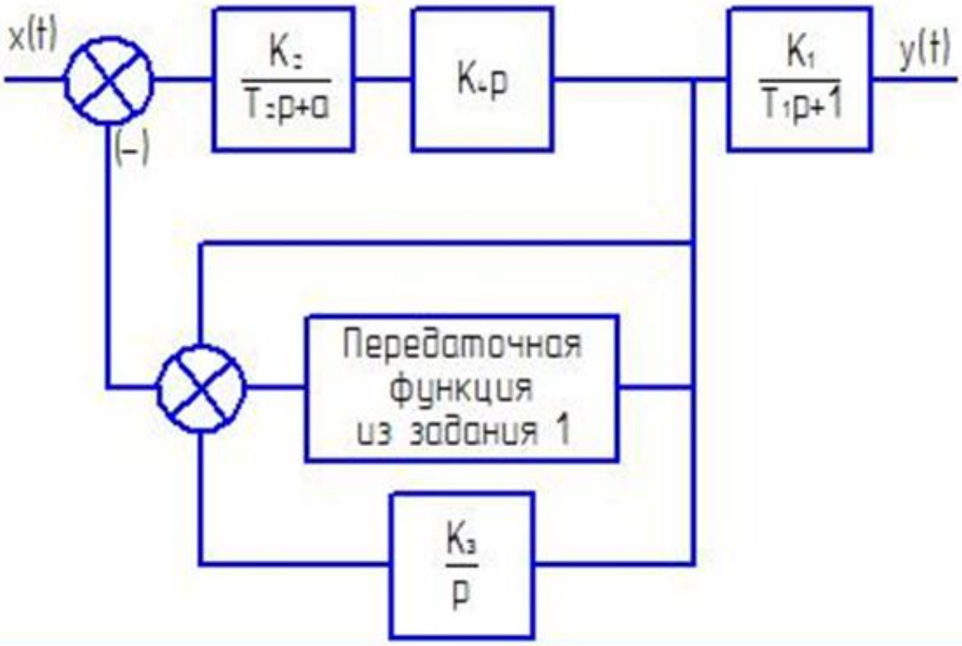


Схема 2



Содержание

Задание 1. Получить передаточную функцию объекта управления из дифференциального уравнения, где $y(t)$ - управляемая величина, x(t) - управляющее воздействие.

$$T_1 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + T_2 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_1 \frac{d^2x(t)}{dt^2} + K_2 \frac{dx(t)}{dt} + K_3 x(t)$$

Значения параметров выбираем в соответствии с вариантом из таблицы 1.

$$K_1 = 0,\ K_2 = 0,\ K_3 = 5,\ T_1 = 4с,\ T_2 = 14с$$

Тогда исходное выражение дифференциального уравнения примет вид:

$$T_1 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + T_2 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_3 x(t)$$

$$4 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 14 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 5x(t)$$

Допустим, что входной сигнал имеет форму единичного ступенчатого воздействия, т.е. x(t) = 1. Тогда изображение входного сигнала примет вид x(p)=$\frac{1}{p}$

Произведем замену: $\frac{dy(t)}{dt} = pY(p)$; $\quad \frac{dx(t)}{dt} = pX(p)$

Тогда операторное уравнение (при нулевых начальных условиях) в данном случае примет вид:

$$T_1 p^2 Y(p) + T_2 p Y(p) + Y(p) = K_3 X(p)$$

Преобразуем выражение

$$Y(p)(T_1 p^2 + T_2 p + 1) = K_3 X(p)$$

Найдем отношение изображения выходного сигнала к изображению входного

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K_3}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}$$

Подставляя в выражение исходные данные, получаем выражение передаточной функции исходной системы

$$W(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 1}$$

Задание 2. Получить описание в пространстве состояний для передаточной функции из задания 1. Построить график заданного объекта на интеграторах, реализовать полученный график в пакете VisSim или MatLab.

$$W(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 1}$$

Модель в пространстве состояний задается матрицами.

Матрица A системы характеризует динамические свойства системы. В нижней строке матрицы A записываются коэффициенты знаменателя с обратным знаком, над главной диагональю – единицы, а остальные элементы – нули.

$$\mathrm{A} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -4 & -14 & -1 \end{vmatrix}$$

Матрица B управления характеризует воздействие входных величин на переменные состояния. В матрице B только самый последний элемент – единица, а остальные – нули.

$$\mathrm{B} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Матрица C измерения размера характеризует связь выходных координат y_k с переменными состояния. Матрица C строится из коэффициентов числителя передаточной функции.

$$\mathrm{C} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 5 \end{vmatrix}$$

При увеличении порядка передаточной функции (степени ее знаменателя), эти матрицы расширяются.

Задание 3. Получить частотную передаточную функцию для передаточной функции из задания 1. Записать выражения для АЧХ, ФЧХ, АФХ. Построить данные частотные характеристики с помощью пакета MS Excel или аналогичного. Диапазон изменения частоты согласовать индивидуально для каждого варианта. Сделать выводы.

Передаточная функция исходной системы

$$W(p) = \frac{K_3}{T_1 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{5}{4p^2 + 14p + 1}$$

где $K_3 = 5,\ T_1 = 4,\ T_2 = 14$

Выполнив подстановку p = jω, получим комплексную частотную функцию W(jω).

$$W(j\omega) = \frac{K_3}{T_1 (j\omega)^2 + T_2 j\omega + 1} = \frac{5}{4(j\omega)^2 + 14j\omega + 1} = \frac{5}{(1 - 4\omega^2) + 14j\omega}$$

Представим выражение комплексной частотной функции в виде суммы мнимой и действительной частей (выражение АФЧХ), для этого умножим числитель и знаменатель на сопряженное число $[(1 - 4\omega^2) - 14j\omega)]$

$$W(j\omega) = \frac{5 \cdot [(1 - 4\omega^2) - 14j\omega)]}{[(1 - 4\omega^2) + 14j\omega)] \cdot [(1 - 4\omega^2) - 14j\omega)]} = \frac{5 - 20\omega^2 - 70j\omega}{(1 - 4\omega^2)^2 + 196\omega^2}$$

Где

$$\mathrm{P}(\omega) = \frac{5 - 20\omega^2}{(1 - 4\omega^2)^2 + 196\omega^2} - \text{действительная часть}$$

$$Q(\omega) = -j\frac{70\omega}{(1 - 4\omega^2)^2 + 196\omega^2} - \text{мнимая часть}$$

Модуль (выражение АЧХ)

$$A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2} = \sqrt{\frac{(5 - 20\omega^2)^2}{[(1 - 4\omega^2)^2 + 196\omega^2]^2} + \frac{(70\omega)^2}{[(1 - 4\omega^2)^2 + 196\omega^2]^2}}$$

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{(5 - 20\omega^2)^2 + (70\omega)^2}}{(1 - 4\omega^2)^2 + 196\omega^2}$$

Аргумент (выражение ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = arctg\frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = -arctg\frac{70\omega}{5 - 20\omega^2}$$

Каждому значению ω соответствуют определенные значения P(ω), jQ(ω), A(ω) и φ(ω) и определенная точка на комплексной плоскости. Изменяя частоту ω от 0 до +∞, вычисляем значения частотных характеристик. Результаты расчетов приведены в таблице 1. По данным таблицы 1 строим графики частотных характеристик.

Таблица 1 – Значения частотных характеристик

ω	**P(ω)**	**Q(ω)**	**A(ω)**	**φ(ω)**
0	5,00	0,00	5,00	0,00
0,1	1,67	-2,43	2,79	-0,97
0,2	0,49	-1,64	1,59	-1,28
0,3	0,18	-1,16	1,09	-1,42
0,4	0,06	-0,89	0,82	-1,51
0,5	0,00	-0,71	0,66	
0,7	-0,05	-0,51	0,47	1,47
0,8	-0,06	-0,44	0,41	1,43
0,9	-0,07	-0,38	0,36	1,39
1	-0,07	-0,34	0,32	1,36
2	-0,07	-0,14	0,15	1,08
4	-0,04	-0,04	0,06	0,73
6	-0,03	-0,02	0,03	0,53
8	-0,02	-0,01	0,02	0,41
10	-0,01	0,00	0,01	0,34
20	0,00	0,00	0,00	0,17
50	0,00	0,00	0,00	0,07
100	0,00	0,00	0,00	0,03
500	0,00	0,00	0,00	0,01
1000	0,00	0,00	0,00	0,00

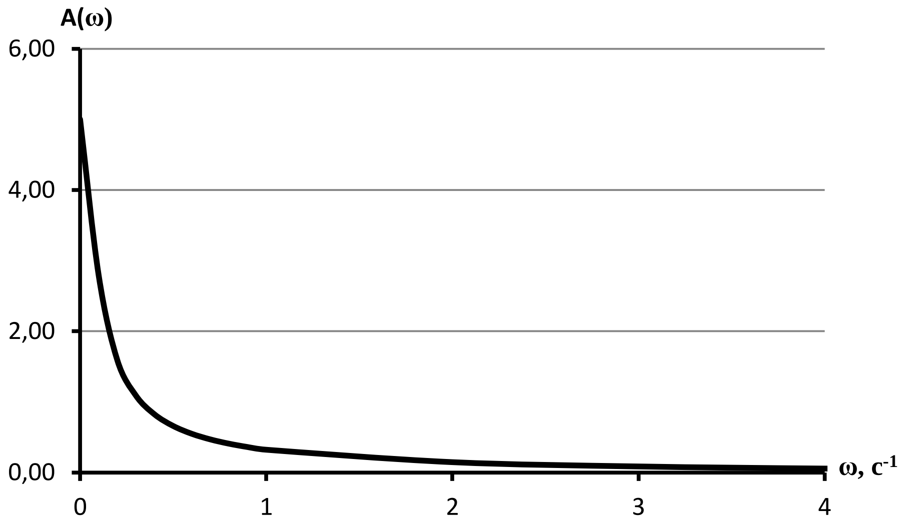


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

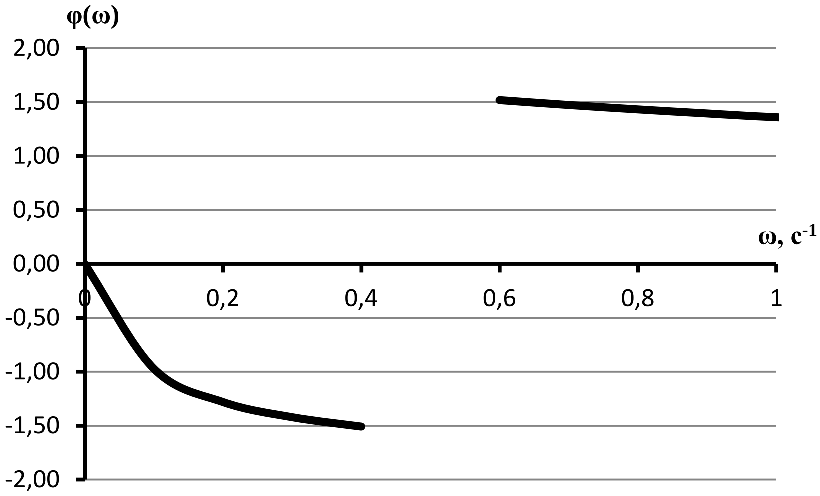


Рисунок 2 –Фазово-частотная характеристика (ФЧХ)

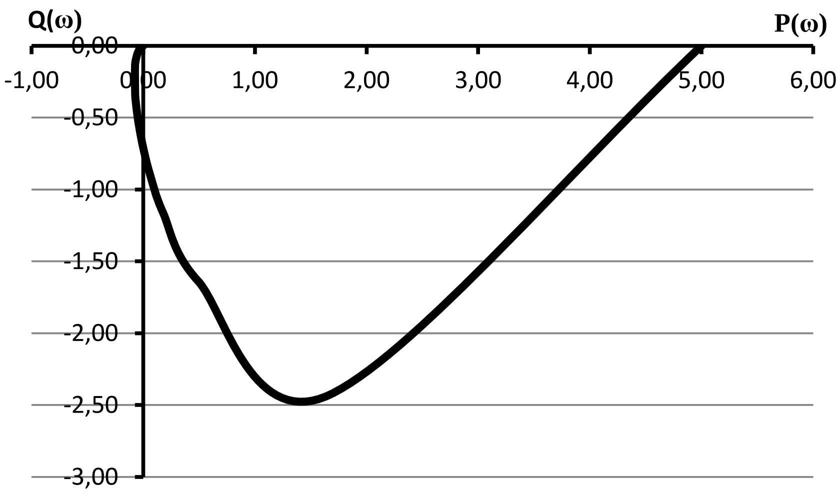


Рисунок 3 – Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ)

Задание 4. Найти корни характеристических уравнений разомкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 и замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1. Сделать выводы о характере переходных процессов, устойчивости систем

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 1}$$

Передаточная функция замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 6}$$

Характеристическим уравнением системы является знаменатель передаточной функции.

Характеристическое уравнение разомкнутой системы

$$\text{A(p)}_{\text{раз}} = 4p^2 + 14p + 1 = 0$$

Корни характеристического уравнения

$$p_1 = -0{,}07$$

$$p_2 = -3{,}43$$

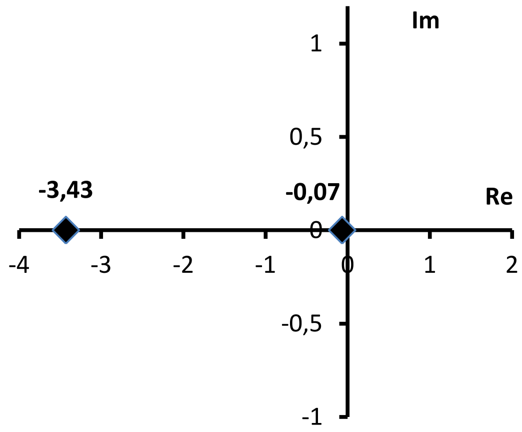


Рисунок 4

Распределение корней на комплексной плоскости показано на рисунке 4. По рисунку видно, что корни лежат в левой полуплоскости, следовательно, система устойчива.

Характеристический полином замкнутой САР равен сумме числителя и знаменателя передаточной функции разомкнутой цепи. Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$\text{A(p)}_{\text{зам}} = 4p^2 + 14p + 6 = 0$$

Корни характеристического уравнения

$$p_1 = -3$$

$$p_2 = -0{,}5$$

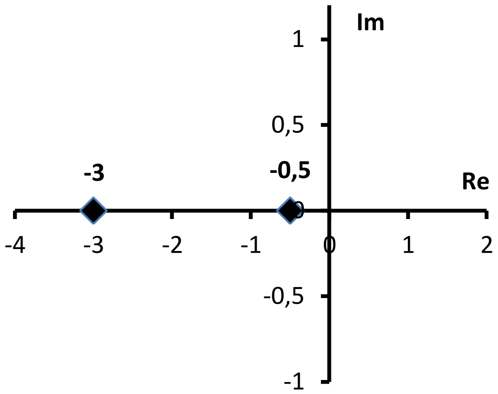


Рисунок 5

Распределение корней на комплексной плоскости показано на рисунке 5, по которым видно, что действительные корни находятся слева от мнимой оси, следовательно, система устойчива.

Задание 5. Оценить устойчивость разомкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 и замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1 с помощью критерия устойчивости Гурвица.

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 1}$$

Передаточная функция замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 6}$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$\mathrm{A(p)}_{\text{зам}} = 4p^2 + 14p + 6 = 0$$

Условие устойчивости

$$a_0 = 4 > 0; \quad a_1 = 14 > 0; \quad a_2 = 6 > 0$$

Для того чтобы система, описываемая дифференциальным уравнением второго порядка, была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения были положительны. В нашем случае все три коэффициента положительные, следовательно, система устойчивая.

Задание 6. Оценить устойчивость замкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 с помощью критерия устойчивости Михайлова

Критерий устойчивости Михайлова основан на рассмотрении характеристического полинома замкнутой САР, который равен сумме числителя и знаменателя передаточной функции разомкнутой цепи.

Характеристический полином имеет вид

$$\mathrm{A(p)}_{\text{зам}} = 4p^2 + 14p + 6 = 0$$

Подставив, в характеристический полином вместо p мнимую переменную jω. Получим комплексную функцию:

$$\mathrm{A}(\mathrm{j}\omega) = \mathrm{X}(\omega) + \mathrm{jY}(\omega),$$

где X(ω) - действительная часть, полученная из членов A(p), содержащих четные степени p;

jY(ω) – мнимая часть, полученная из членов A(p) с нечетными степенями p.

$$X(\omega) = 6 - 4\omega^2$$

$$jY(\omega) = j14\omega$$

Каждому значению ω соответствуют определенные значения X(ω) и Y(ω) и определенная точка на комплексной плоскости. Изменяя частоту ω от 0 до +∞, вычисляем значения действительной и мнимой частей. Результаты расчетов приведены в таблице 2. По данным таблицы 2 строим годограф Михайлова.

Таблица 2 – Координаты годографа Михайлова

ω	**0**	**0,1**	**0,2**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,8**	**0,9**	**1**	**3**	**4**	**5**
X(ω)	6,0	6,0	5,8	5,4	5,0	4,6	3,4	2,8	2,0	-30,0	-58,0	-94,0
Y(ω)	0,0	1,4	2,8	5,6	7,0	8,4	11,2	12,6	14,0	42,0	56,0	70,0

Система устойчива, т.к. годограф A(jω), представленный на рисунке 6, начинаясь на действительной положительной полуоси, огибает против часовой стрелки начало координат, проходя последовательно 2 квадрантов, где 2 – порядок системы.

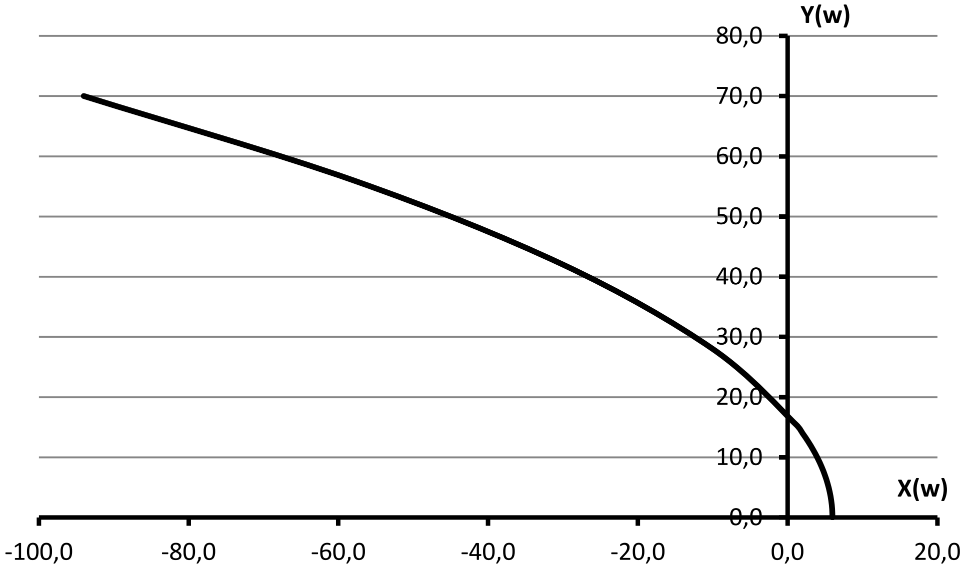


Рисунок 6 – Годограф Михайлова

Задание 7. Оценить устойчивость замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1, используя разомкнутую систему

Критерий устойчивости Найквиста позволяет судить об устойчивости замкнутой САР по амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы из задания 3.

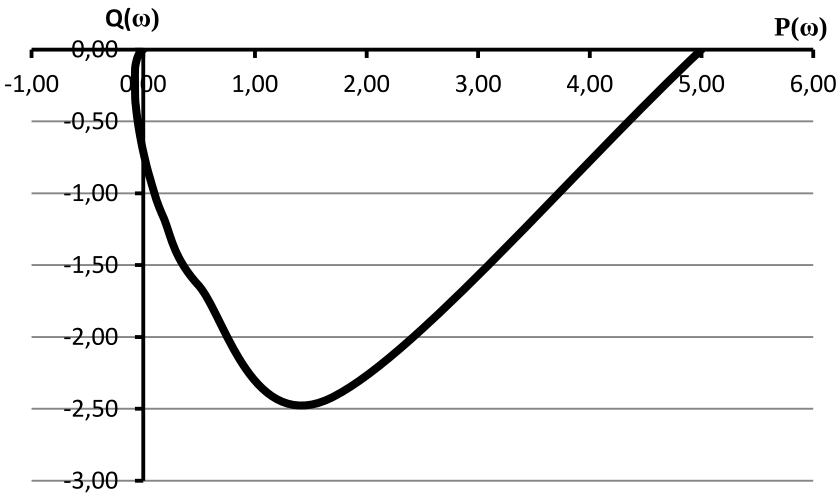


Рисунок 7 - Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ)

Система устойчива, т.к. АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами (-1; j0), следовательно, система устойчива.

Задание 8. Построить переходные характеристики разомкнутой системы с передаточной функцией из задания 1 и замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью с передаточной функцией из задания 1 с помощью пакетов VisSim или MatLab. Оценить показатели качества процесса управления (время переходного процесса, перерегулирование, статическую ошибку) Сделать выводы

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 1}$$

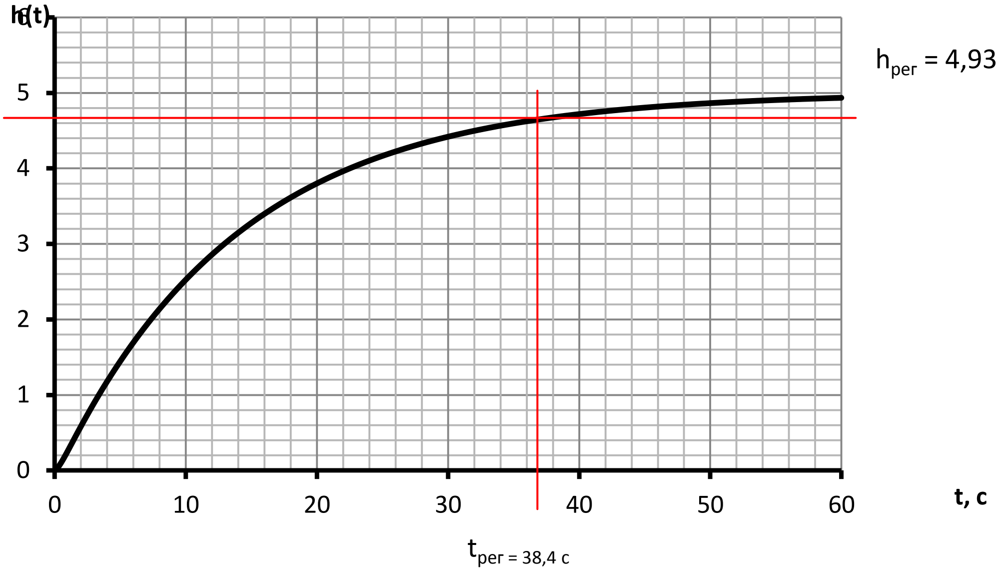


Рисунок 8 - График переходного процесса разомкнутой системы

Передаточная функция замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{5}{4p^2 + 14p + 6}$$

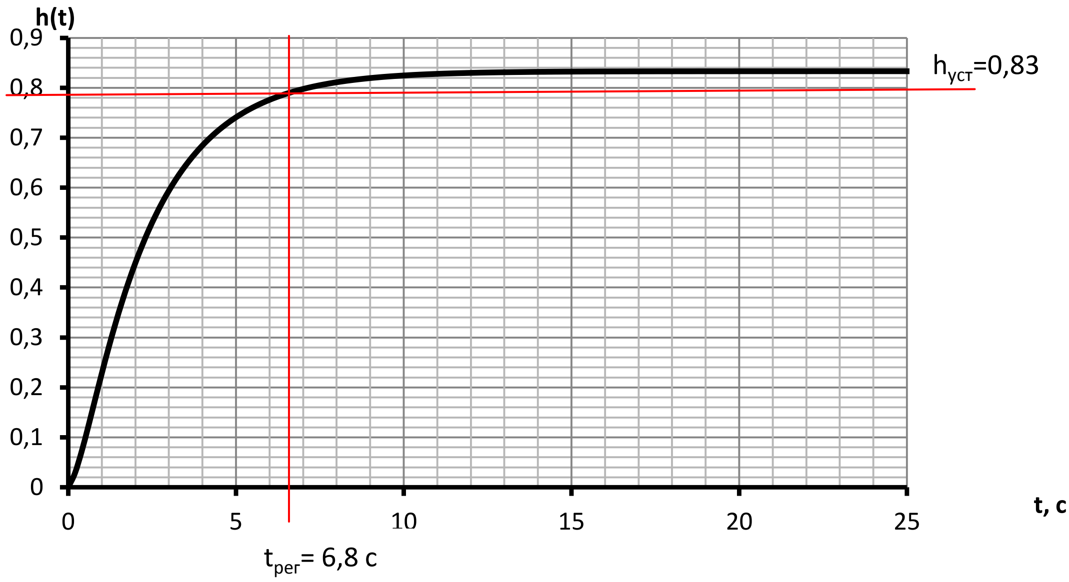


Рисунок 9 - График переходного процесса замкнутой системы

По графику переходного процесса определяем основные показатели качества: время регулирования и величину перерегулирования.

Время регулирования $t_р$ – минимальное время, по истечении которого регулируемая величина будет оставаться близкой к установившемуся значению с заданной точностью.

$$|h(t) - h_{уст}| \leq \Delta$$

где Δ - постоянная величина, которую задают, обычно $\Delta = 0{,}05\ h_{уст}$;

Величина перерегулирования определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} 100\%$$

Показатели качества разомкнутой системы

Время регулирования $t_{р1} \approx 38{,}4$ с

Величина перерегулирования

$$h_{max1} = 4{,}93 \quad h_{уст1} = 4{,}93$$

$$\sigma_1 = \frac{4{,}93 - 4{,}93}{4{,}93} 100\% = 0\%$$

Статическая ошибка регулирования при задающем воздействии $g_0 = 1$ определяется по формуле

$$\Delta h_{уст} = \frac{1}{1+W(0)} = \frac{1}{1+5} = 0{,}83$$

где W(0) – значение передаточной функции разомкнутой системы при р = 0

Показатели качества замкнутой системы

Время регулирования $t_{р2} \approx 6{,}8$ с

$$h_{max2} = 0{,}83 \quad h_{уст2} = 0{,}83$$

Величина перерегулирования

$$\sigma_2 = \frac{0{,}83 - 0{,}83}{0{,}83} 100\% = 0\%$$

Статическая ошибка регулирования при задающем воздействии $g_0 = 1$ определяется по формуле

$$\Delta h_{уст} = \frac{1}{1+W(0)} = \frac{1}{1+0{,}83} = 0{,}55$$

Сравнивая показатели качества, заключаем:

- время регулирования переходного процесса замкнутой системы меньше на 31,6 с;

- величина перерегулирования переходного процесса разомкнутой системы и величина перерегулирования переходного процесса замкнутой системы равны

$$\sigma_2 = \sigma_1 = 0$$

Задание 9. Получить эквивалентную передаточную для структурной схемы согласно варианту из таблицы 2.

Исходные данные: Схема №1

$K_1 = 7,\ K_2 = 8,\ K_3 = 11,\ K_4 = 2,\quad T_1 = 20$ с, $\quad T_2 = 3$ с, $\quad a = 5$

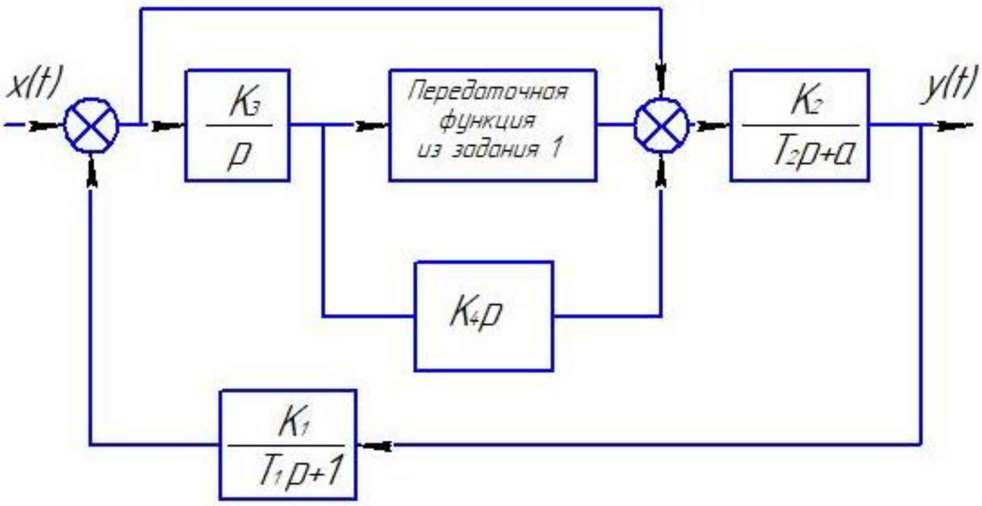


Рисунок 10

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1p+1} = \frac{7}{20p+1}$$

$$W_2(p) = \frac{K_2}{T_2p+a} = \frac{8}{3p+5}$$

$$W_3(p) = \frac{K_3}{p} = \frac{11}{p}$$

$$W_4(p) = K_4p = 2p$$

Передаточная функция из задания 1

$$W_5(p) = \frac{K_5}{T_1p^2+T_2p+1} = \frac{5}{4p^2+14p+1}$$

В исходную структурную схему включено 5 звеньев.

1 блок

Звенья $W_5(p)$ и $W_4(p)$ соединены параллельно.

$$W_{\boldsymbol{I}}(p) = W_5(p) + W_4(p) = \frac{5}{4p^2+14p+1} + 2p$$

$$W_{\boldsymbol{I}}(p) = \frac{8p^3+28p^2+2p+5}{4p^2+14p+1}$$

2 блок

Блок $W_{\mathbf{I}}$(p) и звено W_3(p) соединены последовательно

$$W_{\boldsymbol{II}}(p) = W_{\boldsymbol{I}}(p) \cdot W_3(p) = \frac{8p^3 + 28p^2 + 2p + 5}{4p^2 + 14p + 1} \cdot \frac{11}{p}$$

$$W_{\boldsymbol{II}}(p) = \frac{88p^3 + 308p^2 + 22p + 55}{4p^3 + 14p^2 + p}$$

3 блок

Блок $W_{\mathbf{II}}$(p) охвачен параллельной единичной связью

$$W_{\boldsymbol{III}}(p) = W_{\boldsymbol{II}}(p) + 1 = \frac{88p^3 + 308p^2 + 22p + 55}{4p^3 + 14p^2 + p} + 1$$

$$W_{\boldsymbol{III}}(p) = \frac{92p^3 + 322p^2 + 23p + 55}{4p^3 + 14p^2 + p}$$

4 блок

Блок $W_{\boldsymbol{III}}(p)$ и звено W_2(p) соединены последовательно.

$$W_{\boldsymbol{IV}}(p) = W_{\boldsymbol{III}}(p) \cdot W_2(p) = \frac{92p^3 + 322p^2 + 23p + 55}{4p^3 + 14p^2 + p} \cdot \frac{8}{3p + 5}$$

$$W_{\boldsymbol{IV}}(p) = \frac{736p^3 + 2576p^2 + 184p + 440}{12p^4 + 62p^3 + 73p^2 + 5p}$$

5 блок

Блок $W_{\boldsymbol{IV}}(p)$ охвачен отрицательной обратной связью,

где включено звено W_1(p)

$$W_{\boldsymbol{V}}(p) = \frac{W_{\boldsymbol{IV}}(p)}{1 + W_{\boldsymbol{IV}}(p) \cdot W_1(p)} = \frac{\dfrac{736p^3 + 2576p^2 + 184p + 440}{12p^4 + 62p^3 + 73p^2 + 5p}}{1 + \dfrac{736p^3 + 2576p^2 + 184p + 440}{12p^4 + 62p^3 + 73p^2 + 5p} \cdot \dfrac{7}{20p + 1}}$$

$$W_{\boldsymbol{V}}(p) = \frac{14720p^4 + 52256p^3 + 6256p^2 + 8984p + 440}{240p^5 + 1252p^4 + 6674p^3 + 18205p^2 + 1293p + 3080}$$

Список использованной литературы

1. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал) [текст]: учеб. пособие / И.М. Макаров, Б.М. Менский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с., ил.

2. Теория автоматического управления [текст]: учеб. для вузов / С.Е.Душин [и др.]; под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высш. шк., 2003. – 567с.: ил.

3. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.1: Математическое моделирование, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 656 с. – ISBN – 5-7038-2189-4.

4. Востриков А. С. Теория автоматического регулирования [Текст]: учеб. пособие / А. С. Востриков, Г. А. Французова. - М.: Высш. шк., 2004.- 365 с.: схем. ISBN – 5-06-04686-9.