

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Л.Н. Грачева

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСОГО УПРАВЛЕНИЯ »  
для студентов, обучающихся по направлению 220700 «Автоматизация  
технологических процессов и производств»  
заочной формы обучения

Кумертау 2015

УДК 681.5

ББК 32.965.7

Г-78

Составитель: Л.Н. Грачева

Методические указания включают в себя задание на расчетно-графическую работу, варианты заданий, пример выполнения расчетно-графической работы с пояснениями, расчетами, полученными в ручную и с помощью команд программного пакета MATLAB.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 220700 – «Автоматизация технологических процессов и производств», изучающих дисциплину «Теория автоматического управления».

Ил. 16. Библиогр. : 6 назв.

## Содержание

1. Введение .....	4
2. Задание расчетно-графическую работу.....	5
3. Варианты к заданию нрасчетно-графической работы .....	6
4. Пример выполнения расчетно-графической работы.....	13
I) Построить область устойчивости методом Д-разбиения по параметру обозначенному через $X - T3$ и построить переходной процесс для $T3$ из области устойчивости.....	14
II) Рассчитать корректирующее устройство методом логарифмических частотных характеристик по заданному времени регулирования и перерегулированию .....	22
III) Построить электрическую схему корректирующего устройства ..	36
Заключение.....	40
Библиографический список .....	41

## **1. Введение**

Расчетно-графическая работа посвящена освоению и закреплению навыков параметрического и структурного синтеза линейных систем автоматического регулирования и применения пакета прикладных программ MATLAB.

Расчетно-графическая работа оформляется на листах формата А4 по требованиям ГОСТ и СТП к выполнению лабораторных, расчетно-графических, курсовых и дипломных работ. На титульном листе указывается, дисциплина, вариант, фамилия, группа студента, фамилия преподавателя. Текст расчетно-графической работы распечатывается на принтере или может быть рукописным.

При компьютерном выполнении расчетно-графической работы необходимо использовать размер шрифта - 14, интервал 1, шаблоны рамок предусмотренных ГОСТ.

Каждый раздел расчетно-графической работы начинается с нового листа.

## 2. Задание расчетно-графическую работу

Вариант расчетно-графической работы определяется номером студента по журналу учета лабораторных, расчетно-графических, курсовых работ преподавателя.

В номере варианта: вторая цифра – номер схемы и таблицы, первая цифра - номер строки в таблице.

Содержание расчетно-графической работы должно соответствовать заданию и включать следующие разделы:

Титульный лист

Задание к расчетно-графической работе – выдает преподаватель – 2 листа

Содержание

1. Выполнение параметрического синтеза САР методом Д-разбиения
2. Выполнение структурного синтеза САР методом ЛАЧХ
3. Получение электрической схемы корректирующего устройства
4. Заключение – 0,5 – 1 стр.
5. Библиографический список – 4-7 источников, включая сайты

### 3. Варианты к заданию расчетно-графической работы

Для того, чтобы правильно выполнить расчетно-графическую работы нужно учесть, что в номере варианта:

вторая цифра – номер схемы и таблицы данных,

первая цифра - номер строки в таблице данных.

Например, вам выдан вариант 16.

Тогда нужно взять схему - 6

и строку 1 таблицы данных к этой схеме.

Схема 0

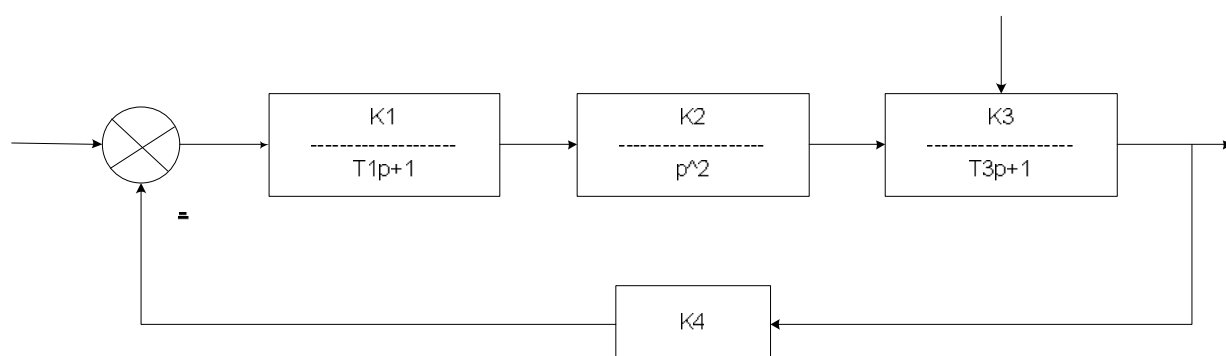


Таблица данных к схеме 0

N	K1	T1	K2	K3	T3	K4	X
0	2,5	0,1	20	0,5	0,001	1	K2
1	2	0,01	10	0,3	0,1	2	K2
2	1	0,25	25	0,1	2,5	4	K2
3	1,5	0,001	30	1,5	0,01	4	K2
4	1	0,5	50	2	0,05	2	K2
5	5	5	2	2,5	0,5	2	K2
6	9	0,05	4	10	5	1	K2
7	10	2,5	4,5	15	0,25	1	K2
8	50	0,025	5	0,2	0,5	5	K2
9	30	2	2	1,5	0,2	5	K2

Схема 1

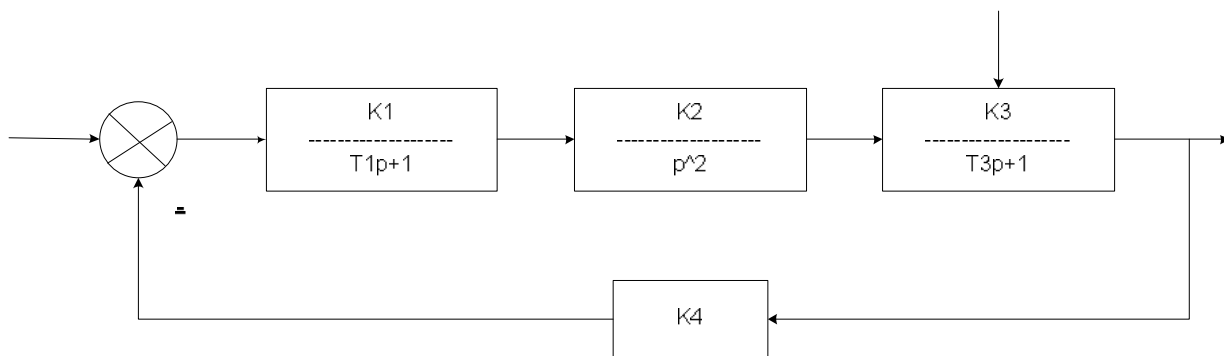


Таблица данных к схеме 1

N	K1	T1	K2	K3	T3	K4	X
0	2,5	0,1	20	0,5	0,001	1	K2
1	2	0,01	10	0,3	0,1	2	K2
2	1	0,25	25	0,1	2,5	4	K2
3	1,5	0,001	30	1,5	0,01	4	K2
4	1	0,5	50	2	0,05	2	K2
5	5	5	2	2,5	0,5	2	K2
6	9	0,05	4	10	5	1	K2
7	10	2,5	4,5	15	0,25	1	K2
8	50	0,025	5	0,2	0,5	5	K2
9	30	2	2	1,5	0,2	5	K2

Схема 2

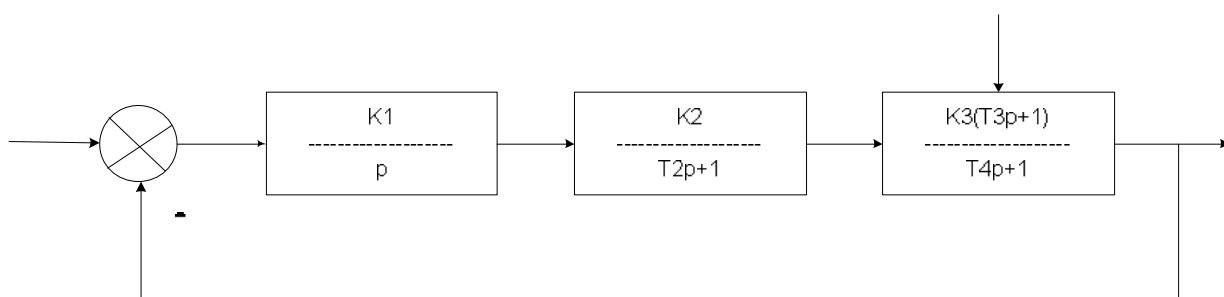


Таблица данных к схеме 2

N	K1	K2	T2	K3	T3	T4	X
0	2,5	20	0,1	0,5	0,001	0,01	K1
1	2	10	0,01	0,3	0,1	0,001	K1
2	1	25	0,25	0,1	2,5	0,025	K1
3	1,5	30	0,001	1,5	0,01	0,1	K1
4	1	50	0,5	2	0,05	5	K1
5	5	2	5	2,5	0,5	0,05	K1
6	9	4	0,05	10	5	0,5	K1
7	10	4,5	2,5	15	0,25	0,025	K1
8	50	5	0,025	0,2	0,5	0,1	K1
9	30	2	2	1,5	0,2	0,02	K1

Схема 3

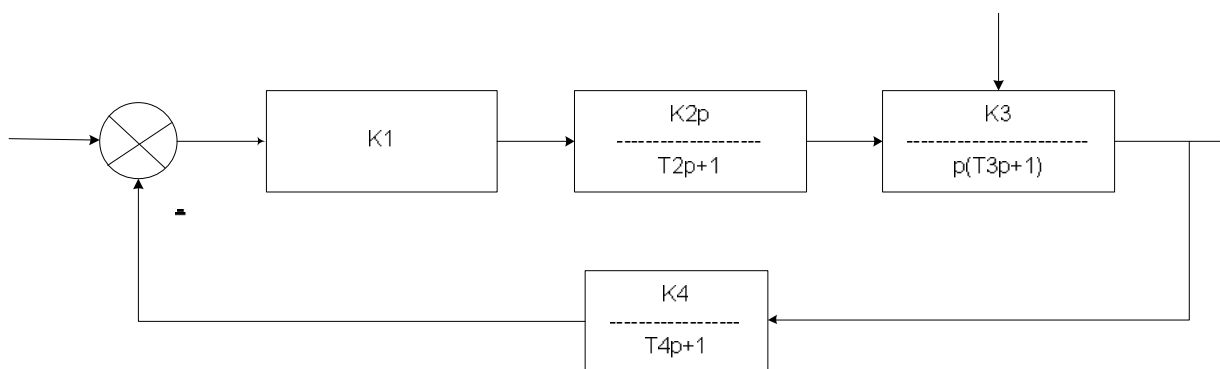


Таблица данных к схеме 3

N	K1	K2	T2	K3	T3	K4	T4	X
0	2,5	20	0,1	0,5	0,001	0,1	0,01	K2
1	2	10	0,01	0,3	0,1	0,2	0,001	K2
2	1	25	0,25	0,1	2,5	0,5	0,025	K2
3	1,5	30	0,001	1,5	1	1	0,1	K2
4	1	50	0,5	2	0,05	2	5	K2
5	5	2	5	2,5	0,5	5	0,05	K2
6	9	4	0,05	10	5	10	0,5	K2
7	10	4,5	2,5	15	0,25	1	0,025	K2
8	50	5	0,025	0,2	0,25	2	0,1	K2
9	30	2	2	1,5	0,2	1	0,02	K2



Схема 4

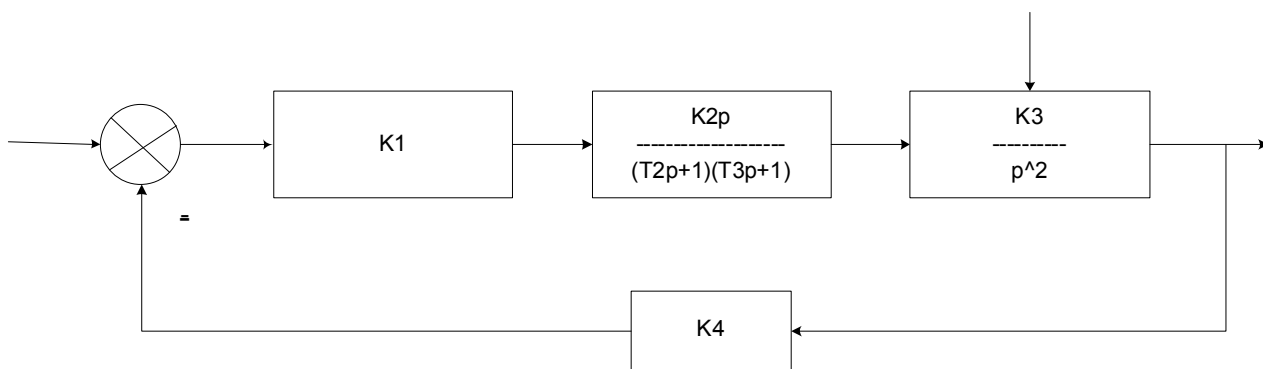


Таблица данных к схеме 4

N	K1	K2	T2	T3	K3	K4	X
0	2,5	20	0,1	0,001	0,5	0,1	T2
1	2	10	0,01	0,1	0,3	0,2	T2
2	1	25	0,25	2,5	0,1	0,5	T2
3	1,5	30	0,001	0,01	1,5	1	T2
4	1	50	0,5	0,05	2	2	T2
5	5	2	5	0,5	2,5	5	T2
6	9	4	0,05	5	10	10	T2
7	10	4,5	2,5	0,25	15	1	T2
8	50	5	0,025	0,5	0,2	2	T2
9	30	2	2	0,2	1,5	1	T2

Схема 5

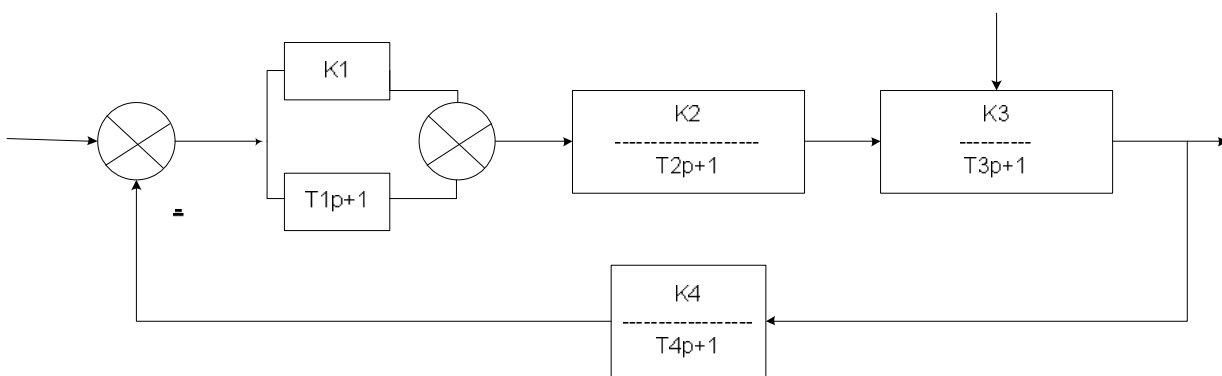


Таблица данных к схеме 5

N	K1	T1	K2	T2	K3	T3	K4	T4	X
0	2,5	0,25	20	0,1	0,5	0,001	0,1	0,01	K3
1	2	1,5	10	0,01	0,3	0,1	0,2	0,001	K3
2	1	0,01	25	0,25	0,1	2,5	0,5	0,025	K3
3	1,5	0,05	30	0,001	1,5	0,01	1	0,1	K3
4	1	0,25	50	0,5	2	0,05	2	5	K3
5	5	1,5	2	5	2,5	0,5	5	0,05	K3
6	9	0,25	4	0,05	10	5	10	0,5	K3
7	10	0,5	4,5	2,5	15	0,25	1	0,025	K3
8	50	0,05	5	0,025	0,2	0,5	2	0,1	K3
9	30	5	2	2	1,5	0,2	1	0,02	K3

Схема 6

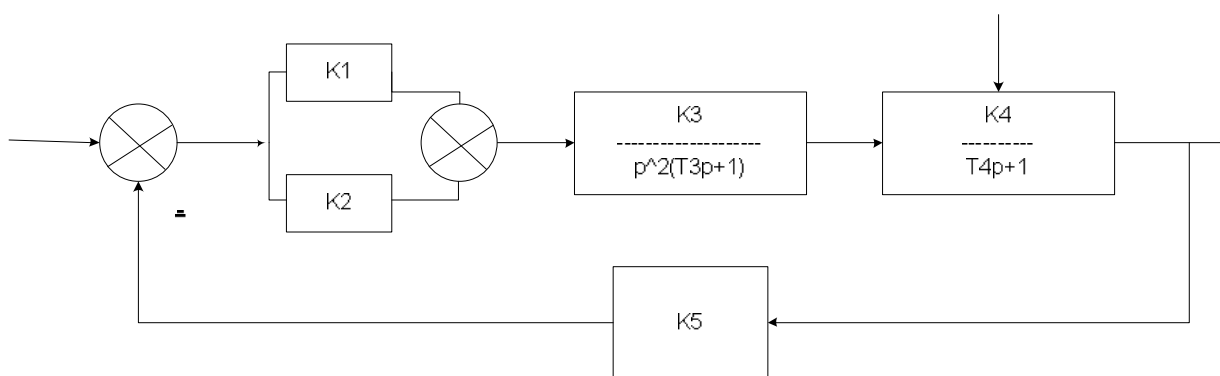


Таблица данных к схеме 6

N	K1	K2	K3	T3	K4	T4	K5	X
0	2,5	20	0,1	0,001	0,5	0,1	1	T3
1	2	10	0,01	0,1	0,3	1	2	T3
2	1	25	0,2	2,5	0,1	0,25	4	T3
3	1,5	30	0,01	0,01	1,5	0,1	4	T3
4	1	50	0,5	0,05	2	0,5	2	T3
5	5	2	5	0,5	2,5	0,05	2	T3
6	9	4	0,5	5	10	0,5	1	T3
7	10	4,5	2,5	0,25	15	2,5	1	T3
8	50	5	0,5	0,5	0,2	0,05	5	T3
9	30	2	2	0,2	1,5	0,02	5	T3

Схема 7

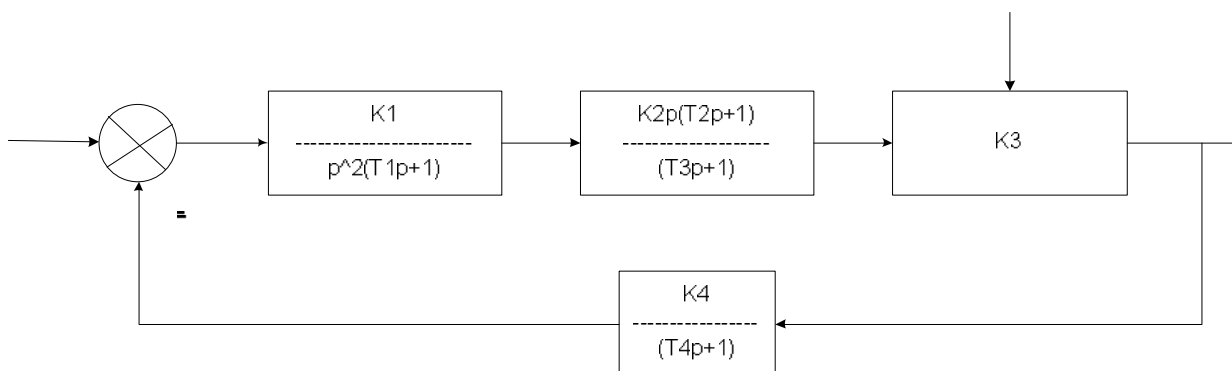


Таблица данных к схеме 7

N	K1	T1	K2	T2	T3	K3	K4	T4	X
0	2,5	0,5	20	0,1	0,001	0,5	1	0,01	K4
1	2	0,05	10	0,01	0,1	0,3	2	0,001	K4
2	1	0,5	25	0,25	2,5	0,1	4	0,025	K4
3	1,5	0,2	30	0,001	0,01	1,5	4	0,1	K4
4	1	0,5	50	0,5	0,05	2	2	5	K4
5	5	0,2	2	5	0,5	2,5	2	0,05	K4
6	9	0,02	4	0,05	5	10	1	0,5	K4
7	10	0,5	4,5	2,5	0,25	15	1	0,025	K4
8	50	0,05	5	0,025	0,5	0,2	5	0,1	K4
9	30	2	2	2	0,2	1,5	5	0,02	K4

Схема 8

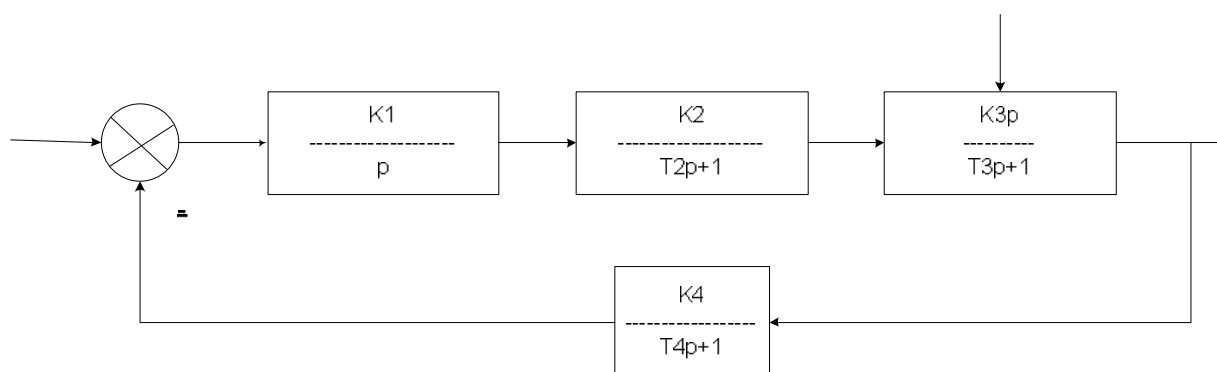
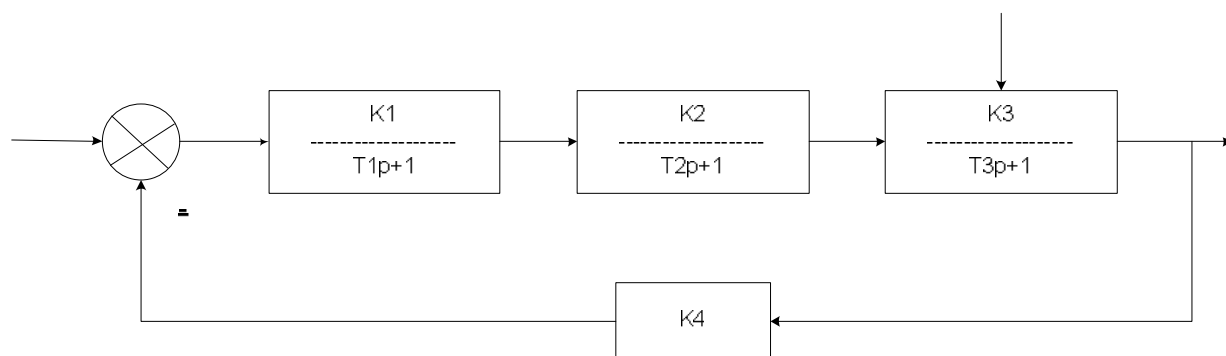


Таблица данных к схеме 8

N	K1	K2	T2	K3	T3	K4	T4	X
0	2,5	20	0,1	0,5	0,001	1	0,01	T4
1	2	10	0,01	0,3	0,1	2	0,001	T4
2	1	25	0,25	0,1	2,5	4	0,025	T4
3	1,5	30	0,001	1,5	0,01	4	0,1	T4
4	1	50	0,5	2	0,05	2	5	T4
5	5	2	5	2,5	0,5	2	0,05	T4
6	9	4	0,05	10	5	1	0,5	T4
7	10	4,5	2,5	15	0,25	1	0,025	T4
8	50	5	0,025	0,2	0,5	5	0,1	T4
9	30	2	2	1,5	0,2	5	0,02	T4

Схема 9



Данные к схеме 9

N	K1	T1	K2	T2	K3	T3	K4	X
0	2,5	0,15	20	0,1	0,5	0,001	1	K1
1	2	0,015	10	0,01	0,3	0,1	2	K1
2	1	0,1	25	0,25	0,1	2,5	4	K1
3	1,5	0,1	30	0,001	1,5	0,01	4	K1
4	1	0,25	50	0,5	2	0,05	2	K1
5	5	1,5	2	5	2,5	0,5	2	K1
6	9	0,5	4	0,05	10	5	1	K1
7	10	0,5	4,5	2,5	15	0,25	1	K1
8	50	0,25	5	0,025	0,2	0,5	5	K1
9	30	0,02	2	2	1,5	0,2	5	K1

#### 4. Пример выполнения расчетно-графической работы

В качестве примера выполнения расчетно-графической работы в представлен вариант 26. Исходя из правила формирования задания этому варианту соответствует схема № 6, а в таблице данных к этой схеме строка № 2.

На рис.1 представлена исходная схема, а в табл.1 таблица данных, в которой серым выделена нужная строка.

Схема 6

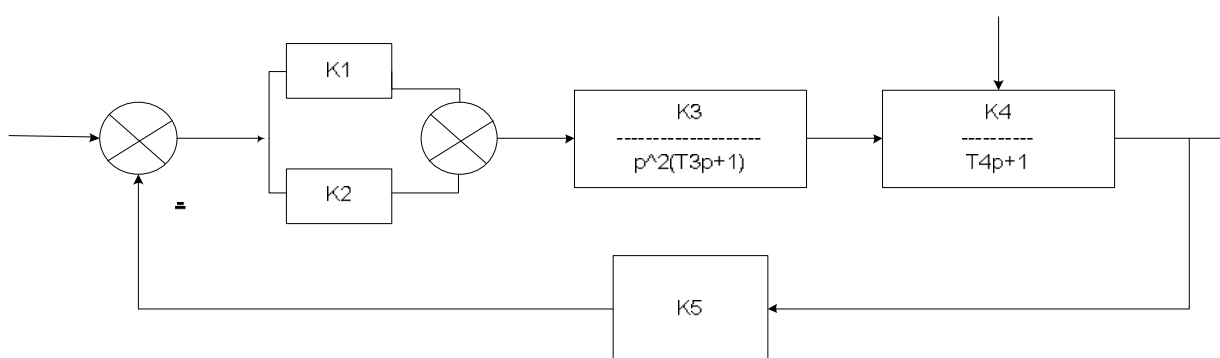


Рис.1. Схема с исходной структурной схемой САР

Табл.1. Данные к схеме 6

N	K1	K2	K3	T3	K4	T4	K5	X
0	2,5	20	0,1	0,001	0,5	0,1	1	T3
1	2	10	0,01	0,1	0,3	1	2	T3
2	1	25	0,2	2,5	0,1	0,25	4	T3
3	1,5	30	0,01	0,01	1,5	0,1	4	T3
4	1	50	0,5	0,05	2	0,5	2	T3
5	5	2	5	0,5	2,5	0,05	2	T3
6	9	4	0,5	5	10	0,5	1	T3
7	10	4,5	2,5	0,25	15	2,5	1	T3
8	50	5	0,5	0,5	0,2	0,05	5	T3
9	30	2	2	0,2	1,5	0,02	5	T3

По заданной структурной схеме необходимо:

- I. Построить область устойчивости методом Д-разбиения по параметру обозначенному через  $X - T3$  и построить переходной процесс для  $T3$  из области устойчивости;
- II. Рассчитать корректирующее устройство методом логарифмических частотных характеристик по заданному времени переходного процесса и перерегулированию;
- III. Построить электрическую схему корректирующего устройства.

**I) Построить область устойчивости методом Д-разбиения по параметру обозначенному через  $X - T3$  и построить переходной процесс для  $T3$  из области устойчивости**

1) Построение переходного процесса исходной замкнутой системы в MATLAB, по структурной схеме рис.1. Результат представлен на рис.2.

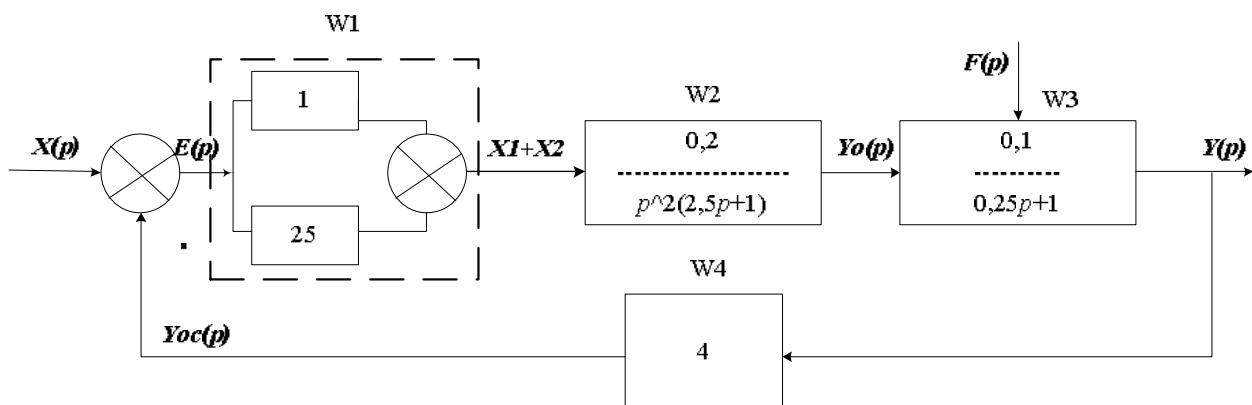


Рис.2. Структурная схема исходной системы

Получим в MATLAB передаточные функции разомкнутой САУ ( $W_r$ ) и замкнутой САУ ( $W_z$ ):

```
>> W1=tf([26],[1])
```

```
W1 =
```

```
26
```

```
>> W2=tf([0.2],[2.5 1 0 0])
```

```

W2 =
    0.2
-----
    2.5 s^3 + s^2
>> W3=tf([0.1],[0.25 1])
W3 =
    0.1
-----
    0.25 s + 1
>> W4=tf([4],[1])
W4 = 4
>> Wr=W1*W2*W3*W4
Wr =
    2.08
-----
    0.625 s^4 + 2.75 s^3 + s^2
>> W=W1*W2*W3
W =
    0.52
-----
    0.625 s^4 + 2.75 s^3 + s^2
>> Wz=feedback(W,W4,-1)
Wz =
    0.52
-----
    0.625 s^4 + 2.75 s^3 + s^2 + 2.08

```

Построим переходные процессы для разомкнутой (рис.3) и замкнутой (рис.4) САУ:

```

>> step(Wr),grid
>> step(Wz),grid

```

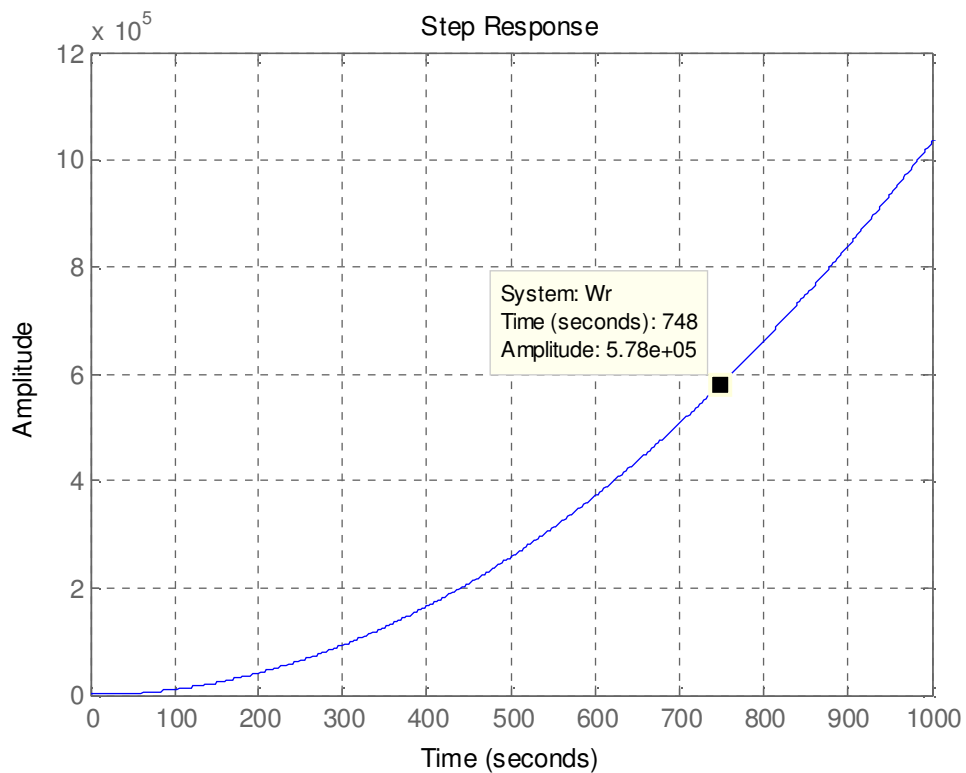


Рис.3. Переходной процесс исходной разомкнутой САР

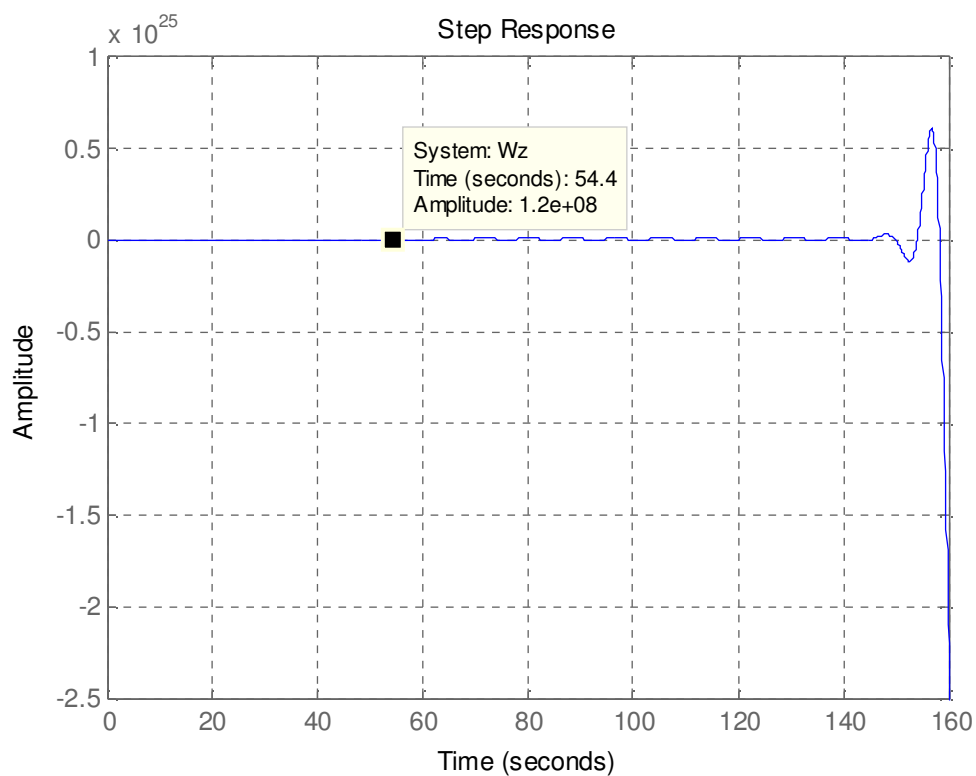


Рис.4. Переходной процесс исходной замкнутой САР



Переходной процесс разомкнутой системы является неограниченно возрастающим, а САР неустойчивой.

По рис.4 видно, что замкнутой САР также является не устойчивой, так как ее переходной процесс носит колебательный характер с увеличивающейся амплитудой.

2) Найдем корни замкнутой системы и их расположение на комплексной плоскости:

```
>> pole(Wz)
```

```
ans =
```

```
-3.9394 + 0.0000i
```

```
-1.2123 + 0.0000i
```

```
0.3759 + 0.7454i
```

```
0.3759 - 0.7454i
```

```
>> pzmap(Wz)
```

Неустойчивость системы подтверждается наличием положительных корней. На рис. 5 представлено расположение корней замкнутой исходной САР.

3) Определим устойчивость замкнутой САР по критерию Найквиста (рис. 6).

Так как кривая Найквиста охватывает точку с координатами  $(-1; 0i)$ , то система в замкнутом состоянии неустойчива.

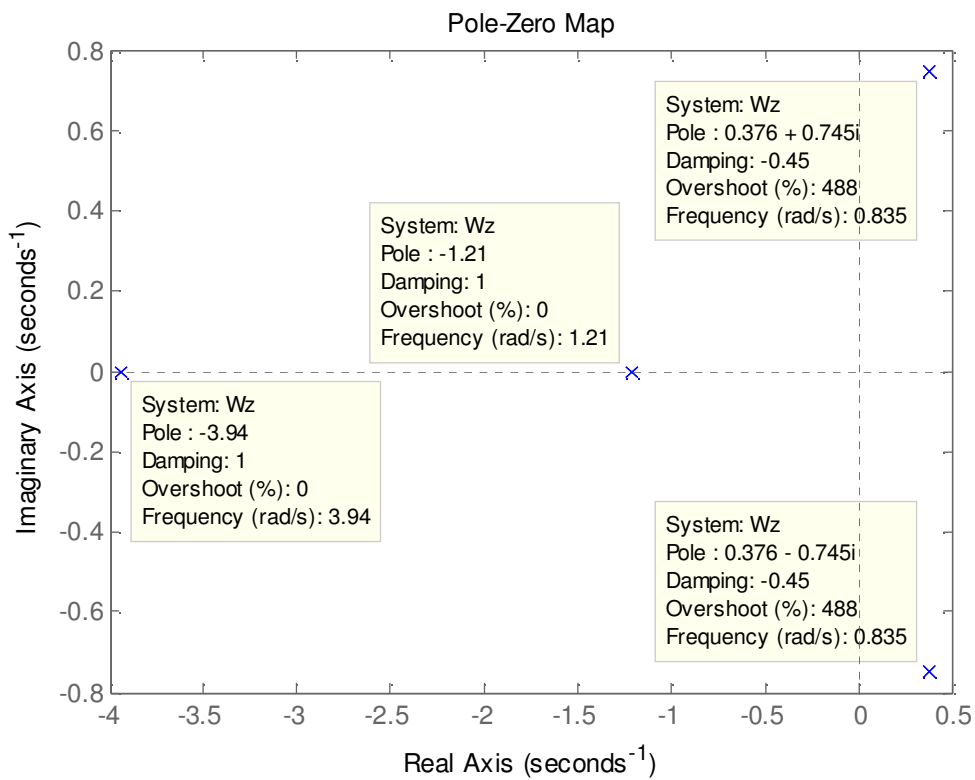


Рис.5. Расположение корней исходной замкнутой САР

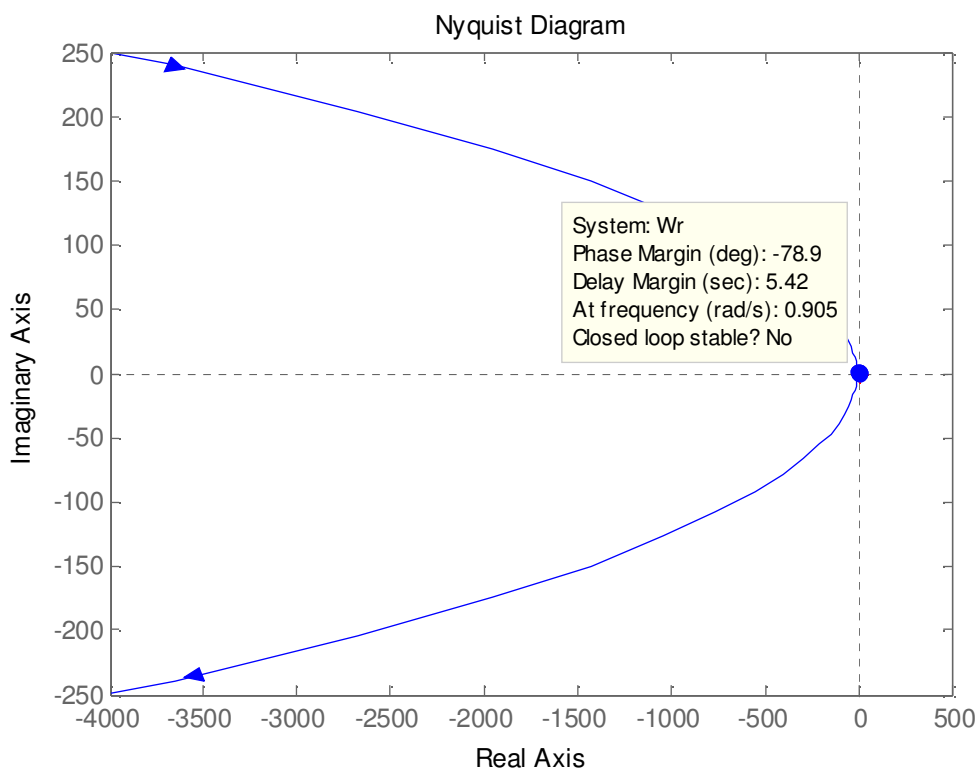


Рис. 6. Кривая Найквиста разомкнутой САР

4) Получим передаточную функцию исходной замкнутой системы, подставив числа вместо всех коэффициентов, кроме ТЗ. Вместо ТЗ подставим X:

$$W_z = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{1 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4} \quad (1)$$

$$W_z = \frac{26 \left( \frac{0,2}{p^2(Xp+1)} \right) \left( \frac{0,1}{0,25p+1} \right)}{1 + \left( 26 \cdot \left( \frac{0,2}{p^2(Xp+1)} \right) \left( \frac{0,1}{0,25p+1} \right) \cdot 4 \right)} = \quad (2)$$

$$= \frac{\frac{26 \cdot 0,2 \cdot 0,1}{p^2(Xp+1)(0,25p+1)}}{1 + \frac{26 \cdot 0,2 \cdot 0,1 \cdot 4}{p^2(Xp+1)(0,25p+1)}} = \frac{\frac{0,52}{p^2(Xp+1)(0,25p+1)}}{\frac{p^2(Xp+1)(2,5p+1) + 2,08}{p^2(Xp+1)(0,25p+1)}}$$

$$= \frac{26 \cdot 0,2 \cdot 0,1}{p^2(Xp+1)(0,25p+1)} \cdot \frac{p^2(Xp+1)(0,25p+1)}{p^2(Xp+1)(0,25p+1) + 2,08}$$

$$W_z = \frac{0,52}{p^2(Xp+1)(0,25p+1) + 2,08} \quad (3)$$

5) Из передаточной функции замкнутой системы, получим характеристическое уравнение:

$$D(p) = p^2(Xp+1)(0,25p+1) + 2,08 = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D(p) &= (Xp^3 + p^2)(0,25p+1) + 2,08 = \\ &= 0,25Xp^4 + Xp^3 + 0,25p^3 + p^2 + 2,08 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$D(p) = X(0,25p^4 + p^3) + (0,25p^3 + p^2 + 2,08) = 0 \quad (6)$$

6) Выделим из выражения (5) искомый параметр X

$$X(p) = \frac{-0,25p^3 - p^2 - 2,08}{0,25p^4 + p^3} \quad (7)$$

7) Построим границу устойчивости:

Для этого произведем замену  $p = j\omega$  и изменяя частоту в пределах от 0 до  $\infty$  и соединяя полученные точки в направлении возрастания частот, получим половину границы устойчивости, вторая ее часть будет симметрична относительно вещественной оси. Нанесем штриховку слева от границы устойчивости, двигаясь по ней в направлении возрастания частот.

Граница устойчивости, построенная в MATLAB, представлена на рис.7.

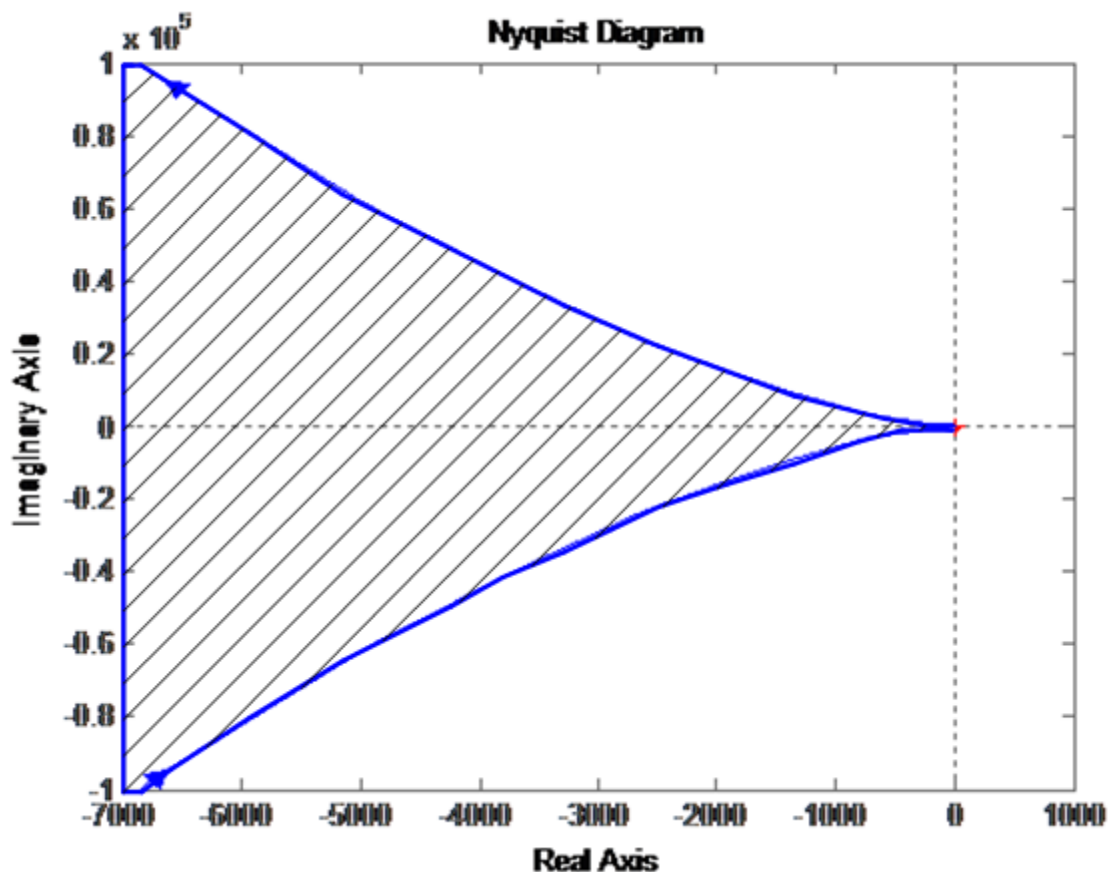


Рис.7.

Границы устойчивости искомого параметра T3

8) Построим границу устойчивости в MATLAB

```
>> d=tf([-0.25 -1 0 -2.08],[2.5 1 0 0 0])
```

d =

$$-0.25 s^3 - s^2 - 2.08$$

-----

$$2.5 s^4 + s^3$$

>> nyquist(d)

В связи с тем, что в вещественном мире могут реализовываться только положительные вещественные значения искомого параметра, будем искать его на положительном направлении вещественной оси.

Согласно рис. 7 все положительные вещественные значения искомого параметра попадают в область неустойчивости, то есть при любом ТЗ в интервале ]0; +∞), САР останется неустойчивой. Поэтому в САР нужно ввести дополнительное корректирующее звено – произвести структурный синтез САР.

9) Для дополнительной проверки правильности области устойчивости выбираем любое значение ТЗ из нее, например пусть ТЗ = 2,5 - это соответствует исходному значению, для которого построен переходной процесс на рис.4.

После подстановки этого значения в выражение (5) получим:

$$D(p) = 0,625p^4 + 2,75p^3 + p^2 + 2,08 = 0 \quad (7)$$

Определяем коэффициенты характеристического уравнения:

$$a_0 = 0,625 \quad a_1 = 2,75 \quad a_2 = 1 \quad a_3 = 0 \quad a_4 = 2,08$$

Строим матрицу Гурвича:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,75 & 0 & 0 & 0 \\ 0,625 & 1 & 2,08 & 0 \\ 0 & 2,75 & 0 & 0 \\ 0 & 0,625 & 1 & 2,08 \end{bmatrix}$$

Вычисляем определители Гурвица:

$$\Delta_1 = 2,75 > 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 2,75 & 0 \\ 0,625 & 1 \end{vmatrix} = 2,75 - 0 = 2,75 > 0$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 2,75 & 0 & 0 \\ 0,625 & 1 & 2,08 \\ 0 & 2,75 & 0 \end{vmatrix} = 2,75 \cdot (1 \cdot 0 - 2,08 \cdot 2,75) < 0$$

Таким образом, исходная замкнутая система неустойчива, так как определитель 3-го порядка меньше нуля.

В результате дополнительной проверки выяснилось, что на интервале ]0; +∞) система не устойчива, то есть для данной системы невозможно подобрать значения ТЗ при которых система будет устойчива. Поэтому необходимо произвести структурный синтез САР.

## **II) Рассчитать корректирующее устройство методом логарифмических частотных характеристик по заданному времени регулирования и перерегулированию**

Наиболее просто определяется корректирующее устройство последовательного типа. Если желаемая передаточная функция разомкнутой системы -  $W_{жс}(p)$ , располагаемая  $W_p(p)$ , то можно записать равенство

$$W_{жс}(p) = W_p(p)W_{ку}(p) \quad (8)$$

откуда передаточная функция корректирующего устройства

$$W_{ку}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_p(p)} \quad (9)$$

Тогда для ЛАЧХ корректирующего звена:

$$L_{ку}(\omega) = L_{жс}(\omega) - L_p(\omega) \quad (10)$$

Процесс синтеза обычно включает в себя следующие операции:

- 1) построение располагаемой ЛАЧХ,
- 2) построение желаемой ЛАЧХ,

- 3) определение вида и параметров корректирующего устройства,
- 4) проверочный расчет запаса по фазе,
- 5) проверочный расчет переходного процесса.

1) Построение располагаемой ЛАЧХ - рис.8.

Пусть время регулирования задано  $t_p = 0,5c$  , а перерегулирование  $\sigma = 20\%$

$$W_p = \frac{26 \cdot 0,2 \cdot 0,1 \cdot 4}{p^2(2,5p+1)(0,25p+1)} = \frac{K_{ИС}}{p^v(T_1p+1)(T_2p+1)} \quad (11)$$

Сопоставляя числовые значения с обозначения в выражении (11)

получим:

$$K_{ИС} = 2,08, \quad T_1 = 2,5, \quad T_2 = 0,25, \quad v = 2$$

Рассчитаем сопрягающие частоты из знаменателя передаточной функции

(11):

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,25} = 4$$

В данном случае можно получить сопрягающие частоты только из знаменателя в общем случае они могут быть получены и из числителя.

Получим значение  $20LgK_{ИС} = 20Lg 2,08 = 0,32$  для построения точки А, принадлежащей ЛАЧХ исходной системы.

Построим точку А ( $1; 20LgK_{ИС}$ ) в данном примере это точка А(1; 0,32).

Определяем углы наклона асимптот ЛАЧХ в низкочастотной и высокочастотной области, а также между сопрягающими частотами:

В низкочастотной области на интервале частот  $\omega \in (-\infty; \omega_1)$  наклон асимптот равен  $v \cdot (-20) = -40$  Дб/дек.

Так как  $\omega_1 = 0,4$  получена из знаменателя передаточной функции (11), то после нее асиптота изменит наклон на  $-20$  Дб/дек и станет равна  $-40 + (-20) = -60$  Дб/дек до следующей сопрягающей частоты  $\omega_2 = 4$ .

Так как  $\omega_2 = 4$  получена из знаменателя передаточной функции (11), то после нее асиптота изменит наклон на  $-20$  Дб/дек и станет равна  $-60 + (-20) = -80$  Дб/дек во всей оставшейся высокочастотной области.

В табл.2 записаны наклоны асимптот на каждом интервале частот.

Табл.2. Наклоны асимптот ЛАЧХ разомкнутой САУ

Диапазон частот	Наклон ЛАЧХ
$-\infty ; \omega_1=0,4$	-40
$\omega_1=0,4 ; \omega_2=4$	$-40-20=-60$
$\omega_2=4 ; + \infty$	$-60-20=-80$

Наклоны асимптот начинают строить от точки А. Точка А попадает в диапазон частот  $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$  поэтому проводим через нее на данном интервале асимптоту с наклоном  $-60$  Дб/дек.

## 2) Построение желаемой ЛАЧХ

В основу синтеза положены показатели качества:

- перерегулирование –  $\sigma$  %
- время переходного процесса –  $t_{\pi}$

Желаемая ЛАЧХ состоит из трех частей: низкочастотной области, среднечастотной области и высокочастотной области.

По величине перерегулирования  $\sigma$  % можно определить вспомогательную величину  $P_{max}$  - максимальное значение вещественной характеристики а по  $P_{max}$  вид зависимости между  $t_{\pi}$  и  $\omega_{\pi}$  - интервал положительности, по известному  $t_{\pi}$  определяется  $\omega_{\pi}$ . Основные значения  $P_{max}$  и  $t_{\pi}$  приведены в табл. 3, другие



значения определяются по рис. 9. Стрелками указан порядок определения искомого значения.

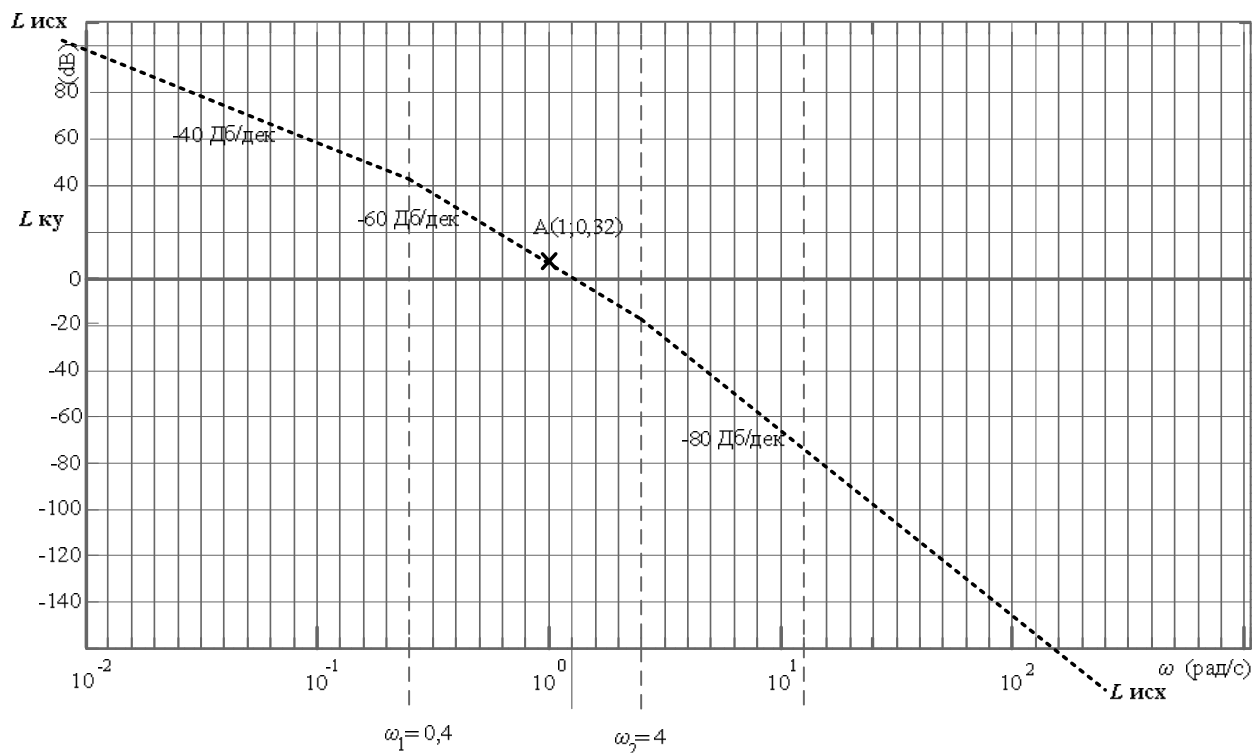


Рис.8. ЛАЧХ разомкнутой (исходная) системы

Из условия расчетно-графической работы перерегулирование  $\sigma = 20\%$ , время регулирования  $t_p = 0,5$  с.

Из рис. 9 получим выражение связывающее время регулирования и частоту положительности:

$$t_p = \frac{3\pi}{\omega_n} \quad (12)$$

Табл. 3. Типовые значения  $P_{\max}$  и соответствующих качественных показателей

$P_{\max}$	$\sigma$	$t_{\Pi}$	число колебаний	$P_{\max}$	$\sigma$	$t_{\Pi}$	число колебаний
1,4	$\leq 38$	$\leq 6\pi/\omega_{\Pi}$	$\leq 3$	1,2	$\leq 26$	$\leq 4\pi/\omega_{\Pi}$	$\leq 2$
1,3	$\leq 32$	$\leq 5\pi/\omega_{\Pi}$	$\leq 2$	1,0	$\leq 17$	$\leq 3\pi/\omega_{\Pi}$	1

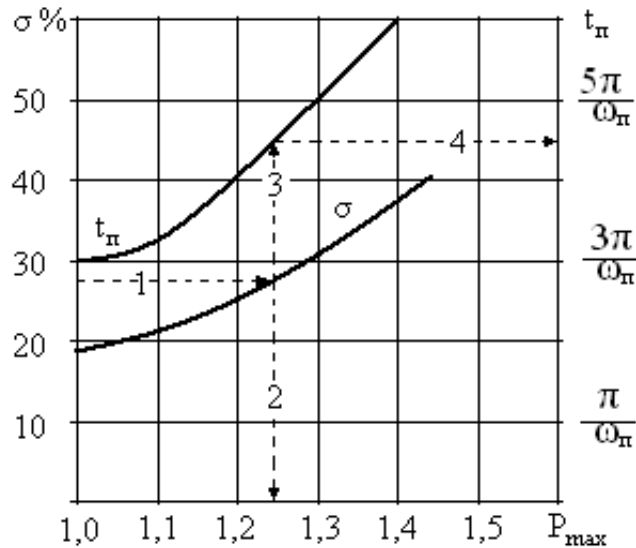


Рис.9. Кривые для определения  $P_{max}$  и  $t_n$ : пронумерованные стрелки поясняют порядок определения искомых значений по величине перерегулирования

Определим частоту положительности  $\omega_n$  из (12):

$$\omega_n = \frac{3\pi}{t_p} = \frac{3 \cdot 3,14}{0,5} = 18,84$$

Определяем частоту среза по формуле:

$$\omega_{cp} = (0,6 \div 0,9) \cdot \omega_n \quad (13)$$

Определим диапазон частот, в котором может быть выбрана частота среза:

$$\omega_{cp}^{\min} = 0,6 \cdot \omega_n = 0,6 \cdot 18,84 = 11,3$$

$$\omega_{cp}^{\max} = 0,9 \cdot \omega_n = 0,9 \cdot 18,84 = 16,96$$

Диапазон частоты среза составляет:

$$11,3 \leq \omega_{cp} \leq 16,96 \quad (14)$$

Выберем исходя (рис. 11) из удобства дальнейших построений частоту среза  $\omega_{cp} = 15$

Определим запас по фазе и амплитуде для построения среднечастотной области по рис. 10.

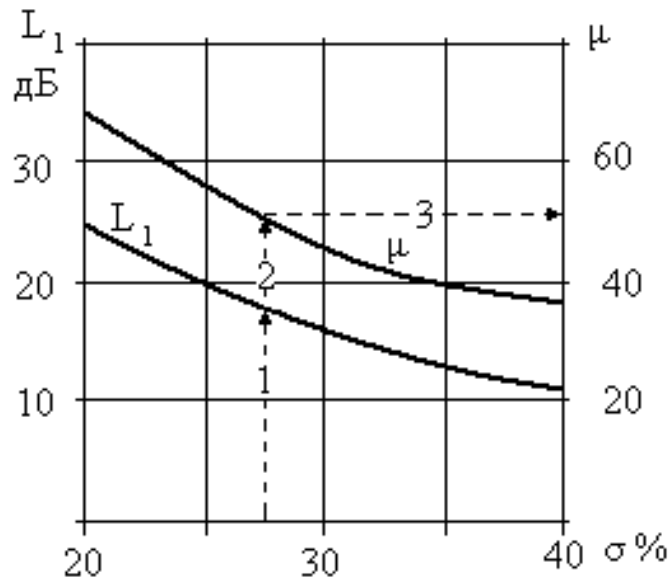


Рис.10. Кривые для определения запаса по модулю и запаса по фазе: стрелки поясняют порядок определения искомых величин

При заданном  $\sigma = 20\%$  выбирается требуемое значение запаса по модулю  $L_1 = |L_2| = 20$  Дб и запаса по фазе  $\mu = 40$

Среднечастотная область строиться, начиная от частоты среза под наклоном  $-20$  Дб/дек вправо и влево до тех пор, пока расстояние от асимптоты до оси частот не станет равно запасу по амплитуде.

В низкочастотной и высокочастотной области ЛАЧХ желаемая параллельна ЛАЧХ исходной системы.

### 3) Определение вида и параметров корректирующего устройства

Графически определяем ЛЧХ корректирующего устройства:

$$L_{KY}(\omega) = L_{жс}(\omega) - L_{исх}(\omega) \quad (15)$$

В точке  $\omega = 1$  имеем

$$L_{KY}(\omega) = 20 \text{ Дб}, \quad 20 \lg K_{KY} = 20, \quad \lg K_{KY} = 1, \quad K_{KY} = 10^1 = 10$$

Определим наклоны ЛАЧХ корректирующего устройства и запишем результаты в табл.4.

Табл.4. Определение наклона ЛАЧХ корректирующего устройства

Диапазон $\omega$	Наклон	Влияние наклона на вид передаточной функции
$-\infty; \omega_1$	$-40 - (-40) = 0$	ПФ без астатизма – $\nu=0$
$\omega_1; \omega_1^*$	$-60 - (-60) = 0$	Нет излома ЛАЧХ
$\omega_1^*; \omega_2$	$-20 - (-60) = 40$	$\omega_1^*$ вызывает положительный излом – сопрягающая частота числителя ПФ
$\omega_2; \omega_2^*$	$-20 - (-80) = 60$	$\omega_2$ вызывает положительный излом – сопрягающая частота числителя ПФ
$\omega_2^*; +\infty$	$-80 - (-80) = 0$	$\omega_2^*$ вызывает отрицательный излом – сопрягающая частота знаменателя ПФ

Определим передаточную функцию корректирующего устройства по виду ее ЛАЧХ

$$W_{KY} = \frac{K_{KY} \left( \frac{1}{\omega_1^*} p + 1 \right)^2 \left( \frac{1}{\omega_1} p + 1 \right)}{p^0 \left( \frac{1}{\omega_2^*} p + 1 \right)^3} \quad (16)$$

$$W_{KY} = \frac{10 \left( \frac{1}{1.5} p + 1 \right)^2 \left( \frac{1}{4} p + 1 \right)}{p^0 \left( \frac{1}{150} p + 1 \right)^3} = \frac{10(0.67 p + 1)^2 (0.25 p + 1)}{(0.0067 p + 1)^3} \quad (17)$$

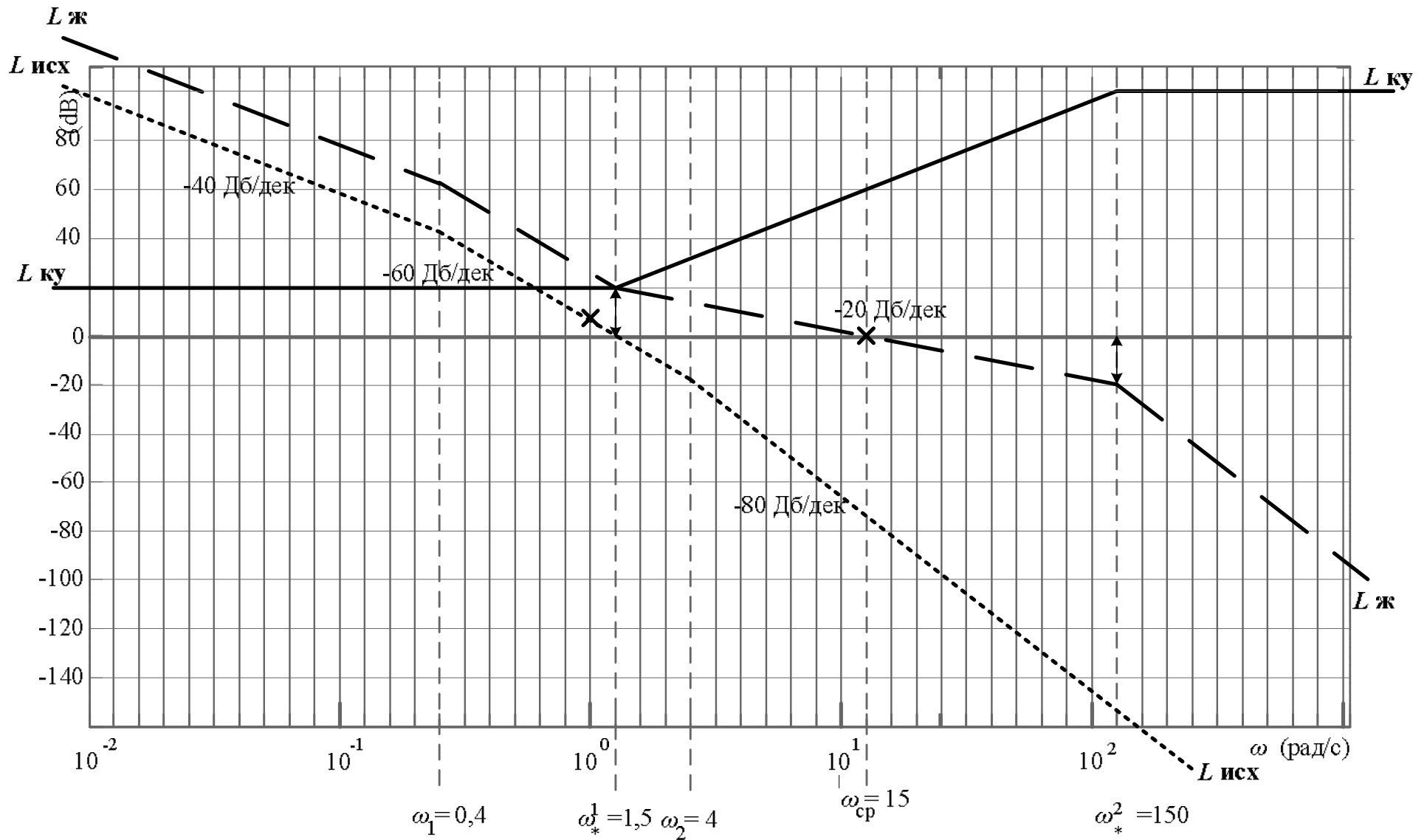


Рис.11. Построение ЛАЧХ корректирующего устройства

#### 4) Проверочный расчет запаса по фазе

Проверочный расчет запаса по фазе выполняется в соответствии с формулой

$$\Delta\varphi = -180 - \varphi_{\mathcal{Ж}}(\omega_{cp}) \quad (18)$$

Получим передаточную функцию желаемой САР – обозначена пунктирной линией с длинными штрихами  $L_{\mathcal{Ж}}$ . В точке  $\omega = 1$  она имеет амплитуду  $L_{\mathcal{Ж}}(\omega) = 23 \text{ Дб}$ .

Определим коэффициент усиления желаемой ЛАЧХ:

$$20 \lg K_{\mathcal{Ж}} = 23$$

$$\lg K_{\mathcal{Ж}} = 23 / 20 = 1,15$$

$$K_{\mathcal{Ж}} = 10^{1,15} = 14,12$$

Выполним преобразование графика желаемой ЛАЧХ в передаточную функцию, то есть действие обратной предыдущему пункту 3):

$$\begin{aligned} W_{\mathcal{Ж}} &= \frac{K_{\mathcal{Ж}} \left( \frac{1}{\omega_1^*} p + 1 \right)^2}{p^2 \left( \frac{1}{\omega_1} p + 1 \right) \left( \frac{1}{\omega_2^*} p + 1 \right)} = \\ &= \frac{14,12 \left( \frac{1}{1,5} p + 1 \right)^2}{p^2 \left( \frac{1}{4} p + 1 \right) \left( \frac{1}{150} p + 1 \right)} = \\ &= \frac{14,12 (0,67 p + 1)^2}{p^2 (0,25 p + 1) (0,0067 p + 1)} \end{aligned} \quad (19)$$

По виду передаточной функции определим выражение для расчета ФЧХ желаемой САР и получим выражение (20). После численной подстановки получим значение фазовой частотной характеристики при частоте среза – выражение (21).

$$\varphi_{Ж}(\omega) = -90 \cdot 2 - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\omega_1} \omega\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\omega_2^*} \omega\right) + 2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\omega_1^*} \omega\right) = \quad (20)$$

$$= -180 - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{4} \omega\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{150} \omega\right) + 2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{1,5} \omega\right)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{Ж}(\omega_{cp}) &= -180 - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{4} 15\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{150} 15\right) + 2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{1,5} 15\right) = \\ &= -3,14 - \operatorname{arctg}(3,75) - \operatorname{arctg}(0,1) + 2 \cdot \operatorname{arctg}(10) = \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} &= -3,14 - 1,31 - 0,0997 + 2 \cdot 1,4712 = -1,6073 \text{ рад} + 2 \cdot 3,14 = \\ &= 4,7473 \text{ рад} = 272^{\circ} \end{aligned}$$

С учетом периода

$$\varphi_{Ж}(\omega_{cp}) = 272^{\circ} = -88$$

Тогда запас по фазе при частоте среза:

$$\Delta\varphi = \left| -180 - \varphi_{Ж}(\omega_{cp}) \right| = \left| -180 - 88 \right| = -268^{\circ} = 92^{\circ} > \mu = 40^{\circ}$$

Рассчитанный запас устойчивости по фазе соответствует требуемому, поэтому корректирующее устройство рассчитано, верно.

5) Проверочный расчет переходного процесса.

Построим переходного процесса САП с корректирующим устройством.

Для проверки необходимо получить в MATLAB передаточную функцию системы с корректирующим устройством:

```
>> kz1=tf([0.67 1],[0.0067 1])
```

kz1 =

$$0.67 s + 1$$

-----

$$0.0067 s + 1$$

```
>> kz2=kz1
```

kz2 =

$$0.67 s + 1$$

-----

$$0.0067 s + 1$$

```
>> kz3=tf([0.25 1],[0.0067 1])
```

kz3 =

$$0.25 s + 1$$

-----

$$0.0067 s + 1$$

```
>> Wkz=10*kz1*kz2*kz3
```

Wkz =

$$1.122 s^3 + 7.839 s^2 + 15.9 s + 10$$

-----

$$3.008e-07 s^3 + 0.0001347 s^2 + 0.0201 s + 1$$

```
>> ww=Wkz*W
```

ww =

$$0.5836 s^3 + 4.076 s^2 + 8.268 s + 5.2$$

-----

$$1.88e-07 s^7 + 8.5e-05 s^6 + 0.01293 s^5 + 0.6804 s^4 + 2.77 s^3 + s^2$$



```
>> www=feedback(ww,W4,-1)
```

```
www =
```

$$0.5836 s^3 + 4.076 s^2 + 8.268 s + 5.2$$

-----  
( 1.88e-07 s^7 + 8.5e-05 s^6 + 0.01293 s^5 + 0.6804 s^4 + 5.104 s^3 + +17.31 s^2 + 33.07 s + 20.8)

Построим переходную характеристику замкнутой системы – рис. 14:

```
>> step(www)
```

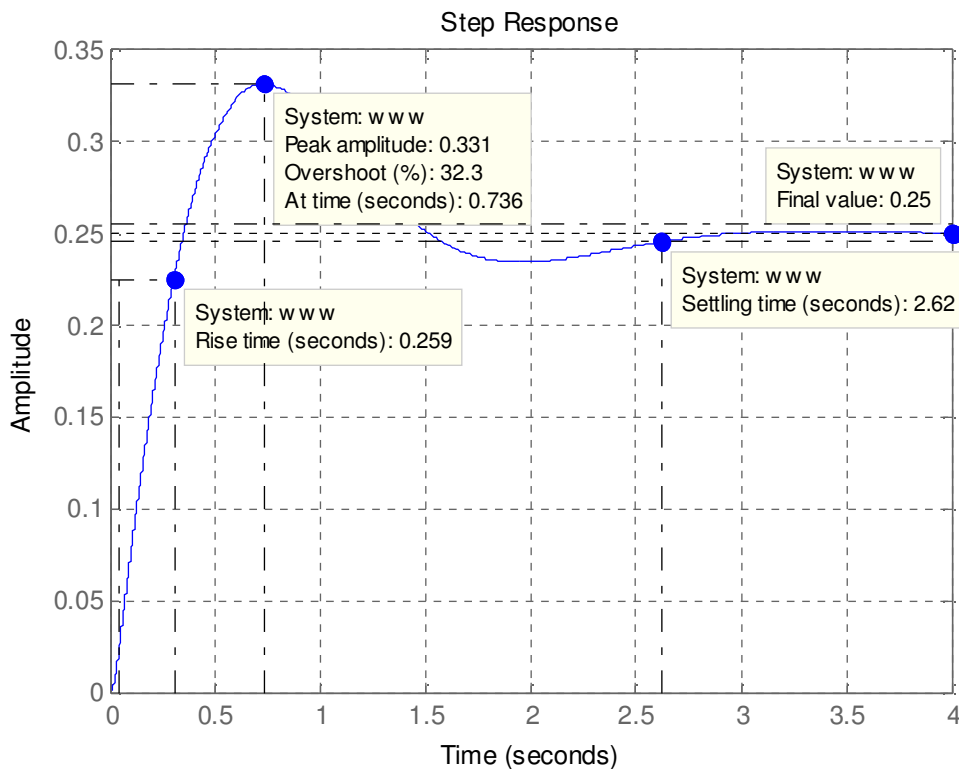


Рис. 14. Переходной процесс САУ с корректирующим устройством

Построим расположение корней (рис.15), получим корни замкнутой системы, построим диаграммы Боде для разомкнутой системы – рис. 16.

```
>> pzmap(www)
```

```
>> pole(www)
```

```
ans =
```

$$-1.7209 - 0.3425i$$

$$1.0e+02 *$$

$$-0.9976 + 0.0000i$$

$$-1.7209 + 0.3425i$$

$$-0.0400 + 0.0000i$$

$$-0.0158 + 0.0245i$$

$$-0.0106 + 0.0000i$$

$$-0.0158 - 0.0245i$$

Корни системы все с отрицательной вещественной частью, поэтому система устойчива.

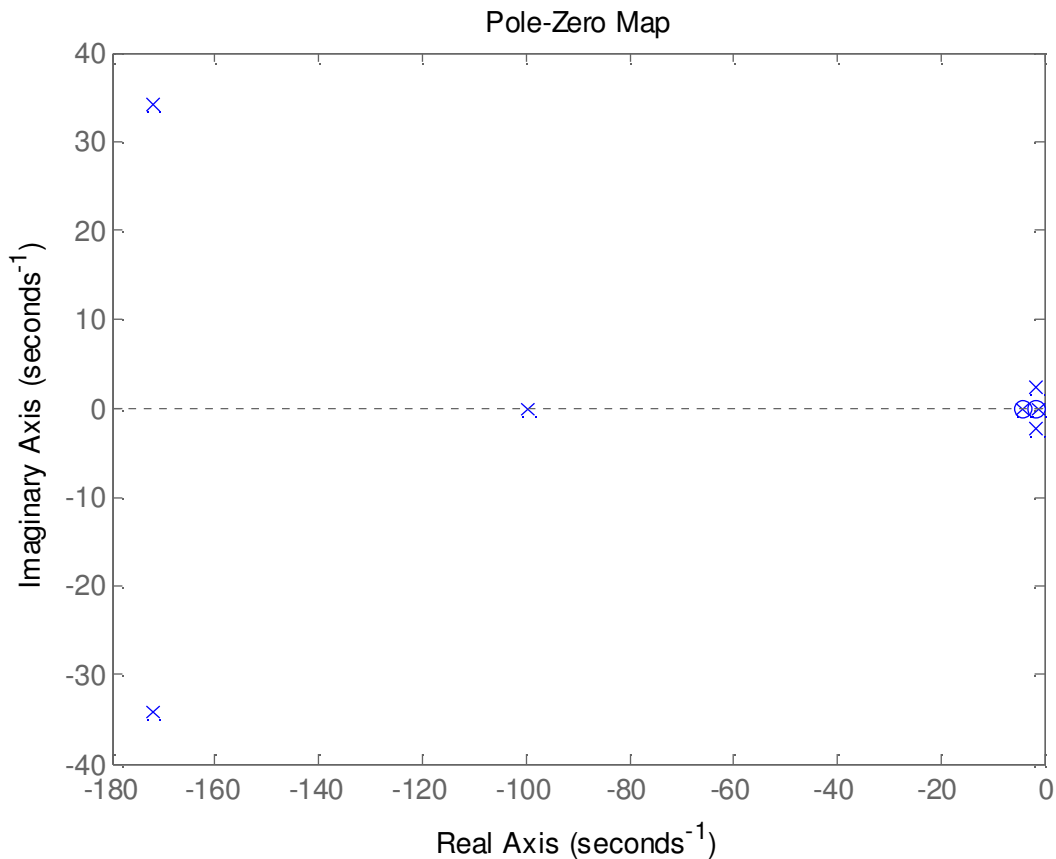


Рис. 15. Расположение корней САУ с корректирующим устройством

Полученные ЛЧХ разомкнутой системы также показывают, что система устойчива в замкнутом состоянии и имеет необходимый запас по амплитуде и фазе – рис. 16.

В табл. 6 приведены показатели качества переходного процесса исходной САУ, САУ после параметрического синтеза и САУ с корректирующим устройством

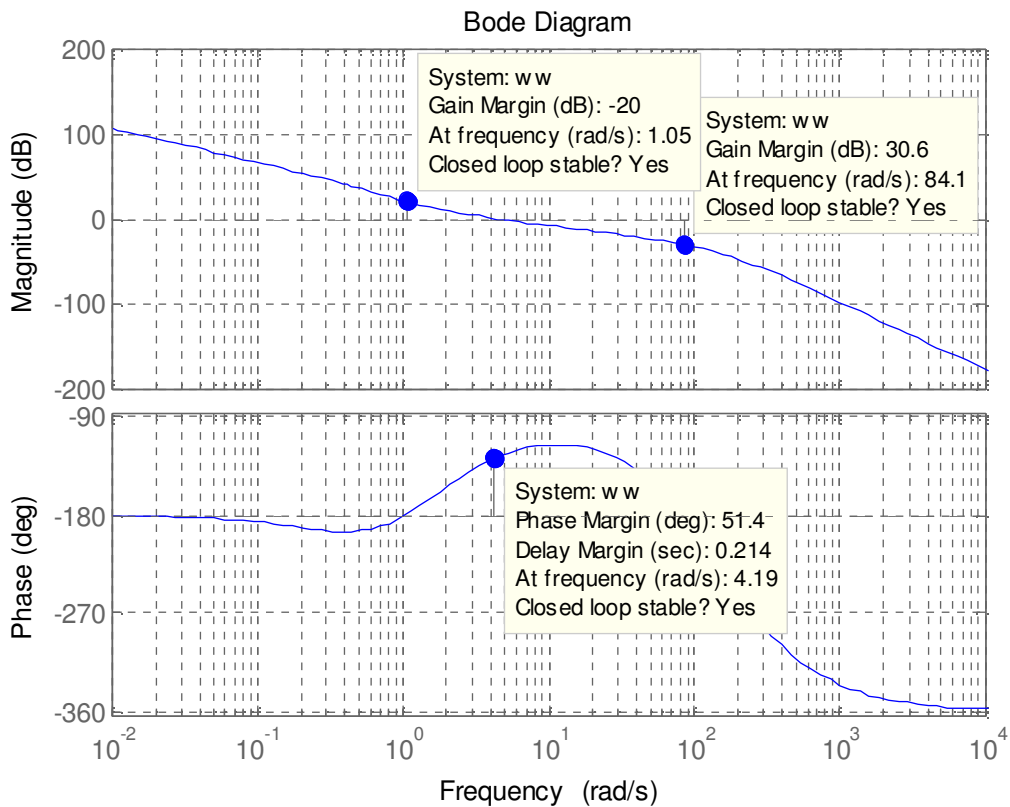


Рис. 16. Критерий ЛАЧХ для разомкнутой САУ с корректирующим устройством

Табл. 6 - Сводные данные о качестве САУ до и после коррекции

Показатель качества	Исходная замкнутая система	Система с параметрической коррекцией	Система со структурной коррекцией
Время переходного процесса	Не устойчивый переходной процесс с возрастающей амплитудой	Не может быть получен (положительные значения ТЗ не входят в область устойчивости)	2,62 с
Установившееся значение			0,25
Установившаяся ошибка			0,005
Перерегулирование			32,3 %
Количество колебаний			1,5

### III) Построить электрическую схему корректирующего устройства

Передаточную функцию корректирующего устройства полученную в предыдущем задании расчетно-графической работы (17) представим в виде элементарных звеньев с известными электрическими схемами, которые можно найти в [1, стр. 263]

$$W_{KY} = \frac{10(0,67p + 1)^2 (0,25p + 1)}{(0,0067p + 1)^3} =$$

$$= 10 \cdot \underbrace{\frac{(0,67p + 1)}{(0,0067p + 1)}}_{W_{K31}} \cdot \underbrace{\frac{(0,67p + 1)}{(0,0067p + 1)}}_{W_{K32}} \cdot \underbrace{\frac{(0,25p + 1)}{(0,0067p + 1)}}_{W_{K33}} \quad (22)$$

Для всех звеньев подходит электрическая схема (рис. 12) звена с передаточной функцией

$$W_{K3} = \frac{(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)} \quad (23)$$

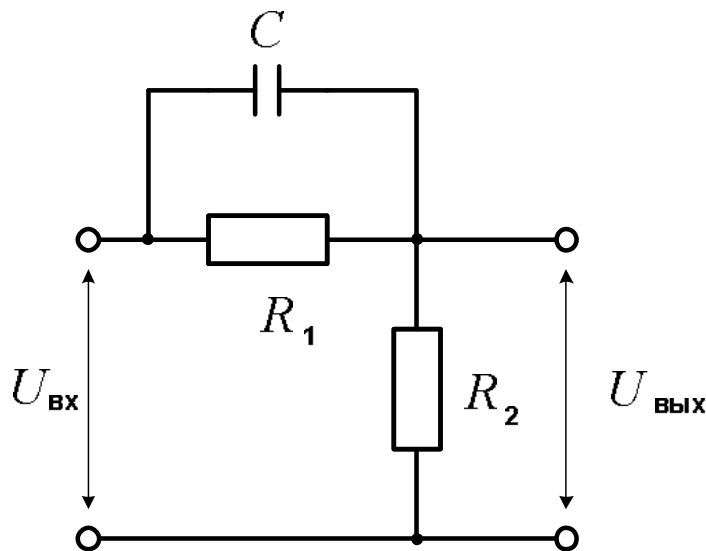


Рис. 12. Электрическая схема одного звена корректирующего устройства

Для (23) справедливы соотношения:

$$K = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (24)$$

$$R_1 = \frac{T_1}{C}, \quad R_2 = \frac{KR_1}{(1 - K)}, \quad (25)$$

где  $K$ - коэффициент схемы, представленной на рис. 12.

Определим по данным соотношениям величины  $R_1$  и  $R_2$ , задав  $C$  из стандартного ряда и приняв его за 10 мФ.

Рассчитаем схему первого корректирующего звена.

Из передаточной функции этого звена определим численные значения коэффициентов

$$W_{K31} = \frac{(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)} = \frac{(0,67 p + 1)}{(0,0067 p + 1)},$$

получим

$$T_1 = 0,67, \quad T_2 = 0,0067$$

Полагая емкость конденсатора  $C^1 = 10^{-5}$  Ф, рассчитаем коэффициент усиления сигнала и значения активных сопротивлений:

$$K^1 = \frac{T_2}{T_1} = \frac{0,0067}{0,67} = 0,01 \quad (26)$$

$$R_1^1 = \frac{T_1}{C} = \frac{0,67\text{с}}{10^{-5}\text{Ф}} = 67 \cdot 10^3 \text{ Ом} \quad (27)$$

$$R_2^1 = \frac{KR_1}{K} = \frac{0,01 \cdot 67 \cdot 10^3 \text{ Ом}}{1 - 0,01} = \frac{670}{0,99} = 676,768 \text{ Ом} \quad (28)$$

С учетом равенства первого и второго корректирующих звеньев получим значения параметров второго корректирующего звена:

$$C^2 = 10^{-5} \Phi \quad (29)$$

$$K^2 = 0,01 \quad (30)$$

$$R_1^2 = 67 \cdot 10^3 \text{ Ом} \quad (31)$$

$$R_2^2 = 676,768 \text{ Ом} \quad (32)$$

Рассчитаем схему третьего корректирующего звена также как для первого звена:

$$W_{K33} = \frac{(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)} = \frac{(0,25 p + 1)}{(0,0067 p + 1)}$$

$$T_1 = 0,25 \text{ с}, T_2 = 0,0067 \text{ с} \quad C^3 = 10^{-5} \Phi$$

Тогда

$$K^3 = \frac{T_2}{T_1} = \frac{0,0067}{0,25} = 0,0268 \quad (33)$$

$$R_1^3 = \frac{T_1}{C} = \frac{0,25 \text{ с}}{10^{-5} \Phi} = 25 \cdot 10^3 \text{ Ом} \quad (34)$$

$$R_2^3 = \frac{KR_1}{K} = \frac{0,01 \cdot 25 \cdot 10^3 \text{ Ом}}{1 - 0,0268} = \frac{670}{0,9732} = 688,45 \text{ Ом} \quad (35)$$

Таким образом, электрическая схема корректирующего устройства будет состоять из 3 последовательно соединенных схем аналогичных рис. 12 с общим коэффициентом усиления

$$K^* = K^1 K^2 K^3 = 0,01 \cdot 0,01 \cdot 0,0268 = 0,268 \cdot 10^{-5}$$

Из (11) известно, что коэффициент усиления всего корректирующего устройства равен 10. Для того, чтобы выполнить это требование в

электрическую схему корректирующего устройства необходимо ввести дополнительное корректирующее звено (К34) – операционный усилитель с коэффициентом усиления

$$K_y = \frac{K_{КУ}}{K_1 K_2 K_3} = \frac{10}{0,268 \cdot 10^{-5}} = 37,3134328 \cdot 10^5 = 3731343,28$$

Тогда электрическая схема корректирующего устройства примет вид –

рис.13

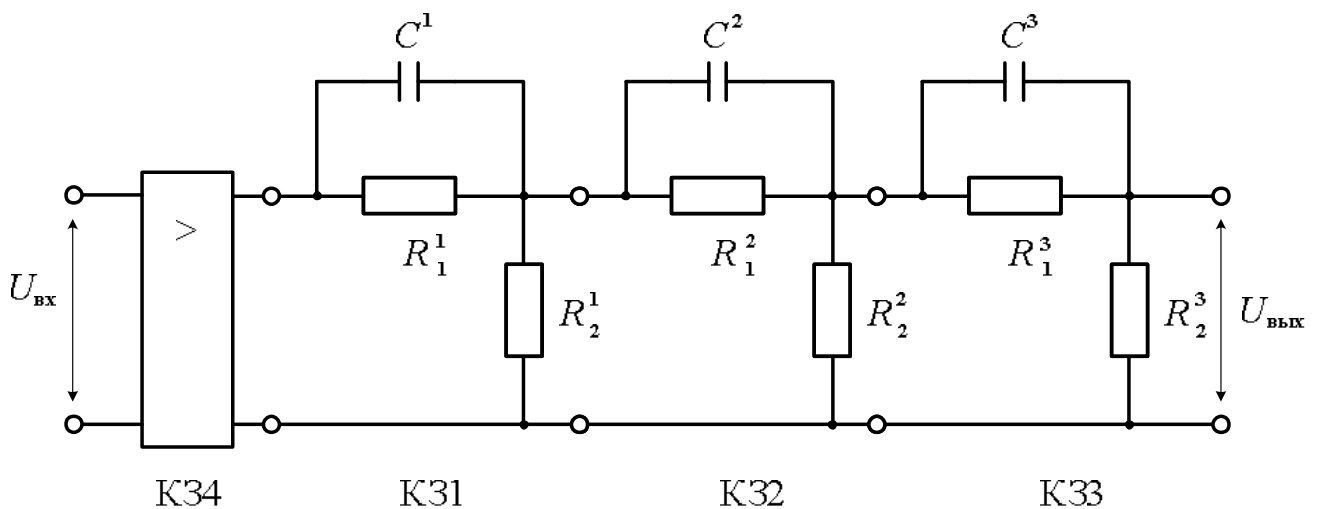


Рисунок 13 - Схема корректирующего устройства

В табл. 5 представлены рассчитанные значения элементов схемы корректирующего устройства

Табл. 5- Числовые значения электрических элементов корректирующего устройства

	<b>Звено кз1</b>	<b>Звено кз2</b>	<b>Звено кз2</b>	<b>Звено кз2</b>
<b>C<sub>1</sub>, мФ</b>	10	10	10	-
<b>R<sub>1</sub>, Ом</b>	67000	67000	25000	-
<b>R<sub>2</sub>, Ом</b>	676,768	676,768	688,45	-
<b>K</b>	0,01	0,01	0,0268	3731343,28

## Заключение

В данной расчетно-графической работе проведен анализ и синтез линейной системы автоматического регулирования.

В результате анализа преобразована структурная схема и определена передаточная функция системы в разомкнутом состоянии, передаточная функция замкнутой системы по заданному каналу. Система в замкнутом состоянии оказалась не устойчивой по расположению корней, по критериям Гурвица, Найквиста и переходному процессу.

Граница устойчивости построенная для постоянной времени ТЗ методом Д-разбиения, показала, что не существует целых вещественных значений этого параметра при которых система станет устойчивой. Поэтому необходимо в САР внести дополнительное корректирующее устройство.

Корректирующее устройство было получено по методу логарифмических частотных характеристик. Для проверки был выполнен расчет запаса по фазе, который показал что расчет произведен верно. Был построен переходной процесс САР с корректирующим устройством, который подтвердил, что система стала устойчивой и имеет приемлемые показатели качества.

Разработана электрическая схема корректирующего устройства и рассчитаны числовые значения емкостей, активных сопротивлений и коэффициент пропорциональности операционного усилителя, входящих в состав корректирующего устройства.



## Библиографический список

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов .— 4-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Профессия, 2004 .— 752 с. : ил. ; 25 см .— (Специалист) .— Библиогр.: с. 744-747 (101 назв.) .— ISBN 5-9
2. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие / Востриков А.С., Французова Г.А. – М.: Высшая школа, 2007. –365с.
3. Дорф Р. Современные системы управления / Дорф Р., Бишоп Р. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых знаний, 2008. –832с.
4. Лазарев, Ю.Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебный курс. – СПб: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. - 512 с.
5. Ким Д.П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 328 с.
- 6 Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (Элементы теории. Методы расчета и справочный материал). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с., ил.