

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Информатика и управление в технических системах»

Т Е О Р И Я АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ по дисциплине
для студентов направления
27.03.04 – Управление в технических системах

В трех частях

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2024

УДК 681.51(073)
ББК 32.965.4я73
Т33

Р е ц е н з е н т :

Д. А. Токарев – канд. техн. наук, доцент кафедры
"Информатика и управление в технических системах"
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Составители: А. И. Грушун, Т. А. Грушун

Т33 Теория автоматического управления : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине для студентов направления 27.03.04 – Управление в технических системах. – В 3-х ч. Ч. 2 / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, кафедра «Информатика и управление в технических системах» ; сост.: А. И. Грушун, Т. А. Грушун. – Севастополь : СевГУ, 2024. – 66 с. – Текст : электронный.

Рассматриваются вопросы математического и прикладного аппарата анализа и синтеза линейных систем автоматического управления.

Предназначены для студентов направления подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах.

УДК 681.51(073)
ББК 32.965.4я73

Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры "Информатика и управление в технических системах", протокол № 3 от 6 декабря 2022 г.

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании ученого совета Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, протокол № 2 от 2 февраля 2023 г.

© Грушун А. И., Грушун Т. А., сост., 2024
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1. Построение переходных процессов частотным методом	4
Лабораторная работа № 2. Исследование автоматических систем комбинированного управления	16
Лабораторная работа № 3. Применение метода корневого годографа в задачах автоматического управления	28
Лабораторная работа № 4. Влияние корректирующих звеньев на устойчивость и качество систем автоматического управления	40
Лабораторная работа № 5. Исследование ПИД-регулятора	51
Библиографический список	66

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания включают пять лабораторных работ, охватывающих основные разделы изучаемой дисциплины. В процессе подготовки к выполнению работы студент должен изучить основные теоретические положения, ознакомиться с описанием используемого программного продукта и выполнить предварительные теоретические расчеты.

Лабораторные работы позволяют более глубоко изучить методы анализа качества и построения переходных процессов систем автоматического управления (САУ), методы синтеза линейных САУ, получить практические навыки исследования процессов в линейных САУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ПОСТРОЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

1.1. Цель работы

Освоить применение метода трапецеидальных частотных характеристик построения переходных процессов в линейных САУ.

1.2. Теоретические сведения

При решении различного рода задач управления всегда возникает необходимость исследования переходных процессов, протекающих в линейных САУ.

Устойчивость является необходимым, но недостаточным условием работоспособности САУ. Устойчивость системы управления означает лишь то, что в системе происходит затухание переходного процесса под влиянием управляющего или возмущающего внешнего воздействия. Время затухания процесса, максимальное отклонение регулируемой величины и число колебаний в системе при этом не определяются, однако эти величины являются очень важными показателями качества процессов регулирования.

Показатели качества процессов регулирования можно определить с помощью различных методов. К числу их в первую очередь следует отнести построение переходных процессов по заданным передаточным функциям замкнутых систем [1]. Существует несколько методов построения переходных процессов в САУ [1, 2], однако все они имеют свои определенные достоинства и недостатки, а также границы применимости.

В данной лабораторной работе решается задача построения переходного процесса в линейных САУ методом трапецеидальных частотных характеристик [1, 5, 6].

Метод приближенного построения кривой переходного процесса в линейных САУ по заданной вещественной частотной характеристике (ВЧХ) $P(\omega)$ замкнутой системы был разработан В.В. Солодовниковым. Этот способ полезен тогда, когда расчет системы ведется с самого начала частотными методами. **Он совершенно не-**

обходим, если известны уравнения не всех звеньев системы, а часть из них задается экспериментально снятыми частотными характеристиками.

Частотный метод построения переходных процессов заключается в графическом способе вычисления интеграла

$$x(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega, t > 0.$$

Представим кривую $P(\omega)$ в виде суммы ряда типовых трапецеидальных кривых $p_i(\omega)$ (рисунок 1.1):

$$P(\omega) \approx \sum_{i=1}^n p_i(\omega), \quad (1)$$

тогда

$$x_i(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} p_i(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega, \quad (2)$$

то есть,

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t). \quad (3)$$

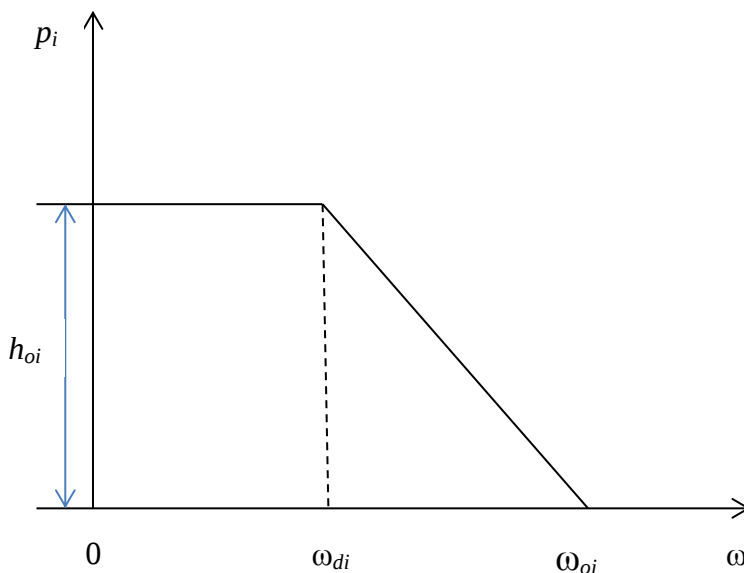


Рисунок 1.1 – Произвольная трапецеидальная частотная характеристика

Будем считать, что функция $p_i(\omega)$ определяется с помощью следующего выражения:

$$p_i(\omega) = \begin{cases} h_{oi}, & \text{при } 0 < \omega < \omega_{di}; \\ h_{oi} \frac{\omega_{oi}-\omega}{\omega_{oi}-\omega_{di}}, & \text{при } \omega_{di} < \omega < \omega_{oi}; \\ 0, & \text{при } \omega_{oi} < \omega. \end{cases} \quad (4)$$

Функция $p_i(\omega)$ и представляет собой трапецеидальную частотную характеристику. Подставив выражение (4) в формулу (2), получим

$$x_i(t) = \frac{2}{\pi} h_{oi} \left[\int_0^{\omega_{di}} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega + \int_{\omega_{di}}^{\omega_{oi}} \frac{\omega_{oi}-\omega}{\omega_{oi}-\omega_{di}} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega \right], \quad (5)$$

откуда после ряда несложных преобразований найдем

$$x_i(t) = \frac{2}{\pi} h_{oi} \left\{ S_i(\omega_{di}t) + \frac{\omega_{oi}}{\omega_{oi} - \omega_{di}} [S_i(\omega_{oi}t) - S_i(\omega_{di}t)] + \frac{1}{\omega_{oi}-\omega_{di}} \left(\frac{\cos \omega_{oi}t - \cos \omega_{di}t}{t} \right) \right\}, \quad (6)$$

где

$$S_i(\omega_i t) = \int_0^{\omega_i} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega.$$

Для составления таблиц функции $x_i(t)$ В.В. Солодовников предложил использовать единичные трапецеидальные частотные характеристики, имеющие $h_{oi}=1$, $\omega_{oi}=1$ и коэффициент χ , изменяющийся в пределах от 0 до 1,0 (рисунок 1.2). Пользуясь этими характеристиками, переходную функцию в соответствии с формулой (6) можно представить в виде

$$h_\chi(t) = \frac{2}{\pi} \left\{ S_i(\chi t) + \frac{1}{1-\chi} \left[S_i(t) - S_i(\chi t) + \frac{\cos t - \cos \chi t}{t} \right] \right\}, \quad (7)$$

откуда видно, что функции $h_\chi(t)$ зависят только от одного параметра χ , и их можно представить в виде таблиц. С помощью этих таблиц можно вычислять переходные процессы в системах регулирования с точностью 2-5%.

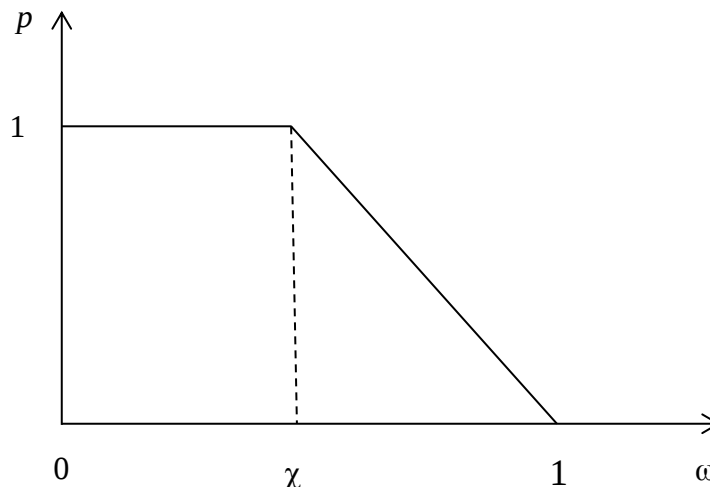


Рисунок 1.2 – Единичная трапецеидальная частотная характеристика

Порядок построения переходного процесса по частотной характеристике замкнутой системы следующий:

1. Разбиваем ВЧХ на n трапеций. Определяем для каждой из трапеций ω_{di} , ω_{oi} , h_{oi} .
2. Вычисляем для каждой из трапеций наклон

$$\chi_i = \frac{\omega_{di}}{\omega_{oi}}. \quad (8)$$

3. По вычисленному χ_i находим по таблице соответствующие значения h_{χ} -функций при $t_{\text{табл}}$.

4. Полученные значения $h_{\chi i}$ умножаем на высоты трапеций h_{oi} .

5. Откладывая по оси времени t значения $t_{\text{истин } i} = t_{\text{табл } i} / \omega_{oi}$, а по оси ординат значения $h_{oi} h_{\chi i}$, получим составляющие переходных процессов $x_i(t)$ для каждой из трапеций.

6. Складываем ординаты этих кривых с учетом их знака, получим искомый переходный процесс $x(t)$.

1.3. Порядок теоретической подготовки

Предметом исследований, выполняемых в лабораторной работе, является замкнутая САУ, заданная передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (9)$$

Программа теоретической подготовки:

а) Изучить метод трапеций.

б) Проанализировать устойчивость САУ с передаточной функцией (9). Варианты исходных данных приведены в таблице 1.2. Номер варианта задания выдается преподавателем.

Выполнить анализ устойчивости САУ можно, например, вычислив корни характеристического уравнения (полюса передаточной функции (9)). Для этого воспользуемся программной средой MatLab [3]. Передаточную функцию зададим с помощью команды `tf`.

Ниже приводится пример кода программы MatLab:

```
clc; clear all; close all;  
b=[0.0035 0.37 9.5];  
a=[0.000010 0.00103 0.02715 1.1225 1.315];  
w=tf(b,a);  
% ws=zpk(w);  
pole(w)
```

Получаем следующий результат:

ans =

```
-86.4096 + 0.0000i  
-7.6927 +34.6946i  
-7.6927 -34.6946i  
-1.2050 + 0.0000i
```

>>

Все полученные корни имеют отрицательную действительную часть (находятся в левой полуплоскости комплексной плоскости). Это говорит о том, что исследуемая система является устойчивой.

в) По передаточной функции (9) получить выражение для построения ВЧХ замкнутой системы.

Пункты б и в теоретической части работы необходимо выполнить в форме предварительного отчета по лабораторной работе.

1.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

Выполнение расчетных операций производится с использованием ПЭВМ и системы научных и инженерных расчетов MatLab.

Программа экспериментальных исследований:

а) Построить график ВЧХ.

Для построения в MatLab графика ВЧХ воспользуемся командой `freqresp`.

Ниже приводится пример программы MatLab:

```
om=0:0.01:80;  
Wjw=freqresp(w, om);  
re=real(Wjw(:));
```

```
plot(om, re);  
title("ВЧХ");  
grid on;
```

Результат исполнения кода изображен на рисунке 1.3.

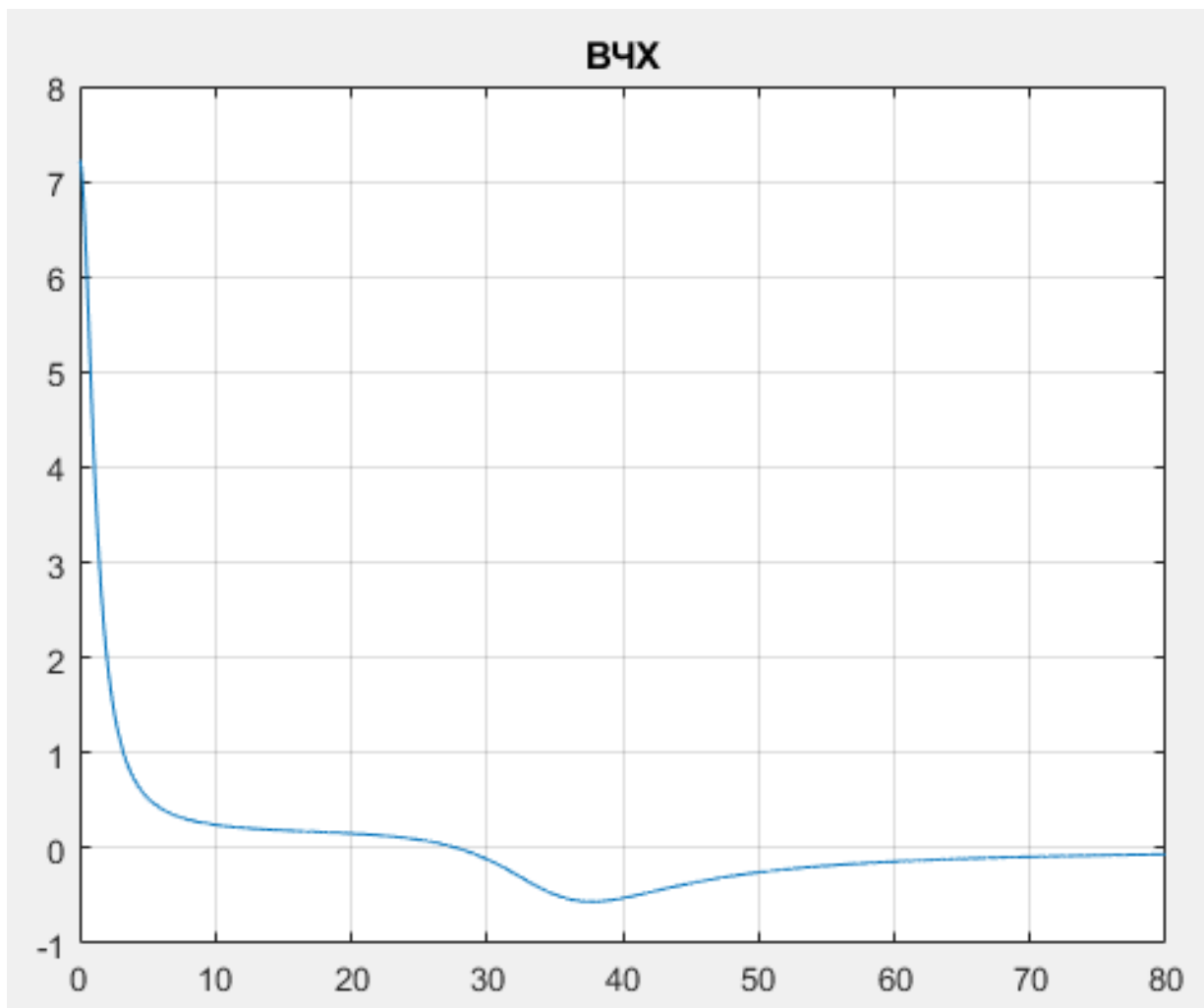


Рисунок 1.3 – График ВЧХ исследуемой системы

б) Разбить построенную ВЧХ на требуемое число трапеций.

Построенную ВЧХ (рисунок 1.3) можно разбить, например, с помощью графического редактора Paint на четыре трапеции (рисунок 1.4).

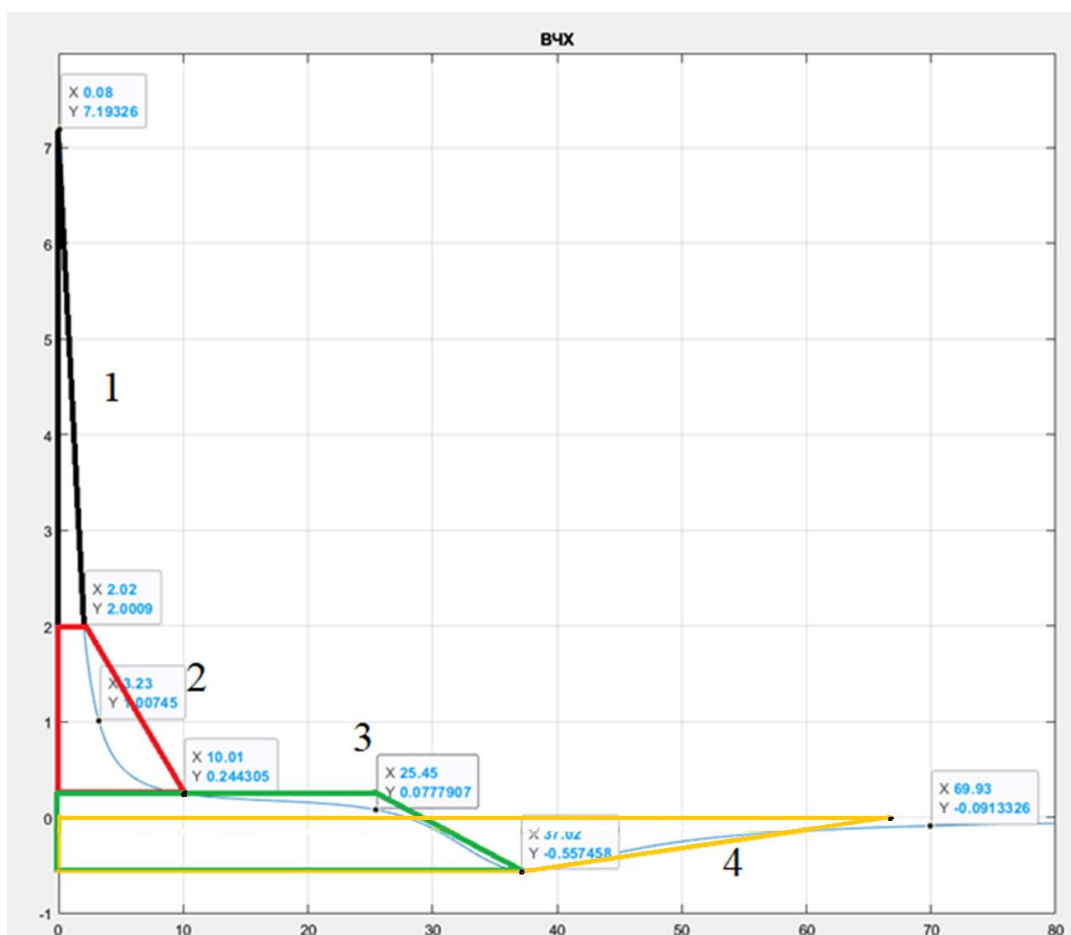


Рисунок 1.4 – Разбиение ВЧХ на трапеции

в) Построить переходный процесс в САУ методом трапеций.

Проведя анализ построенных трапеций (рисунок 1.4) сформируем таблицу (таблица 1.1), содержащую значения требуемых для применения метода трапеций параметров ω_{di} , ω_{oi} , h_{oi} (рисунок 1.1) и параметра χ_i . Параметр χ_i для каждой трапеции определяется по формуле (8).

Таблица 1.1 – Параметры трапеций

	Трапеция 1	Трапеция 2	Трапеция 3	Трапеция 4
h_{oi}	5,19	1,76	0,81	0,56
ω_{di}	0	2,02	25,45	37,02
ω_{oi}	2,02	10,1	37,02	67,11
χ_i	0	0,2	0,69	0,55

По вычисленному χ_i находим по таблице h-функций [1, 5] соответствующие значения h_{χ} -функций при $t_{\text{табл}}$ для каждой из трапеций и формируем код программы MatLab. Ниже приводится пример фрагмента программы MatLab:

```
%переходные процессы из таблицы h-функций
```

```

t=0:.5:26;
%h-функция для Кара=0
trap1=[0.000 0.138 0.310 0.449 0.571 0.674 0.755 0.815 0.856 0.883 0.895 0.900 0.903
0.904 0.904 0.907 0.911 0.918 0.925 0.932 0.939 0.946 0.947 0.949 0.950 0.950 0.950
0.950 0.951 0.954 0.956 0.959 0.961 0.964 0.965 0.966 0.966 0.966 0.966 0.967 0.967
0.968 0.968 0.969 0.971 0.973 0.973 0.975 0.975 0.975 0.975 0.975 0.975];
%h-функция для Кара=0.2
trap2=[0.000 0.192 0.371 0.538 0.682 0.802 0.895 0.963 1.008 1.029 1.042 1.042 1.037
1.029 1.024 1.021 1.020 1.021 1.025 1.028 1.030 1.031 1.030 1.028 1.024 1.019 1.015
1.011 1.008 1.008 1.006 1.006 1.006 1.005 1.005 1.003 1.002 1.000 0.998 0.996 0.995
0.994 0.994 0.994 0.994 0.995 0.995 0.995 0.995 0.995 0.995 0.994 0.994];
%h-функция для Кара=0.7
trap3=[0.000 0.267 0.519 0.740 0.919 1.050 1.131 1.165 1.163 1.132 1.084 1.032 0.984
0.948 0.927 0.922 0.932 0.951 0.976 1.000 1.020 1.033 1.039 1.037 1.029 1.017 1.005
0.995 0.987 0.983 0.983 0.985 0.990 0.995 0.999 1.002 1.004 1.005 1.004 1.003 1.003
1.002 1.002 1.002 1.002 1.002 1.002 1.001 0.999 0.998 0.996 0.995 0.995];
%h-функция для Кара=0.55
trap4=[0.000 0.248 0.476 0.685 0.866 0.985 1.081 1.132 1.151 1.141 1.114 1.036 1.001
0.975 0.956 0.952 0.932 0.954 0.962 0.972 0.984 0.994 1.001 1.006 1.007 1.007 1.006
1.005 1.005 1.005 1.006 1.007 1.008 1.008 1.007 1.005 1.001 0.999 0.995 0.992 0.991
0.991 0.992 0.995 0.997 1.000 1.002 1.003 1.004 1.004 1.004 1.003 1.002];

```

Полученные значения $h_{\chi i}$ умножаем на высоты трапеций h_{oi} . Откладывая по оси времени t значения $t_{\text{истин}} i = t_{\text{табл}} i / \omega_{oi}$, а по оси ординат значения $h_{oi} h_{\chi i}$, получим составляющие переходных процессов $x_i(t)$ для каждой из трапеций. Ниже приводится пример фрагмента программы MatLab, который добавляется к выше представленному фрагменту, реализующий эти операции:

```

%высоты трапеций
h1=5.19; h2= 1.76; h3= 0.81; h4=0.56;
%частоты трапеций
w10=2.02; w20=10.01; w30=37.02; w40=67.11;
%точки реальных переходных процессов для каждой трапеции
hreal1=h1*trap1; treal1=t/w10;
hreal2=h2*trap2; treal2=t/w20;
hreal3=h3*trap3; treal3=t/w30;
hreal4=h4*trap4; treal4=t/w40;
%графики реальных переходных процессов для каждой трапеции
figure
hold on
plot(treal1, hreal1, 'black');
plot(treal2, hreal2, 'r');
plot(treal3, hreal3, 'g');
plot(treal4, hreal4, 'b');

```

Результат исполнения кода изображен на рисунке 1.5. На рисунке 1.5 кривая черного цвета соответствует трапеции 1 (черного цвета), кривая красного цвета соответствует трапеции 2 (красного цвета), кривая зеленого цвета соответствует трапеции 3 (зеленого цвета), кривая синего цвета соответствует трапеции 4 (желтого цвета).

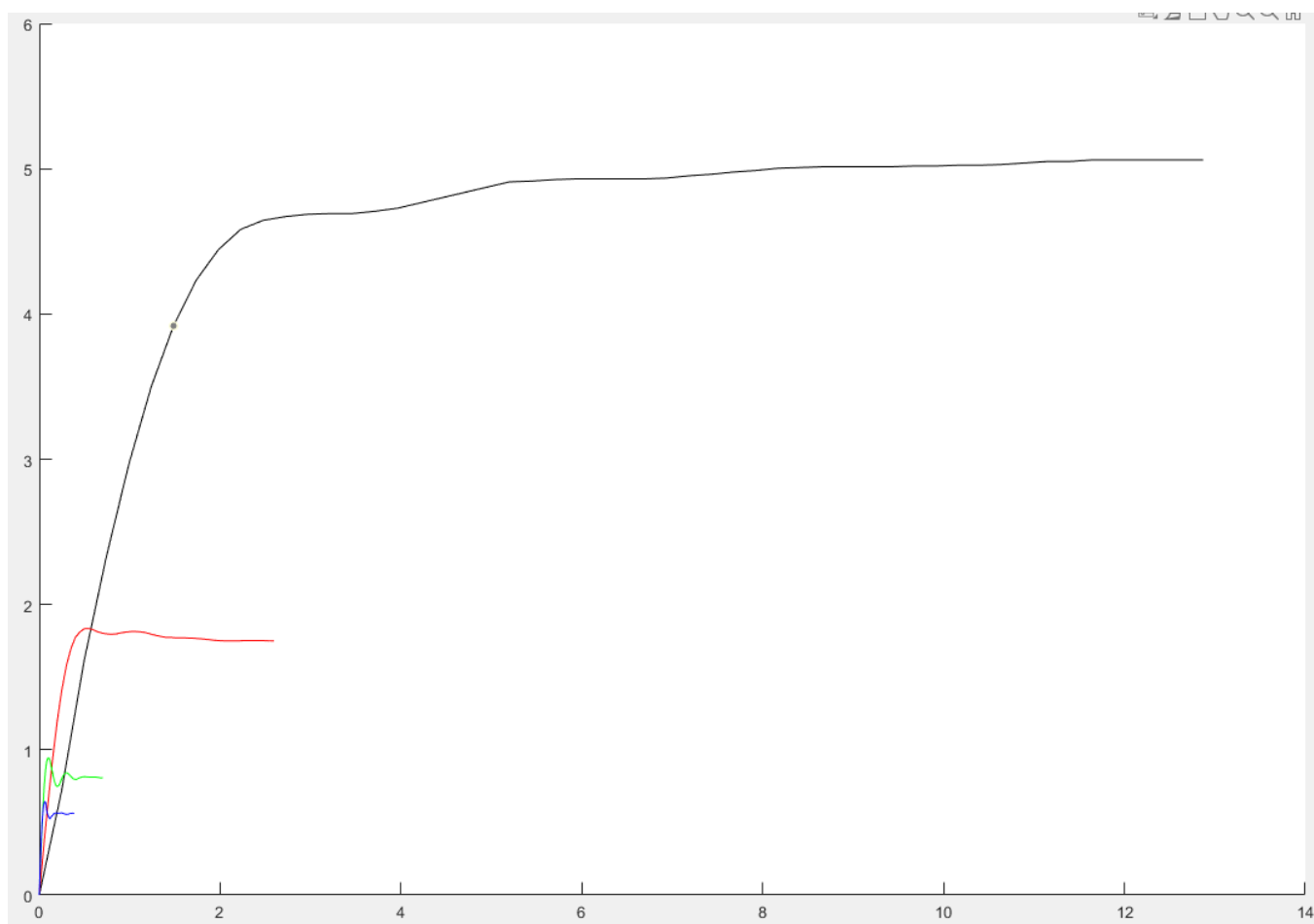


Рисунок 1.5 – Переходные процессы для 4-х трапеций

Далее, с помощью графического редактора, приводим построенные переходные процессы к виду, изображенному на рисунке 1.6 (удлиняем их установившиеся значения).

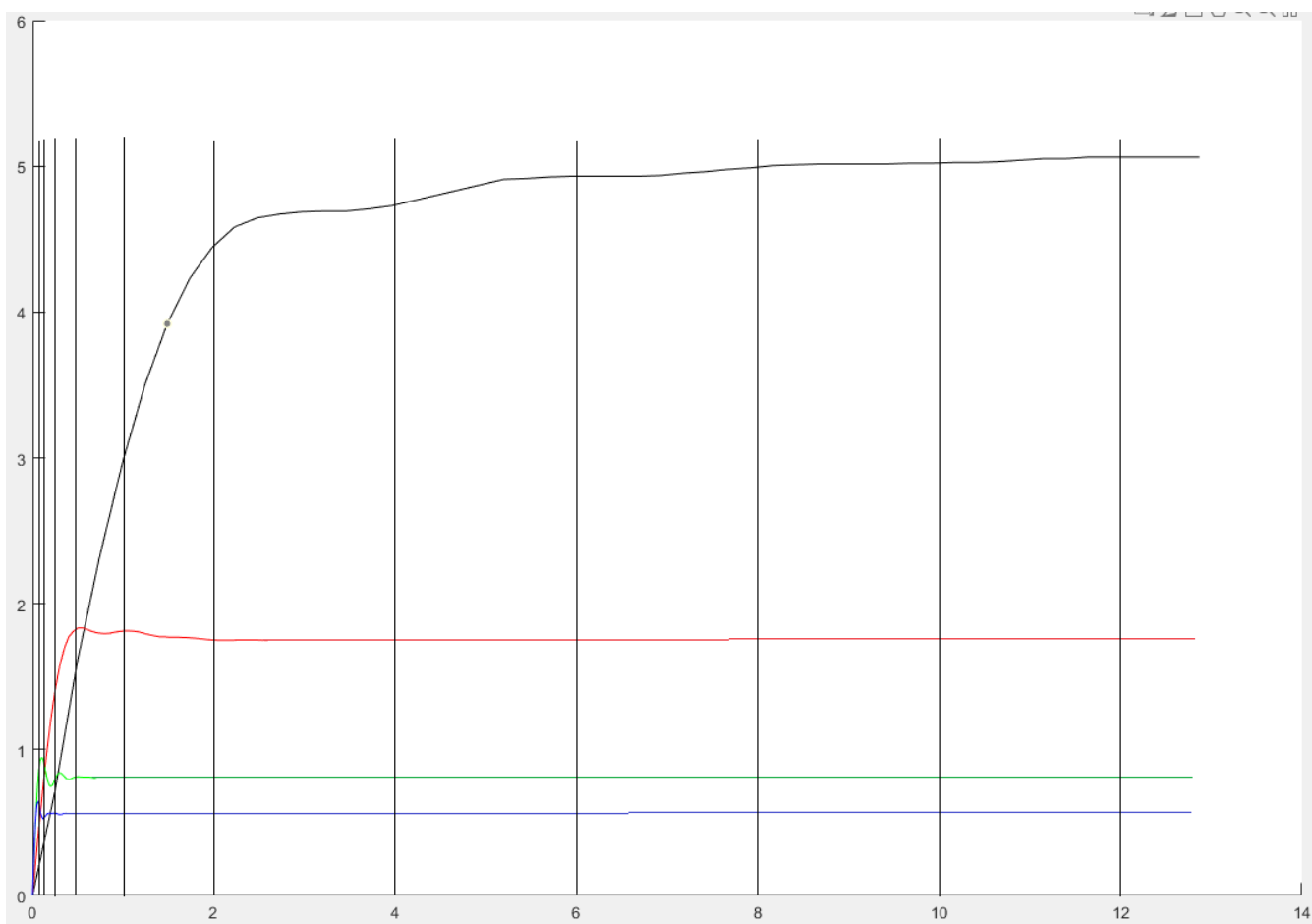


Рисунок 1.6 – Переходные процессы для трапеций, подготовленные для суммирования

Эти переходные процессы необходимо сложить с учетом знака. В нашем случае переходный процесс для четвертой трапеции (график синего цвета) вычитается (имеет знак минус). Для выполнения графического сложения проводим вертикальные линии (рисунок 1.6), по каждой из которых определяем значение времени t и ординаты переходных процессов, соответствующих трапециям. Полученные точки записываются в соответствующие каждой трапеции массивы. Ниже приводится пример программы MatLab, реализующей эти операции:

```
clc; clear all; close all;
b=[0.0035 0.37 9.5];
a=[0.000010 0.00103 0.02715 1.1225 1.315];
w=tf(b,a);
%значения времени для точек переходного процесса
tres=[0 0.063 0.125 0.25 0.5 1.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0];
%значения переходного процесса для трапеции 1 (черного цвета)
%hres1=[0 0.2 0.35 0.7 1.5 3.0 4.55 4.96 4.99 5.0 5.025 5.05];
hres1=[0 0.2 0.35 0.7 1.5 3.0 4.55 5.1 5.21 5.24 5.2 5.18];
%значения переходного процесса для трапеции 2 (красного цвета)
hres2=[0 0.5 0.82 1.4 1.82 1.8 1.75 1.75 1.75 1.75 1.75 1.75];
%значения переходного процесса для трапеции 3 (зеленого цвета)
hres3=[0 0.9 0.85 0.78 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8];
%значения переходного процесса для трапеции 4 (желтого цвета)
hres4=[0 0.55 0.35 0.55 0.56 0.56 0.56 0.56 0.56 0.56 0.56 0.56];
```

```

%суммирование переходных процессов для трапеций с учетом знака
hrealfull=hres1+hres2+hres3-hres4;
%построение графиков переходного процесса полученного методом трапеций и численным
figure
plot(tres, hrealfull, 'g');
hold on
step(w, 'r');
grid on

```

Переходные процессы, полученные методом трапеций (график зеленого цвета) и численным интегрированием (график красного цвета) изображены на рисунке 1.7.

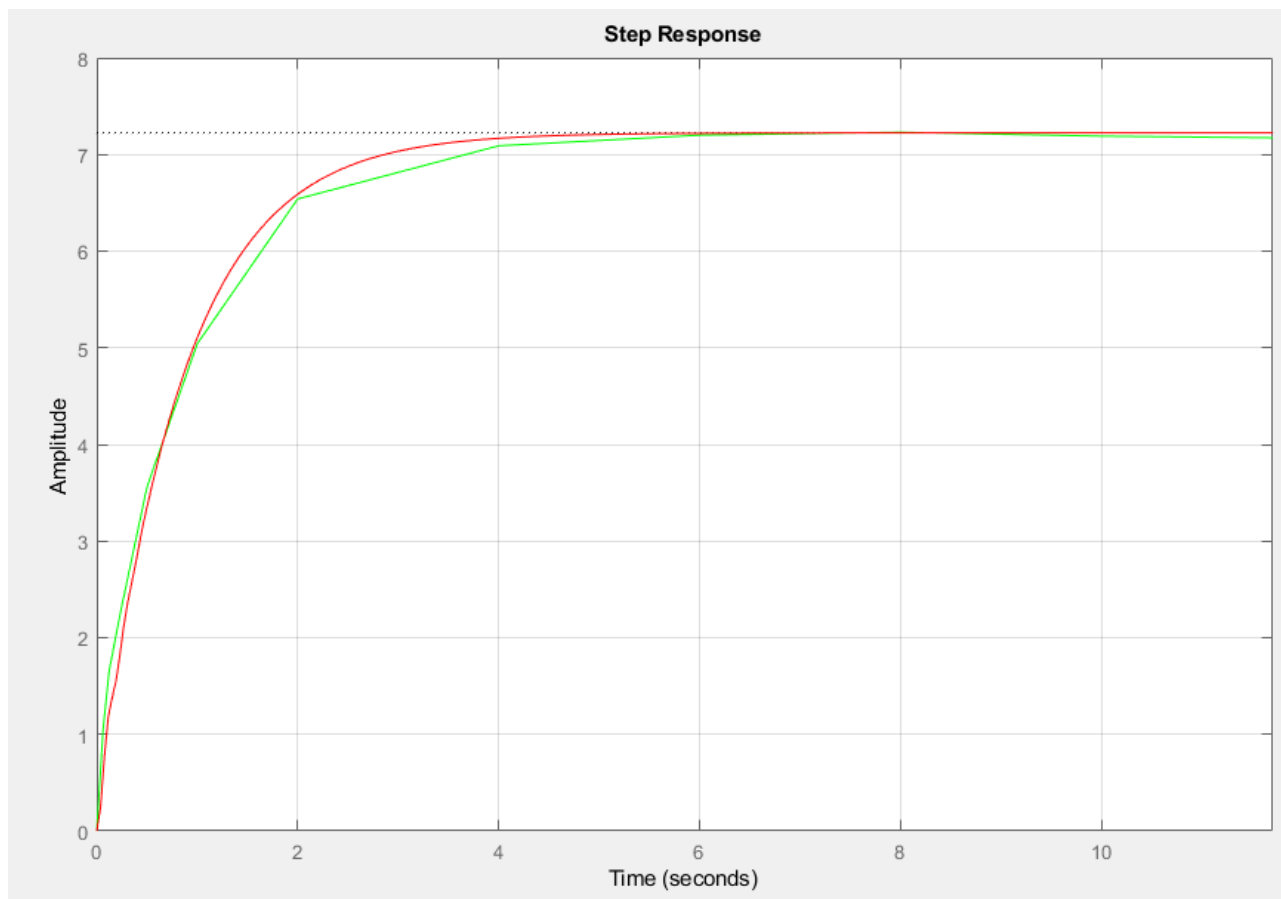


Рисунок 1.7 – Переходные процессы в исследуемой САУ

г) Построить переходный процесс в САУ с помощью численного метода.

В нашем примере переходный процесс в САУ, построенный с помощью численного метода, изображен на рисунке 1.7 графиком красного цвета.

д) Сравнить переходные процессы, построенные методом трапеций и с помощью численного метода.

Графики ВЧХ и переходных процессов, построенные на экране монитора включаются в отчет по лабораторной работе.

1.5. Содержание отчета о выполнении лабораторной работы

Отчет должен содержать:

- а) Цель работы.
- б) Предмет исследования.
- в) Аналитическое исследование системы.
- г) Результаты проведенных экспериментальных исследований в виде таблиц значений, графиков и программ.
- д) Развернутые комментарии к полученным результатам.
- е) Краткие выводы.

Таблица 1.2 – Варианты значений коэффициентов передаточной функции замкнутой системы

№ вар.	b_2	b_1	b_0	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
1	0.0035	0.370	9.50	0.000010	0.00103	0.02715	1.1225	1.315
2	0.0037	0.372	9.52	0.000020	0.00105	0.02720	1.1230	1.316
3	0.0039	0.374	9.52	0.000012	0.00107	0.02725	1.1235	1.317
4	0.0041	0.376	9.56	0.000014	0.00109	0.02730	1.1240	1.318
5	0.0042	0.378	9.58	0.000016	0.00111	0.02735	1.1245	1.319
6	0.0044	0.380	9.60	0.000018	0.00113	0.02740	1.1250	1.320
7	0.0046	0.382	9.62	0.000020	0.00115	0.02745	1.1255	1.321
8	0.0048	0.384	9.64	0.000022	0.00117	0.02750	1.1260	1.322
9	0.0053	0.386	9.66	0.000024	0.00119	0.02755	1.1265	1.323
10	0.0057	0.388	9.68	0.000026	0.00121	0.02760	1.1270	1.324
11	0.0060	0.390	9.69	0.000028	0.00123	0.02765	1.1275	1.325
12	0.0035	0.371	9.49	0.000011	0.00104	0.02716	1.1227	1.316
13	0.0037	0.373	9.51	0.000021	0.00106	0.02721	1.1233	1.317
14	0.0039	0.375	9.50	0.000013	0.00108	0.02726	1.1237	1.326
15	0.0041	0.377	9.55	0.000015	0.00110	0.02731	1.1243	1.327
16	0.0042	0.379	9.57	0.000017	0.00112	0.02736	1.1248	1.328
17	0.0044	0.381	9.59	0.000019	0.00114	0.02741	1.1253	1.320
18	0.0046	0.383	9.61	0.000021	0.00116	0.02746	1.1258	1.321
19	0.0048	0.385	9.63	0.000023	0.00118	0.02751	1.1263	1.322
20	0.0053	0.387	9.67	0.000025	0.00120	0.02756	1.1267	1.323
21	0.0057	0.389	9.69	0.000027	0.00122	0.02761	1.1273	1.324
22	0.0060	0.391	9.71	0.000029	0.00124	0.02766	1.1278	1.317
23	0.0034	0.377	9.55	0.000015	0.00110	0.02731	1.1243	1.327
24	0.0036	0.379	9.57	0.000017	0.00112	0.02736	1.1248	1.328
25	0.0031	0.381	9.59	0.000019	0.00114	0.02741	1.1253	1.320
26	0.0041	0.383	9.61	0.000021	0.00116	0.02746	1.1258	1.321
27	0.0043	0.385	9.63	0.000023	0.00118	0.02751	1.1263	1.322
28	0.0050	0.387	9.67	0.000025	0.00120	0.02756	1.1267	1.323
29	0.0058	0.389	9.69	0.000027	0.00122	0.02761	1.1273	1.324
30	0.0062	0.391	9.71	0.000029	0.00124	0.02766	1.1278	1.317

1.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение частотной передаточной функции.
2. Как исследовать устойчивость и качество с помощью переходных процессов?
3. Какие существуют методы построения переходных процессов в линейных САУ?

- 4 Дать сравнительный анализ алгебраического, частотного и численного методов расчета переходных процессов.
- 5 Поясните идею метода построения переходных процессов на основе частотных характеристик.
- 6 В чем заключается содержание метода трапеций?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Цель работы

Исследовать влияние компенсирующих цепей на статические и динамические характеристики САУ скорости вращения вала двигателя постоянного тока.

2.2. Теоретические сведения

Часто одной обратной связи оказывается недостаточно для обеспечения нужной точности системы, испытывающей различные возмущения. Выход состоит в применении идей управления с обратной связью в сочетании с принципом компенсации внешних воздействий [1, 6]. В этом случае управляющий сигнал в САУ имеет две составляющие. Одна формируется с помощью зарегистрированной ошибки управления, а вторая формируется так, чтобы компенсировать вредное воздействие некоторого возмущения непосредственно без измерения ошибки.

Пусть в САУ введена цепь реагирования на возмущающее воздействие. Часть прямой цепи такой системы можно представить схемой, изображенной на рисунке 2.1.

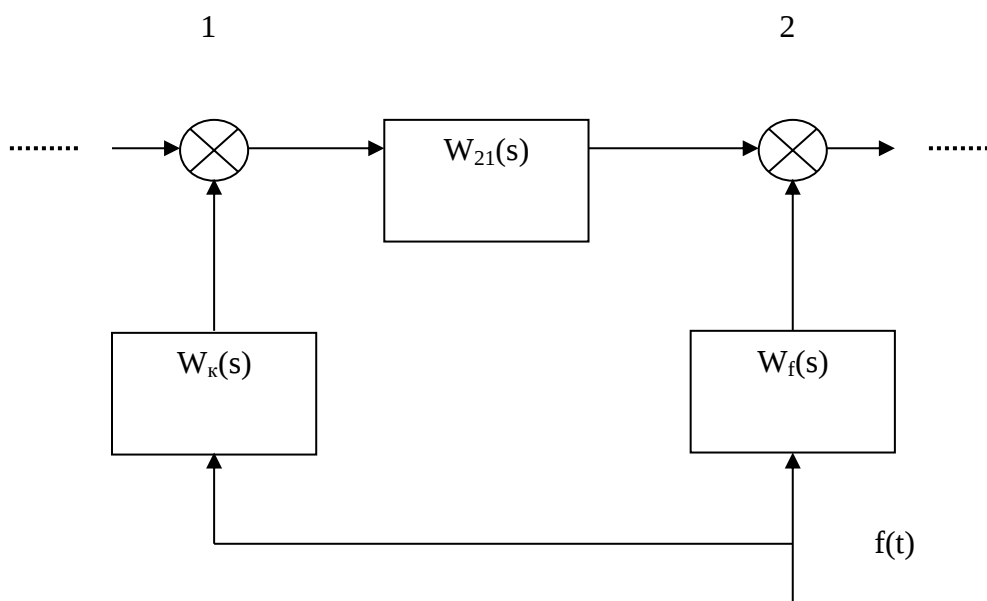


Рисунок 2.1 – Фрагмент прямой цепи САУ с цепью компенсации возмущения

На рисунке 2.1 $f(t)$ – неизвестное как функция времени возмущающее воздействие; $W_f(s)$ – передаточная функция цепи входа возмущающего воздействия в прямую цепь САУ; $W_{21}(s)$ – передаточная функция фрагмента прямой цепи САУ; $W_k(s)$ – передаточная функция цепи компенсации возмущения.

Для выбора $W_k(s)$ изобразим схему (рисунок 2.2), эквивалентную изображенной на рисунке 2.1.

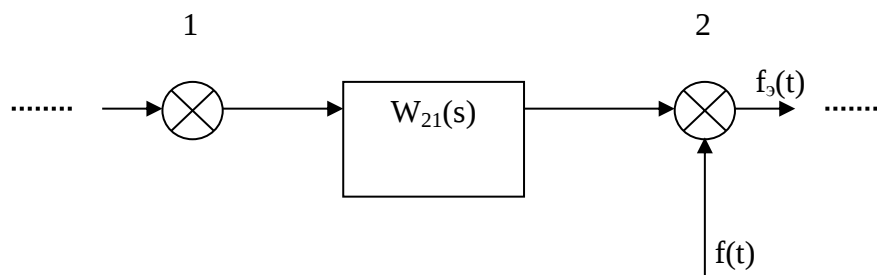


Рисунок 2.2 – Эквивалентная структурная схема САУ с компенсацией возмущения

На рисунке 2.2 эквивалентный сигнал $f_3(s)$ описывается выражением

$$f_3(s) = [W_f(s) + W_k(s)W_{21}(s)]f(s). \quad (1)$$

Тогда условие полной (абсолютной) компенсации будет иметь вид:

$$f_3(s) \equiv 0 \Leftrightarrow W_f(s) + W_k(s)W_{21}(s) \equiv 0 \quad (2)$$

или

$$W_k(s) = -\frac{W_f(s)}{W_{21}(s)}. \quad (3)$$

Если $W_k(s)$ оказывается физически реализуемой, то есть степень знаменателя этой функции не меньше степени числителя, то мы достигаем эффекта полной компенсации. Это значит, что каким бы ни было воздействие $f(t)$ выход системы на него не реагирует, а, следовательно, и составляющие ошибки этого воздействия равны нулю. Такие системы принято называть полностью или абсолютно инвариантными.

Если передаточная функция (3) не относится к классу физически возможных (степень полинома числителя больше степени полинома знаменателя), то полная компенсация, а, следовательно, инвариантность не достигается. В этом случае говорят об «инвариантности до ошибки ε_i » или неполной компенсации.

Можно показать, что $\varepsilon(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ для определенных классов воздействий при выборе соответствующей $W_k(s)$. Эффект неполной компенсации (частичной инвариантности) состоит в том, что путем выбора передаточной функции $W_k(s)$ можно получать равными нулю коэффициенты ошибки C_0, C_1, C_2 и т.д.

Рассмотрим полную схему САУ с цепью компенсации (рисунок 2.3).

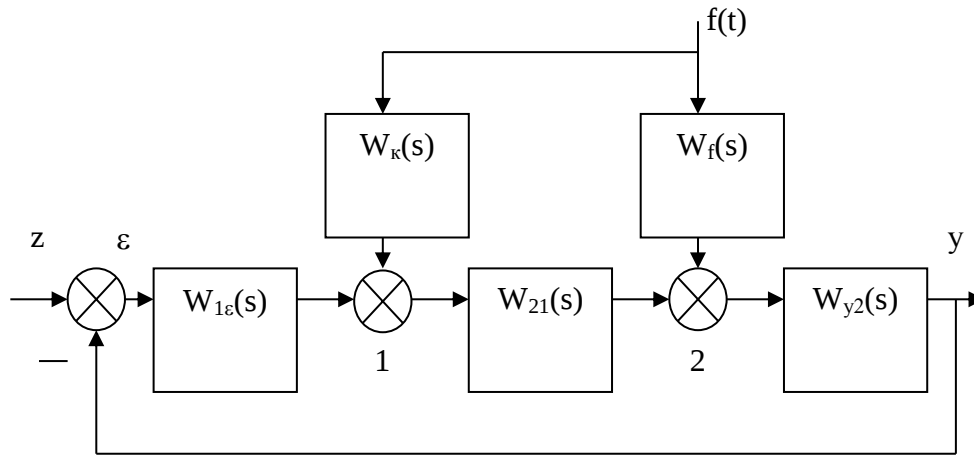


Рисунок 2.3 – Структурная схема САУ с компенсирующей цепью

Запишем выражение для ошибки от возмущающего воздействия:

$$\varepsilon(s) = \Phi_{\varepsilon}^f(s)f(s) = -\frac{W_{y2}(s)}{1+W(s)} [W_f(s) + W_k(s)W_{21}(s)]f(s). \quad (4)$$

Эта формула записана в предположении, что $W_k(s)$ - произвольная передаточная функция. Рассмотрим, как ее выбрать, чтобы обратить в ноль коэффициенты ошибки.

Пусть все звенья САУ статического типа. Определим передаточную функцию компенсирующего устройства $W_k(s)$ из условия частичной инвариантности – равенства нулю статической ошибки по возмущению. Для этого необходимо выполнение условия $C_0=0$. Известно [1, 2, 5, 6], что $C_0 = \Phi_{\varepsilon}^f(0)$. Тогда справедлива запись $W_f(0) + W_k(0)W_{21}(0) = 0$. Следовательно, коэффициент, обеспечивающий компенсацию статической ошибки, можно записать в виде:

$$k_k = W_k(0) = -\frac{W_f(0)}{W_{21}(0)}. \quad (5)$$

Если назначить передаточную функцию цепи компенсации в виде:

$$W_k(s) = \frac{k_2 s + k_1}{T_k s + 1}, \quad (6)$$

то за счет выбора коэффициентов k_1 и k_2 можно обратить в ноль коэффициенты статической и скоростной ошибки соответственно.

Известно [1, 2, 5, 6], что установившуюся ошибку можно представить рядом

$$\varepsilon(s) = C_0 f(s) + C_1 s f(s) + C_2 s^2 f(s) + \dots =$$

$$(C_0 + C_1s + C_2s^2 + \dots)f(s). \quad (7)$$

где $C_0, C_1, C_2 \dots$ - коэффициенты ошибки.

Если передаточную функцию замкнутой системы по ошибке от возмущения $f(t)$ записать в виде

$$\Phi_\varepsilon^f(s) = \frac{a_0(k_1) + a_1(k_2)s + \dots + a_ms^m}{1 + W(s)}, \quad (8)$$

то условие частичной компенсации будет выглядеть следующим образом:

$$C_0 = a_0(k_1) = 0, \quad (9)$$

$$C_1 = a_1(k_2) = 0, \quad (10)$$

откуда легко получить коэффициенты k_1 и k_2 компенсации статической и скоростной ошибки соответственно.

Еще более усложняя передаточную функцию $W_k(s)$, можно и далее коэффициенты установившейся ошибки обращать в ноль.

2.3. Порядок теоретической подготовки

В лабораторной работе исследуются характеристики САУ скорости вращения двигателя постоянного тока при использовании различных принципов комбинированного управления этой системой [1, 2, 6].

Структурная схема исследуемой некомпенсированной САУ изображена на рисунке 2.4.

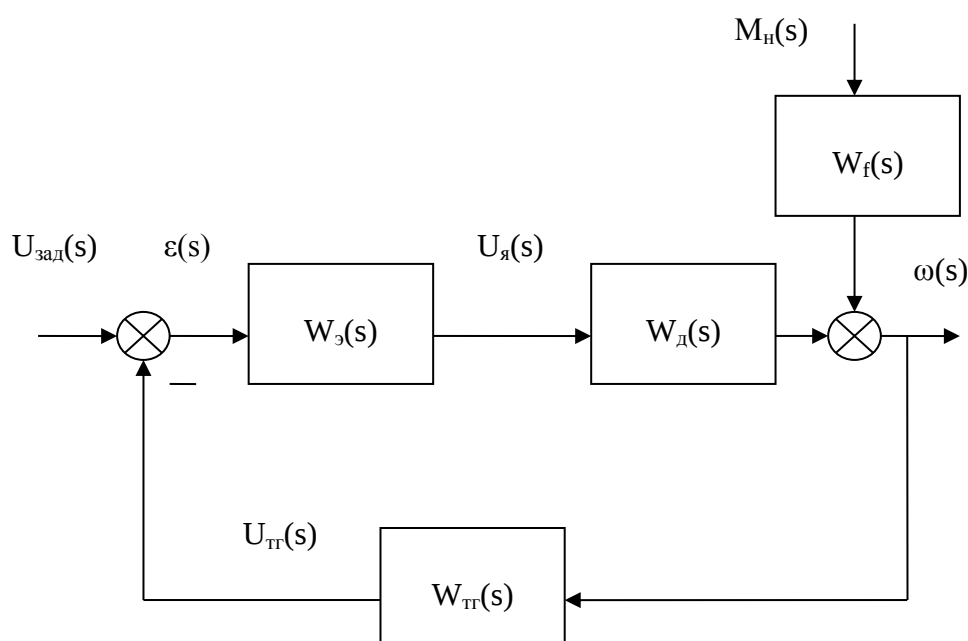


Рисунок 2.4 – Структурная схема САУ скорости вращения двигателя постоянного тока

На рисунке 2.4 $W_э(s)=K_э/(T_эs+1)$ - передаточная функция электронного усилителя мощности; $W_д(s)=K_д/(T_дs+1)$ - передаточная функция двигателя постоянного тока по управляющему воздействию; $W_ф(s)=-K_ф/(T_дs+1)$ - передаточная функция двигателя постоянного тока по возмущающему воздействию; $W_{тг}(s)=K_{тг}$ - передаточная функция тахогенератора; $U_{зад}$ – задающее напряжение; ε – сигнал рассогласования (ошибка в системе); $U_я$ – напряжение в цепи якоря электродвигателя постоянного тока; $M_н$ – момент нагрузки на валу двигателя (возмущающее воздействие); ω – угловая скорость вращения вала двигателя (регулируемая координата); $U_{тг}$ – напряжение на выходе тахогенератора.

Программа теоретической подготовки:

- а) Изучить методы комбинированного управления.
- б) Проанализировать устойчивость некомпенсированной САУ, изображенной на рисунке 2.4. Значения параметров передаточных функций исследуемой САУ для вариантов индивидуальных заданий приведены в таблице 2.1. Номер варианта задания выдается преподавателем. Определить передаточную функцию компенсирующего устройства $W_{кл}(s)$ комбинированной САУ скорости вращения двигателя постоянного тока, изображенной на рисунке 2.5, из условия полной инвариантности.

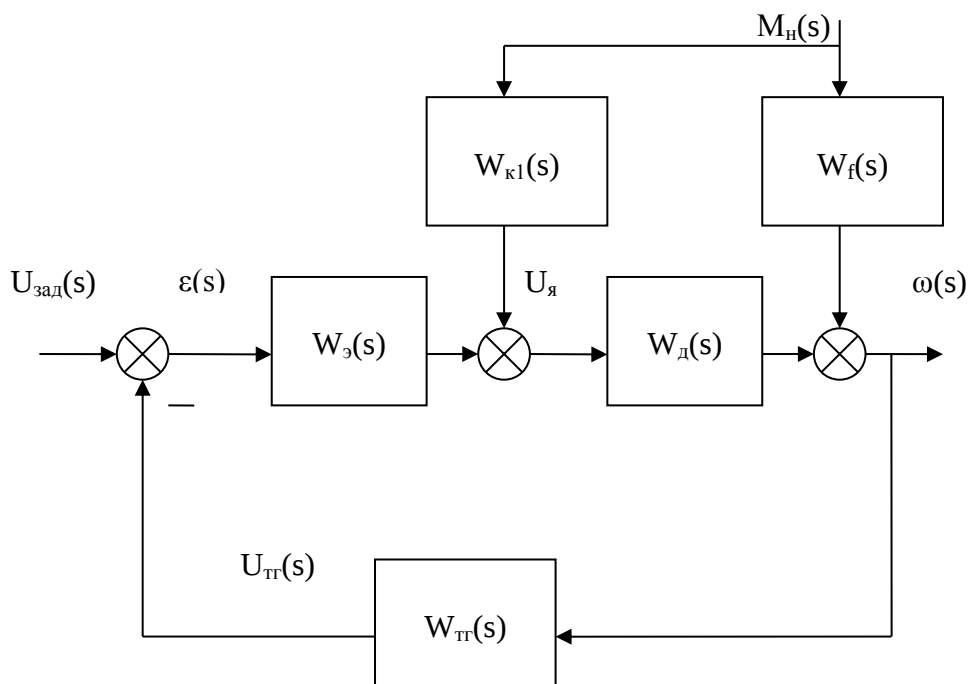


Рисунок 2.5 – Структурная схема комбинированной САУ скорости вращения двигателя постоянного тока

Согласно формулам (1) (2) и (3) компенсирующее звено $W_{кл}(s)$, обеспечивающее полную компенсацию возмущающего воздействия $M_н(t)$ будет иметь вид

$$W_{k1}(s) = -\frac{W_f(s)}{W_d(s)} = -\frac{\frac{K_f}{T_d s + 1}}{\frac{K_d}{T_d s + 1}} = \frac{K_f}{K_d}. \quad (11)$$

Полученная передаточная функция $W_{k1}(s)$ физически реализуема, следовательно, задача решена.

в) Определить передаточную функцию компенсирующего устройства $W_{k2}(s)$ комбинированной САУ скорости вращения двигателя постоянного тока, изображенной на рисунке 2.6, из условия полной инвариантности.

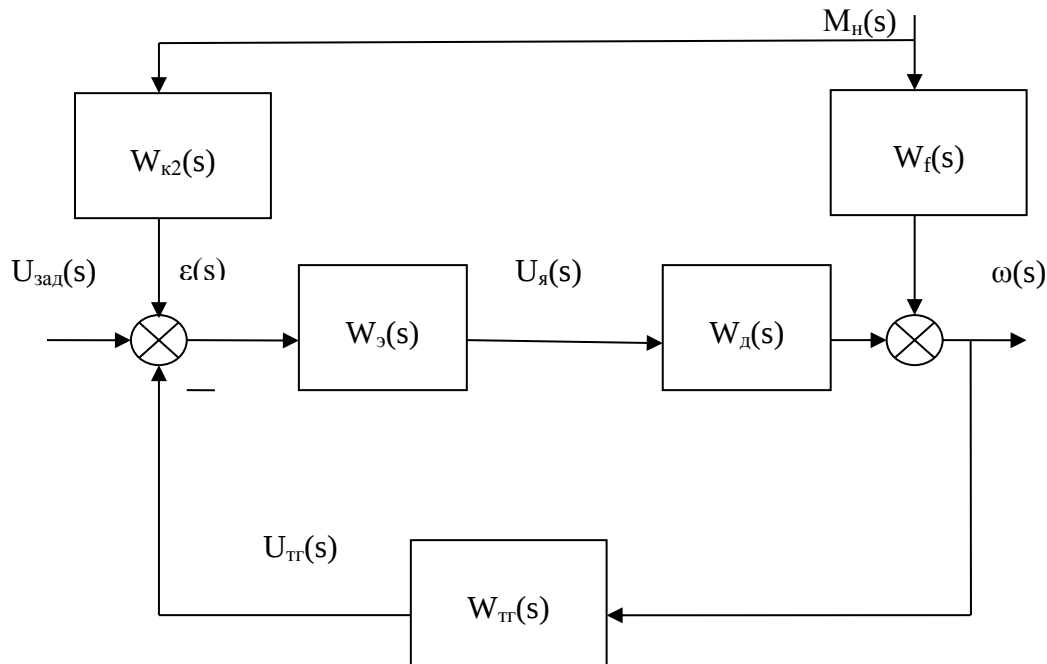


Рисунок 2.6 – Структурная схема комбинированной САУ скорости вращения двигателя постоянного тока

Согласно формуле (1) эквивалентный сигнал будет определяться выражением

$$f_{\omega}(s) = [W_f(s) + W_{k2}(s)W_{\omega}(s)W_d(s)]M_H(s).$$

Тогда, с учетом (2) и (3), компенсирующее звено $W_{k2}(s)$, обеспечивающее полную компенсацию возмущающего воздействия $M_H(t)$ будет иметь вид

$$W_{k2}(s) = -\frac{W_f(s)}{W_{\omega}(s)W_d(s)} = -\frac{\frac{K_f}{T_d s + 1}}{\frac{K_{\omega}}{T_{\omega} s + 1} \cdot \frac{K_d}{T_d s + 1}} = \frac{K_f(T_{\omega} s + 1)}{K_{\omega} K_d}. \quad (12)$$

Полученная передаточная функция $W_{k2}(s)$ физически нереализуема, следовательно, полная компенсация практически невозможна.

г) Определить передаточную функцию компенсирующего устройства $W_{k2}(s)$ комбинационной САУ, изображенной на рисунке 2.6, из условия частичной инвариантности - равенства нулю статической ошибки по возмущению.

Установившаяся ошибка системы описывается формулой [1, 2, 6]:

$$\varepsilon(t \rightarrow \infty) = C_0 M_H(t) + C_1 M_H'(t) + C_2 M_H''(t) + \dots, \quad (13)$$

где $C_0 M_H(t) = \varepsilon_0$ – статическая ошибка, C_0 – коэффициент статической ошибки.

Для выполнения условия равенства нулю статической ошибки, коэффициент статической ошибки C_0 должен быть равен нулю. Данный коэффициент определяется выражением [1, 6]:

$$C_0 = \Phi_\varepsilon^{M_H}(s)|_{s=0} = \Phi_\varepsilon^{M_H}(0), \quad (14)$$

где $\Phi_\varepsilon^{M_H}(s)$ – передаточная функция замкнутой системы по ошибке ε от возмущающего воздействия $M_H(t)$.

Получим передаточную функцию $\Phi_\varepsilon^{M_H}(s)$. Для этого на структурной схеме, изображенной на рисунке 2.6, переносим сигнал с выхода компенсирующего звена $W_{k2}(s)$ на правый сумматор. В результате получаем:

$$\Phi_\varepsilon^{M_H}(s) = \frac{W_{tr}(s)}{1 + W_{tr}(s)W_3(s)W_d(s)} * (W_f(s) + W_{k2}(s)W_3(s)W_d(s)). \quad (15)$$

Тогда, с учетом (12). (13) и (14), справедлива запись

$$C_0 = \Phi_\varepsilon^{M_H}(0) = W_f(0) + W_{k2}(0)W_3(0)W_d(0) = 0 \Rightarrow$$

$$W_{k2}(s) = -\frac{W_f(0)}{W_3(0)W_d(0)} = -\frac{\frac{K_f}{T_d s + 1}}{\frac{K_3}{T_3 s + 1} * \frac{K_d}{T_d s + 1}} \bigg|_{s=0} = \frac{K_f(T_3 s + 1)}{K_3 K_d} \bigg|_{s=0} = \frac{K_f}{K_3 K_d} \quad (16)$$

Полученная передаточная функция $W_{k2}(s)$ физически реализуема, следовательно, задача решена.

д) Определить передаточную функцию компенсирующего устройства $W_{k2}(s)$ комбинационной САУ, изображенной на рисунке 2.6, из условия частичной инвариантности - равенства нулю статической и скоростной ошибки по возмущению. Компенсирующее звено реализовать в виде передаточной функции (6), где постоянную времени T_k принять равной 0.0001с, а коэффициенты k_1 и k_2 определить из условия частичной инвариантности.

Статическая и скоростная составляющие ошибки должны быть равны нулю. Тогда, с учетом этого требования и согласно (7), запишем статическую и скоростную ошибки САУ (рисунок 2.6) в виде

$$\varepsilon(s) = C_0 M_H(s) + C_1 s M_H(s) = (C_0 + C_1 s) M_H(s) = 0, \quad (17)$$

где $C_0 M_H(s) = \varepsilon_0$ – статическая ошибка, C_0 – коэффициент статической ошибки;
 $C_1 s M_H(s) = \varepsilon_1$ – скоростная ошибка, C_1 – коэффициент скоростной ошибки.

В свою очередь справедлива следующая запись для ошибки САУ:

$$\varepsilon(s) = \Phi_\varepsilon^{MH}(s) M_H(s) = 0, \quad (18)$$

где передаточная функция $\Phi_\varepsilon^{MH}(s)$ для исследуемой САУ имеет вид (15).

А из этого вытекает, что

$$W_f(s) + W_{k2}(s) W_3(s) W_d(s) = 0. \quad (19)$$

Раскроем (19) произведя подстановку в него передаточных функций звеньев САУ:

$$\begin{aligned} -\frac{K_f}{T_d s + 1} + \frac{K_2 s + K_1}{T_k s + 1} * \frac{K_3}{T_3 s + 1} * \frac{K_d}{T_d s + 1} \\ = \frac{-K_f T_k T_3 s^2 + (K_3 K_d K_2 - K_f (T_k + T_3)) s + (K_3 K_d K_1 - K_f)}{(T_k s + 1)(T_3 s + 1)(T_d s + 1)} = 0. \Rightarrow \\ -K_f T_k T_3 s^2 + (K_3 K_d K_2 - K_f (T_k + T_3)) s + (K_3 K_d K_1 - K_f) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Поставив в соответствие выражению в скобках формулы (17) выражение (20) можно записать:

$$C_0 = K_3 K_d K_1 - K_f, \quad (21)$$

$$C_1 = K_3 K_d K_2 - K_f (T_k + T_3). \quad (22)$$

Очевидно, что параметры k_1 и k_2 передаточной функции компенсатора (6), для выполнения условия равенства нулю коэффициентов статической и скоростной составляющих установившейся ошибки, получаются по формулам (21) и (22):

$$k_1 = \frac{k_f}{k_3 k_d}, \quad (23)$$

$$k_2 = \frac{k_f (T_k + T_3)}{k_3 k_d}. \quad (24)$$

Пункты б), в), г) и д) теоретической части работы необходимо выполнить в форме предварительного отчета по лабораторной работе.

2.3. Порядок выполнения экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований:

а) Построить единичную переходную функцию некомпенсированной САУ (рисунок 2.4) по ошибке $\varepsilon(t)$ от возмущающего воздействия $M_H(t)$ и определить значение установившейся ошибки. Задающее воздействие $U_{\text{зад}}(t)$ принять равным нулю.

Для этого в рабочем пространстве окна Matlab задаются параметры этой САУ, включая полученные в разделе 2.2:

```
>> Kd=2;  
>> Td=0.8;  
>> Kf=0.5;  
>> Ke=4;  
>> Ty=0.2;  
>> Ktg=0.2;  
>> Tk=0.0001;  
>> K1 = Kf/(Ke*Kd);  
>> K2 = Kf*(Tk+Ty)/(Ke*Kd);
```

В соответствии с приведенной на рисунке 2.4 структурой в среде Simulink строится модель такой системы (рисунок 2.7). По графику ошибки определяется значение статической ошибки (значение ординаты переходного процесса, при котором он перестает изменяться, то есть устанавливается).

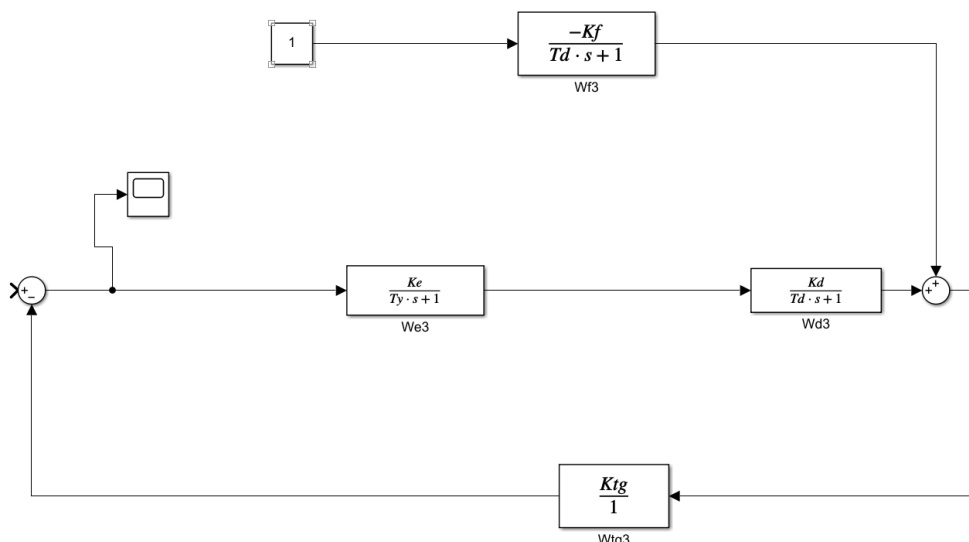


Рисунок 2.7 – Модель исследуемой САУ без компенсации в среде Simulink

б) Построить графики функции ошибки ε в САУ с компенсирующим устройством $W_{kl}(s)$ (рисунок 2.5) при воздействии на нее возмущения $M_H(t)$ вида $1(t)$, t , $\sin(t)$. Задающее воздействие $U_{\text{зад}}(t)$ принять равным нулю. Компенсирующее звено $W_{kl}(s)$ имеет вид (11).

В соответствии с приведенной на рисунке 2.5 структурой в среде Simulink строится модель такой системы (рисунок 2.8). По графику решения определяется значение ошибки ε . Если передаточная функция компенсирующего звена $W_{k1}(s)$ задана верно, то выполняется полная компенсация возмущения $M_n(t)$ и ошибка ε при различных возмущениях ($M_n(t)=1(t)$; t ; $\sin(t)$ или любых других) будет равна нулю.

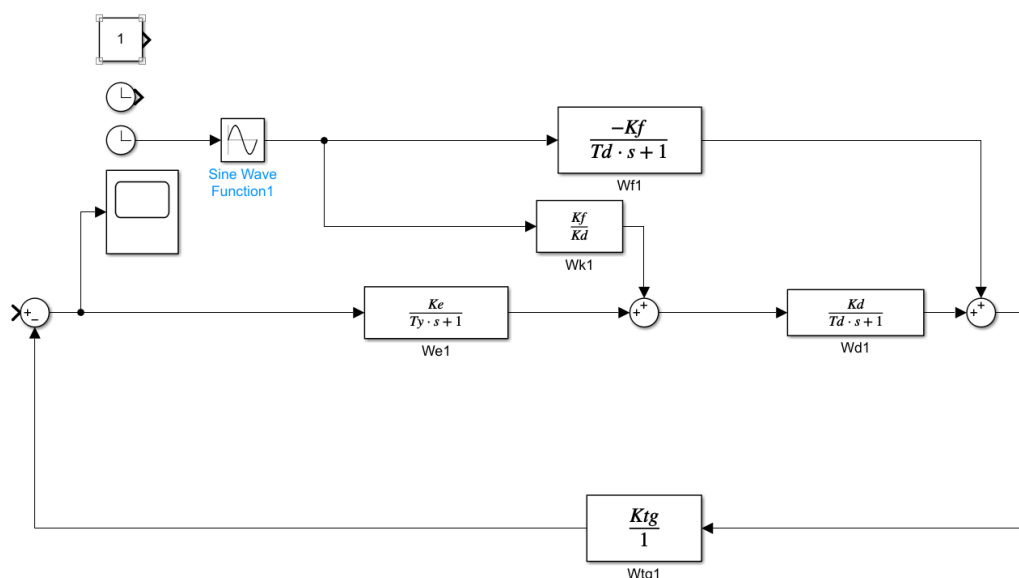


Рисунок 2.8 – Модель исследуемой САУ с компенсирующим звеном $W_{k1}(s)$ в среде Simulink

в) Построить графики функции ошибки ε в САУ с компенсирующим устройством $W_{k2}(s)$ (рисунок 2.6), рассчитанным согласно пункту г) программы теоретической подготовки, при воздействии на нее возмущения $M_n(t)$ вида $1(t)$ и t . Задающее воздействие $U_{зад}(t)$ принять равным нулю. Компенсирующее звено $W_{k2}(s)$ имеет вид (16). Передаточная функция компенсирующего устройства $W_{k2}(s)$ комбинированной САУ была определена из условия частичной инвариантности - равенства нулю статической ошибки по возмущению.

В соответствии с приведенной на рисунке 2.6 структурой в среде Simulink строится модель такой системы (рисунок 2.9). По графику решения определяется значение установившейся ошибки ε (значение ординаты переходного процесса при котором он перестает изменяться, то есть устанавливается). Если передаточная функция компенсирующего звена $W_{k2}(s)$ задана верно, то выполняется частичная компенсация возмущения $M_n(t)$ и установившаяся ошибка ε при возмущении $M_n(t)=1(t)$ будет равна нулю (то есть будет равна нулю статическая ошибка ε_0), а при возмущении $M_n(t)=t$ она не будет равна нулю.

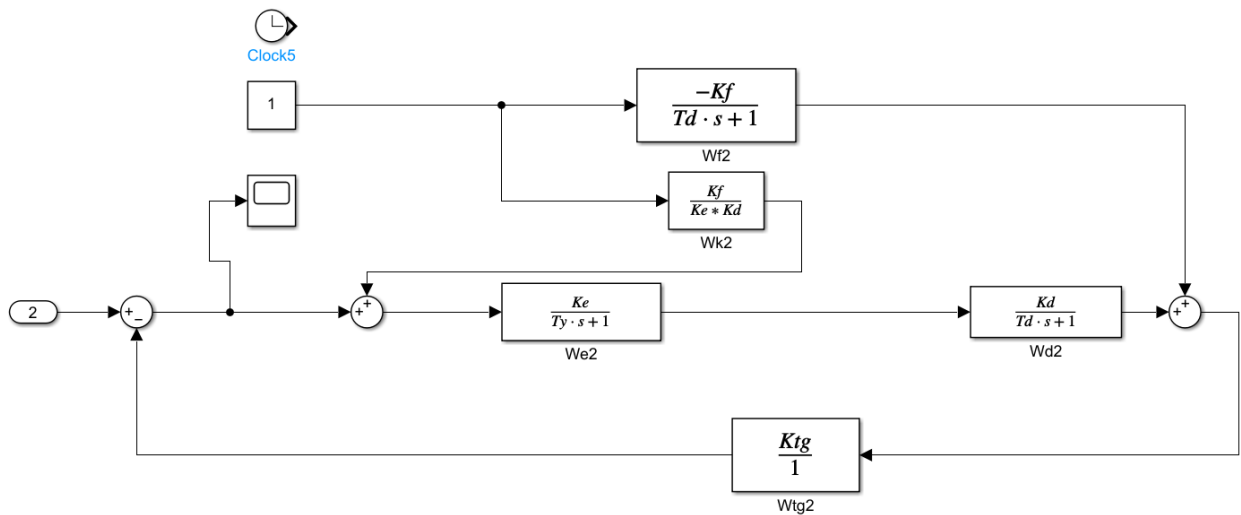


Рисунок 2.9 – Модель в среде Simulink исследуемой САУ со звеном $W_{k2}(s)$, компенсирующим статическую ошибку

г) Построить графики функции ошибки ε в САУ с компенсирующим устройством $W_{k2}(s)$ (рисунок 2.6), рассчитанным согласно пункту д) программы теоретической подготовки, при воздействии на нее возмущения $M_n(t)$ вида $1(t)$, t , t^2 и $\sin(t)$. Задающее воздействие $U_{\text{зад}}(t)$ принять равным нулю. Компенсирующее звено $W_{k2}(s)$ имеет вид (6). Параметры этого звена определяются по формулам (23) и (24). Передаточная функция компенсирующего устройства $W_{k2}(s)$ комбинированной САУ была определена из условия частичной инвариантности - равенства нулю статической и скоростной ошибки по возмущению.

В соответствии с приведенной на рисунке 2.6 структурой в среде Simulink строится модель такой системы (рисунок 2.10). По графику решения определяется значение установившейся ошибки ε (значение ординаты переходного процесса при котором он перестает изменяться, то есть устанавливается). Если передаточная функция компенсирующего звена $W_{k2}(s)$ задана верно, то выполняется частичная компенсация возмущения $M_n(t)$. При этом установившаяся ошибка ε при возмущении $M_n(t)=1(t)$ будет равна нулю (то есть будет равна нулю статическая ошибка ε_0), при возмущении $M_n(t)=t$ она также будет равна нулю (то есть будут равны нулю статическая ε_0 и скоростная ε_1 ошибки), а при возмущениях $M_n(t)$ вида t^2 и $\sin(t)$ – не будет равна нулю.

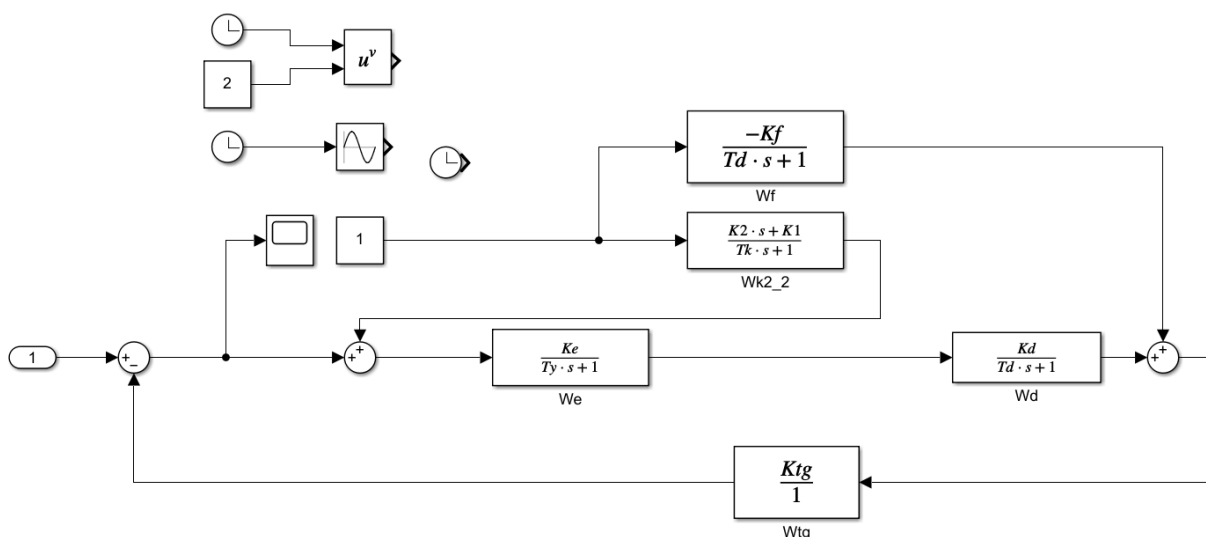


Рисунок 2.10 – Модель в среде Simulink исследуемой САУ со звеном $W_{k2}(s)$, компенсирующим статическую и скоростную ошибку

Графики процессов в исследуемой САУ комбинированного управления, построенные на экране монитора включаются в отчет по лабораторной работе.

Таблица 2.1 – Варианты индивидуальных заданий

№ вар.	Значения параметров передаточных функций исследуемой САУ					
	k_d	T_d, c	k_f	k_2	T_2, c	$k_{гг}$
1	2	0.8	0.5	4	0.2	0.2
2	3	0.6	0.6	3	0.15	0.3
3	4	0.3	0.4	2	0.25	0.4
4	5	0.7	0.7	3	0.3	0.5
5	6	0.2	0.5	4	0.2	0.6
6	3	0.6	0.4	5	0.35	0.7
7	2	0.3	0.6	5	0.25	0.9
8	4	0.1	0.8	2	0.15	0.6
9	8	0.3	0.4	3	0.2	0.4
10	2	0.5	0.6	5	0.17	0.1
11	7	0.4	0.5	1	0.19	0.3
12	4	0.3	0.7	2	0.27	0.5
13	2	0.6	0.6	3	0.3	0.8
14	9	0.8	0.4	4	0.22	0.3
15	11	0.7	0.5	5	0.33	0.9
16	7	0.5	0.7	6	0.2	0.2
17	5	0.3	0.6	7	0.3	0.5
18	8	0.1	0.5	8	0.1	0.8
19	14	0.4	0.4	9	0.4	0.4
20	3	0.6	0.7	10	0.2	0.4
21	15	0.8	0.6	11	0.3	0.1
22	19	0.3	0.5	12	0.2	0.3
23	12	0.6	0.7	13	0.35	0.7
24	9	0.1	0.4	14	0.25	0.5

№ вар.	Значения параметров передаточных функций исследуемой САУ					
	k_d	T_d, c	k_f	k_o	T_o, c	$k_{гг}$
25	8	0.7	0.5	15	0.2	0.8
26	5	0.4	0.6	3	0.3	0.4
27	8	0.6	0.4	4	0.22	0.7
28	12	0.3	0.5	5	0.28	0.9
29	5	0.8	0.2	3	0.23	0.2
30	8	0.1	0.6	7	0.45	0.5

2.5. Содержание отчета о выполнении лабораторной работы

Отчет должен содержать:

- Цель работы.
- Предмет исследования.
- Аналитическое исследование системы.
- Графики исследуемых процессов.
- Развернутые комментарии к полученным графикам и результатам.
- Краткие выводы.

2.6. Контрольные вопросы

- Что означает термин «астатическая система»?
- Как определить коэффициенты ошибки системы?
- Какие принципы управления вы знаете?
- В чем смысл комбинированного управления?
- Что означает термин «инвариантная система»?
- Что такое полная, частичная инвариантность?
- Как определить передаточную функцию компенсирующего устройства из условия полной или частичной инвариантности?
- Как вы понимаете условия физической реализуемости компенсирующих устройств?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОРНЕВОГО ГОДОГРАФА В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.1. Цель работы

Освоить применение метода корневого годографа для исследования и синтеза линейных САУ.

3.2. Теоретические сведения

О качестве процесса регулирования можно судить по расположению корней характеристического уравнения (т. е. полюсов передаточной функции замкнутой системы) [1, 2, 6], учитывая также еще и операторный многочлен в правой части дифференциального уравнения (т.е. нули передаточной функции замкнутой системы) [1, 2, 6].

Корневым годографом называется совокупность траекторий перемещения всех корней характеристического уравнения замкнутой системы при изменении какого-либо параметра этой системы (например, общего коэффициента усиления K разомкнутой цепи данной системы) [7].

Метод корневого годографа позволяет определить предельно возможное значение коэффициента усиления САУ, выделить область доминирующих полюсов САУ (ближе всего расположенных с левой стороны к началу координат плоскости корней) из условия обеспечения требуемых прямых показателей качества переходного процесса и др.

Пусть задана передаточная функция разомкнутой цепи САУ [7]. Запишем ее в виде

$$KW(s) = \frac{KN(s)}{L(s)}, \quad (1)$$

где K — общий коэффициент усиления разомкнутой цепи, а многочлены $N(s)$ и $L(s)$ имеют единичные коэффициенты при младших членах.

Передаточная функция замкнутой системы для регулируемой величины по задающему воздействию $g(s)$ имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{KW(s)}{1+KW(s)} = \frac{KN(s)}{L(s)+KN(s)}, \quad (2)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы запишется соответственно в форме

$$D(s) = L(s) + KN(s) = 0.$$

Его можно записать и иначе:

$$1 + KW(s) = 0,$$

или же

$$KW(s) = -1. \quad (3)$$

Эта форма записи характеристического уравнения замкнутой системы и используется в дальнейшем. Выражение (3) является **основным уравнением** метода корневого годографа [7].

Обозначим корни характеристического уравнения замкнутой системы: $s_1, s_2, \dots, s_n$; полюса передаточной функции разомкнутой цепи [корни $L(s)$]: $P_1, P_2, \dots, P_n$; нули передаточной функции разомкнутой цепи [корни $N(s)$]: $N_1, N_2, \dots, N_m$ ($m < n$). Нули и полюса передаточной функции разомкнутой цепи являются базовыми точками корневого годографа. Полюса называются точками выхода корневого годографа, а нули — точками входа.

Очевидно, величины P_i и N_q не зависят от K . Задача состоит в том, чтобы, зная расположение нулей $N_1, \dots, N_m$ и полюсов $P_1, \dots, P_n$ передаточной функции разомкнутой цепи $KW(s)$, найти корни характеристического уравнения $s_1, \dots, s_m$ как функции параметра K . Графически это и будет корневой годограф данной системы.

Корни характеристического уравнения являются полюсами передаточной функции замкнутой системы. Что же касается нулей этой функции, то согласно (2) нули замкнутой системы совпадают с заданными нулями разомкнутой цепи этой системы (1).

Преобразуем основное уравнение метода корневого годографа. Уравнение (3) распадается на два:
уравнение модулей

$$K|W(s)| = 1 \quad (4)$$

и уравнение фаз

$$\arg KW(s) = \pm(2v - 1)\pi \quad (v = 1, 2, \dots). \quad (5)$$

Можно записать

$$KW(s) = KC \frac{(s-N_1)(s-N_2)\dots(s-N_m)}{(s-P_1)(s-P_2)\dots(s-P_n)}, \quad (6)$$

где C — отношение коэффициентов при старших членах многочленов $N(s)$ и $L(s)$.

Подставим вместо s один из искомых корней характеристического уравнения s_k . На плоскости $s=\sigma+j\omega$ (рисунок 3.1) этот корень изобразится вектором s_k . Построим также векторы P_i ($i=1, 2, \dots, n$) и N_q ($q=1, 2, \dots, m$) полюсов и нулей функции $KW(s)$.

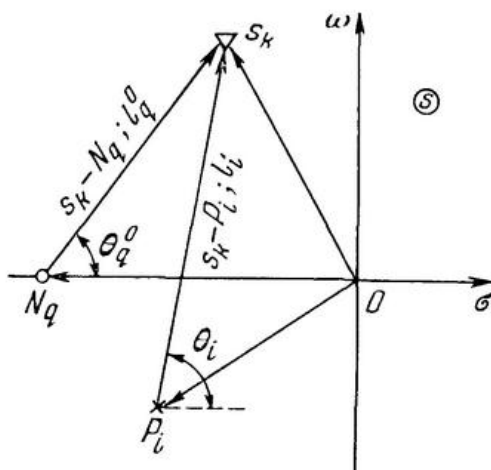


Рисунок 3.1

Полюса P_i будем обозначать крестиками, нули N_q — кружочками, а корни s_k — треугольниками. На рисунке 3.1 показаны также векторы величин s_k-N_q и s_k-P_i . Обозначим их аргументы соответственно через θ_q^o и θ_i , а модули: l_q^o и l_i .

Тогда уравнение фаз (5) с учетом выражения (6) можно переписать в виде

$$\sum_{q=1}^m \theta_q^o - \sum_{i=1}^n \theta_i = \pm(2v-1)\pi, \quad (7)$$

а уравнение модулей (4) с учетом (6) — в виде

$$K = \frac{1}{c} \cdot \frac{l_1 l_2 \dots l_n}{l_1^o l_2^o \dots l_m^o}. \quad (8)$$

Уравнение фаз (7) не зависит от K . Поэтому путь решения задачи может быть такой. Сначала следует подобрать на плоскости s такое положение s_k , которое бы удовлетворяло уравнению фаз (7) при всех заданных P_i и N_q . Потом по уравнению модулей (8) нужно подсчитать, какой величине параметра K это соответствует. Таким путем постепенно можно построить весь корневой годограф.

К основным свойствам корневого годографа относятся [1, 7];

1. Ветви корневого годографа начинаются в n полюсах разомкнутой системы при $K = 0$. При возрастании K от 0 до бесконечности полюса замкнутой системы двигаются по ветвям корневого годографа. При этом m из них приходит в m нулей разомкнутой системы (ограниченные ветви), а $(n-m)$ уходит в бесконечность вдоль асимптот (неограниченные ветви).

2. Все асимптоты неограниченных ветвей корневого годографа выходят из одного центра и под определенными углами.

3. Точка действительной оси плоскости корней может быть точкой корневого годографа, если справа от нее расположено нечетное число вещественных базовых точек (вещественных нулей и полюсов разомкнутой системы).

Существуют и другие свойства корневого годографа.

Рассмотрим пример [7]. Задана передаточная функция разомкнутой системы вида

$$KW(s) = \frac{K(\tau s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}.$$

Согласно (6) можно записать

$$KW(s) = KC \frac{(s - N_1)}{(s - P_1)(s - P_2)(s - P_3)(s - P_4)},$$

где $C = \frac{\tau}{T_1 T_2 T_3}$, $N_1 = \frac{1}{\tau}$, $P_1 = 0$, $P_2 = -\frac{1}{T_1}$, $P_3 = -\frac{1}{T_2}$, $P_4 = -\frac{1}{T_3}$.

Изобразим данные нули и полюса (рисунок 3.2). Заметим, что согласно (2) и (1) при $K=0$ все корни s_k совпадают с полюсами P_i . Далее же легко проверить, что уравнение фаз

$$\theta_1^0 - (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = \pm(2\nu - 1)180^\circ$$

будет удовлетворяться для корня s_1 , если он находится на оси между точками P_1 и N_1 ; для корня s_4 — если он лежит на оси левее точки P_4 . С увеличением K эти корни движутся как показано на рисунке 2 стрелками.

Что же касается корней s_2 и s_3 , то уравнение фаз удовлетворяется, когда они оба находятся на оси между точками P_2 и P_3 . С увеличением K они движутся навстречу друг другу. При некотором значении K они сливаются, а затем с увеличением K становятся комплексными (сопряженными) и движутся по некоторым кривым, точки которых определяются так, чтобы удовлетворялось уравнение фаз. Кривые эти симметричны, поскольку корни сопряженные (рисунок 3.2).

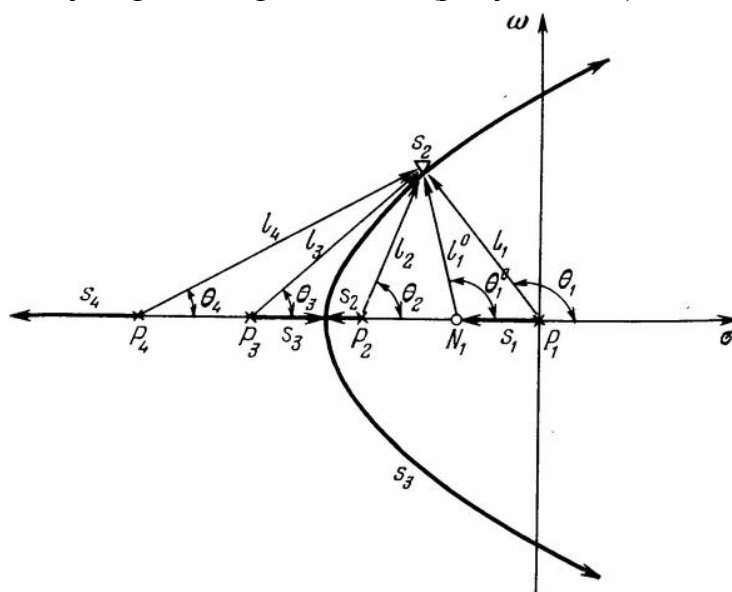


Рисунок 3.2

Величина K , отвечающая каждому конкретному положению корней, находится по уравнению модулей

$$K = \frac{1}{T_1 T_2 T_3} \cdot \frac{l_1 l_2 l_3 l_4}{l_1^0}.$$

Итак, траектории корней строятся только по уравнению фаз, а уравнение модулей используется затем для определения соответствующих значений K .

В указанном виде процесс построения будет довольно громоздким. Однако он очень упрощается при использовании общих свойств корневого годографа [1].

Проиллюстрируем на примере некоторые элементы синтеза корректирующих устройств с помощью метода корневого годографа [7].

Рассматривается САУ, охваченная единичной отрицательной обратной связью, прямая цепь которой содержит передаточную функцию объекта управления

$$KW_0(s) = \frac{K}{s(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (9)$$

и последовательного корректирующего устройства

$$\Pi(s) = \frac{\tau s + 1}{\beta \tau s + 1}. \quad (10)$$

Требуется выбрать коэффициент усиления K объекта (9) и параметры последовательного корректирующего устройства (10).

Рассмотрим два варианта:

- а) $\beta=0,1$ —устройство близко к дифференцирующему;
- б) $\beta=10$ — устройство близко к интегрирующему.

Изобразим сначала корневой годограф системы без коррекции. В передаточной функции (9) имеем полюса: $P_1 = 0$, $P_2 = -\frac{1}{T_1}$, $P_3 = -\frac{1}{T_2}$.

Корневой годограф показан на рисунке 3.3. В случае с коррекцией (10) получаем

$$KW(s) = \frac{K(\tau s + 1)}{s(T_1s+1)(T_2s+1)(\beta \tau s + 1)},$$

где добавляется еще один полюс и появляется один нуль:

$$P_1 = -\frac{1}{\beta \tau}, N_1 = -\frac{1}{\tau}. \quad (11)$$

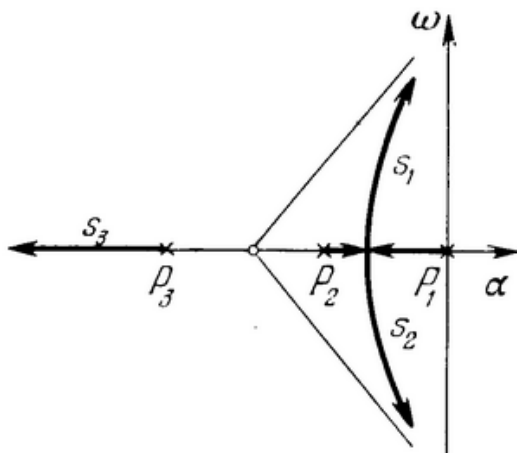


Рисунок 3.3

В первом случае ($\beta=0,1$) выберем τ так, чтобы нуль N_1 расположился вблизи доминирующих корней (рисунок 3.4). Поллюс P_4 расположится на десятикратном расстоянии влево, т. е. будет несущественным. Получаем новый корневой годограф (рисунок 3.4). Видно, что «опасные» комплексные корни значительно отодвинуты от мнимой оси, а влияние нового вещественного корня s_1 уменьшается наличием близко расположенного нуля N_1 .

Во втором случае ($\beta = 10$) новый полюс P_4 согласно (11) будет в десять раз ближе к началу координат, чем нуль N_1 . Следовательно, P_4 близок к нулю, а система становится близкой к дважды астатической, что увеличивает ее точность. Корневой годограф принимает вид, изображенный на рисунке 3.4.

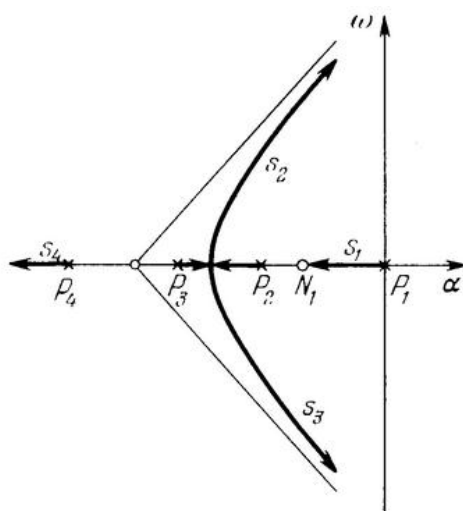


Рисунок 3.4

3.3. Порядок теоретической подготовки

Объектом исследований, выполняемых в лабораторной работе, является передаточная функция разомкнутой системы, охваченной единичной отрицательной обратной связью.

Программа теоретической подготовки:

а) Изучить метод корневого годографа и его применение.

б) Для заданной по варианту передаточной функции определить значения точек выхода и точек входа корневого годографа. Корневой годограф строится по общему коэффициенту усиления K прямой цепи САУ. Варианты исходных данных приведены в таблице 3.2. Номер варианта задания выдается преподавателем.

Определить базовые точки корневого годографа САУ можно вычислив нули (корни полинома числителя) и полюса (корни полинома знаменателя) заданной передаточной функции. Для этого воспользуемся программной средой MatLab [3]. Передаточную функцию зададим с помощью команды `tf`.

Ниже приводится пример кода программы MatLab для передаточной функции разомкнутой системы вида $\frac{K(T_1s+1)}{s(T^2s^2+2\zeta Ts+1)}$:

```

clc; clear all; close all;
% задание параметров передаточной функции САУ
T1=0.12;
T=0.3;
Ksi=0.4;
% ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ
s=tf('s');
W=(T1*s+1)/(s*(T^2*s^2+2*Ksi*T*s+1))
% Вычисление базовых точек выхода (корней полинома знаменателя передаточной
% функции) корневого годографа
pole(W)
% Вычисление базовых точек входа (корней полинома числителя передаточной
% функции) корневого годографа
zero(W)

```

Получаем следующий результат:

```

W =
      0.12 s + 1
-----
      0.09 s^3 + 0.24 s^2 + s
Continuous-time transfer function.

```

```

ans =

      0.0000 + 0.0000i
     -1.3333 + 3.0551i
     -1.3333 - 3.0551i

```

```

ans =

     -8.3333
>>

```

3.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

Выполнение расчетных операций при анализе САУ с помощью метода корневого годографа производится с использованием пакета программ научных и инженерных вычислений MatLab.

Программа экспериментальных исследований:

а) Построить корневой годограф и определить по нему все базовые точки, а также ограниченные и неограниченные ветви. Прокомментировать полученные результаты.

Для построения корневого годографа используется приложение SISO Design Tool системы MatLab пакета Simulink, которое предназначено для синтеза корректирующих звеньев с помощью частотных характеристик или изменения полюсов/нулей передаточной функции. Это приложение основано на применении LTI Viewer, которое входит в пакет Control System и запускается из окна Launch Pad (Панель запуска) основного окна MatLab. Для запуска необходимо двукратное нажатие на опции *Control System Toolbox* и выбор (двукратным нажатием) *SISO Design Tool*, после чего должен появиться основной экран этого приложения. Запуск GUI-интерфейса SISO-Design Tool также можно осуществить из основного окна MatLab командой `sisotool`.

В открывшемся окне Control System Designer выбираем инструмент CONTROL SYSTEM, нажимаем кнопку Edit Architecture и в выпадающем меню нажимаем на вкладку Edit Architecture (рисунок 3.5). Далее выбираем требуемую архитектуру исследуемой САУ (требуемую структурную схему). В нашей лабораторной работе исследуется САУ, охваченная единичной отрицательной обратной связью, в прямой цепи которой находится заданная передаточная функция, поэтому оставляем первую структуру (рисунок 3.6). Для загрузки данных (параметров передаточной функции) из рабочего пространства MatLab нажимаем на кнопку с зеленой стрелкой напротив буквы G в окне Block под выбранной структурой (рисунок 3.6). В открывшемся окне Import Data for G выбираем W и нажимаем кнопку Import (рисунок 3.6). Нажимаем кнопку OK и появляется окно Root Locus Editor for LoopTransfer_C с построенным корневым годографом (рисунок 3.7). Красные квадратики на ветвях годографа показывают местоположение корней характеристического уравнения при текущем значении коэффициента передачи K, который в выбранной структуре обозначается блоком C (параметром C). Значение текущего коэффициента передачи C можно посмотреть в разделе Preview на панели Data Browser, предварительно выбрав параметр C в разделе Controllers and Fixed Blocks (рисунок 3.7).

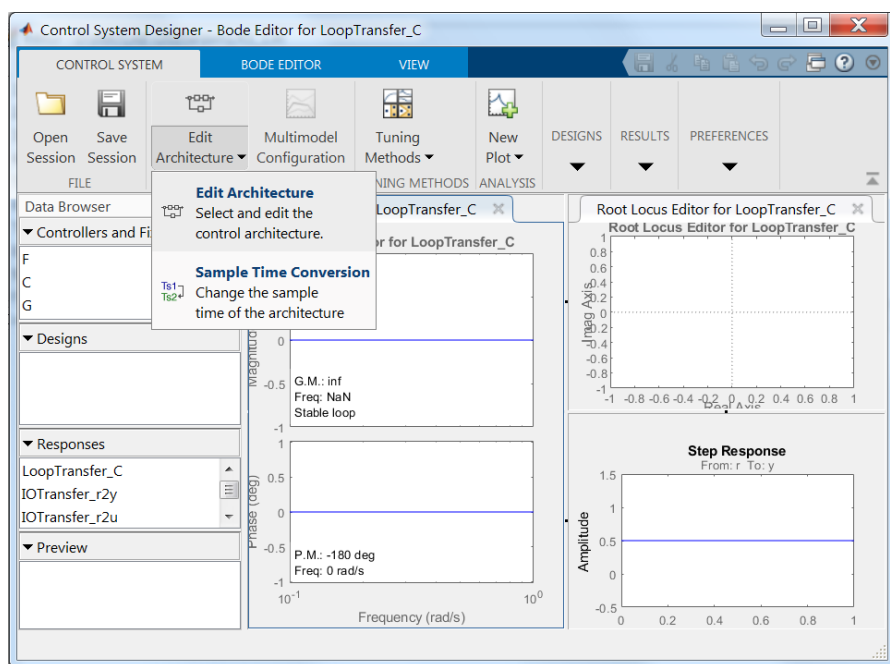


Рисунок 3.5 – Окно Control System Designer

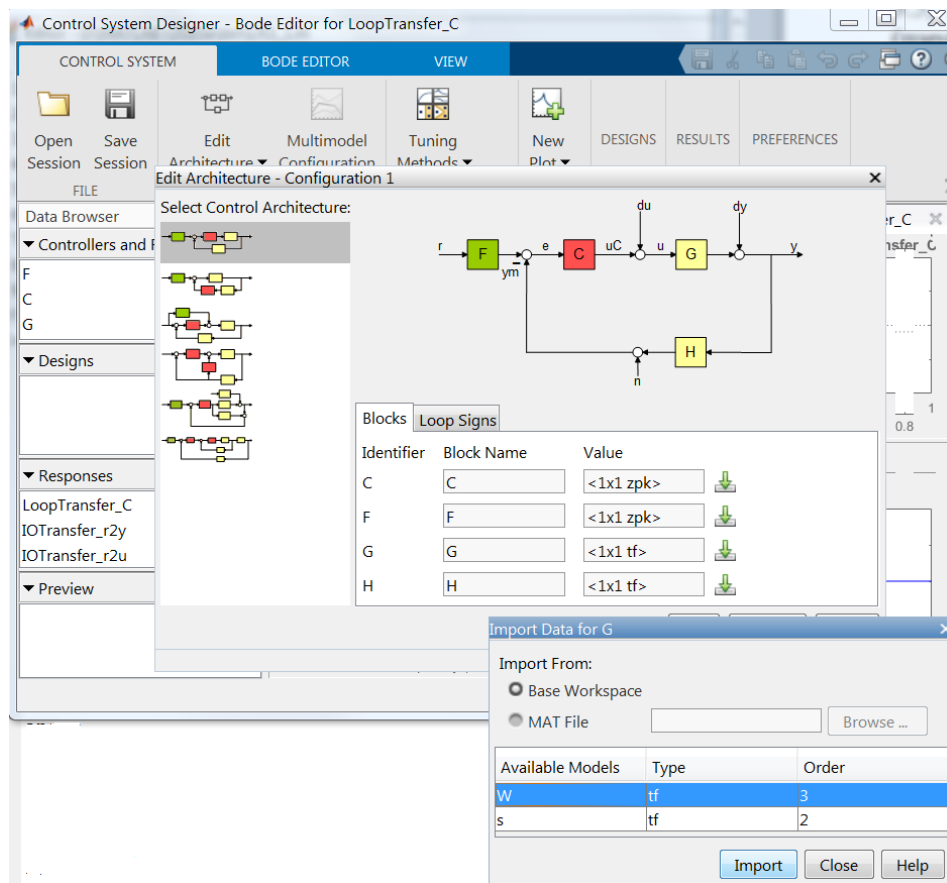


Рисунок 3.6 – Выбор структурной схемы для исследования

Двигая с помощью курсора мыши любой красный квадратик по ветви корневого годографа и наблюдая за изменением коэффициента передачи в разделе Preview мы находим все базовые точки. При C стремящемся к нулю красные квадратики будут находиться в базовых точках выхода, а при C стремящемся к бесконечности (достаточно большом) в базовых точках входа. Базовые точки на корневом годографе должны совпадать с полученными разделе 3.3. При этих действиях легко видеть ограниченные и неограниченные ветви корневого годографа.

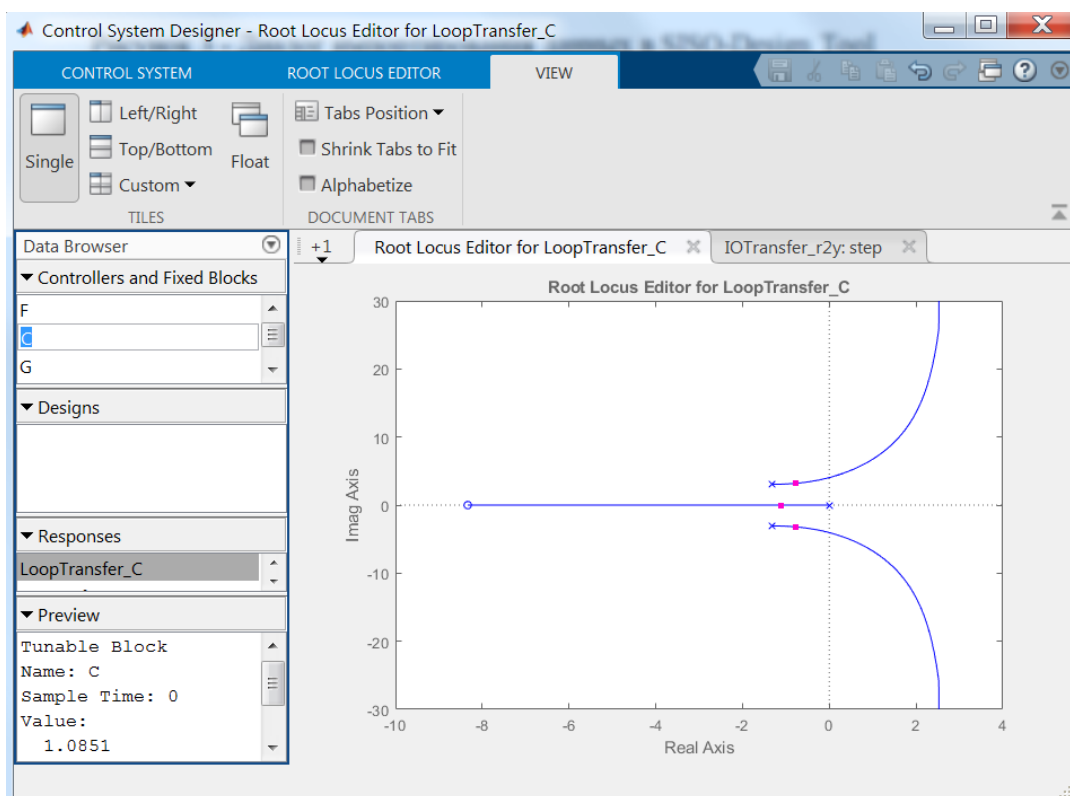


Рисунок 3.7 – Окно Control System Designer с построенным корневым годографом

б) Определить предельное значение коэффициента передачи K , при котором САУ выходит на границу устойчивости (какие-то корни из левой полуплоскости выходят на мнимую ось).

Перемещая красные квадратики в окне Root Locus Editor for LoopTransfer_C добиваемся того, чтобы какие-то из них попали на мнимую ось. Фиксируем предельное значение коэффициента передачи K из окна раздела Preview.

в) Определить влияние местоположения корней на прямые показатели качества переходного процесса. Прокомментировать полученные результаты, сделать выводы.

Подключаем окно Step Response, в котором отображаются графики переходных процессов. Перемещая красные квадратики в окне Root Locus Editor for LoopTransfer_C, наблюдаем за изменением прямых показателей качества переходного процесса, выделяем доминирующие и не доминирующие корни.

Таблица 3.1 – Варианты индивидуальных заданий

Тип передаточной функции	№ вар.	Значения параметров передаточной функции
$\frac{Ks}{(T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1)(T_1s + 1)}$	1	$T = 0.1, \zeta = 0.1, T_1 = 0.05$
	2	$T = 0.2, \zeta = 0.2, T_1 = 0.7$
	3	$T = 0.25, \zeta = 0.3, T_1 = 0.8$
	4	$T = 0.3, \zeta = 0.4, T_1 = 0.9$
	5	$T = 0.08, \zeta = 0.25, T_1 = 0.25$
	6	$T = 0.35, \zeta = 0.5, T_1 = 0.9$

Тип передаточной функции	№ вар.	Значения параметров передаточной функции
$\frac{K(T_1s + 1)}{s(T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1)}$	7	$T = 0.04, \zeta = 0.6, T_1 = 0.1$
	8	$T = 0.1, \zeta = 0.1, T_1 = 0.05$
	9	$T = 0.2, \zeta = 0.2, T_1 = 0.15$
	10	$T = 0.25, \zeta = 0.3, T_1 = 0.25$
	11	$T = 0.3, \zeta = 0.4, T_1 = 0.2$
	12	$T = 0.08, \zeta = 0.25, T_1 = 0.3$
	13	$T = 0.35, \zeta = 0.5, T_1 = 0.45$
	14	$T = 0.04, \zeta = 0.6, T_1 = 0.4$
$\frac{K(T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}$	15	$T = 0.1, \zeta = 0.1, T_1 = 0.05, T_2 = 0.2, T_3 = 0.7$
	16	$T = 0.2, \zeta = 0.2, T_1 = 0.15, T_2 = 0.4, T_3 = 0.8$
	17	$T = 0.25, \zeta = 0.3, T_1 = 0.25, T_2 = 0.6, T_3 = 0.9$
	18	$T = 0.3, \zeta = 0.4, T_1 = 0.2, T_2 = 0.05, T_3 = 1.0$
	19	$T = 0.08, \zeta = 0.25, T_1 = 0.3, T_2 = 0.8, T_3 = 1.5$
	20	$T = 0.35, \zeta = 0.5, T_1 = 0.45, T_2 = 1.1, T_3 = 2.0$
	21	$T = 0.04, \zeta = 0.6, T_1 = 0.4, T_2 = 0.7, T_3 = 1.5$
$\frac{K(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{s(T_3s + 1)(T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1)}$	22	$T = 0.1, \zeta = 0.1, T_1 = 0.05, T_2 = 0.2, T_3 = 0.7$
	23	$T = 0.2, \zeta = 0.2, T_1 = 0.15, T_2 = 0.4, T_3 = 0.8$
	24	$T = 0.25, \zeta = 0.3, T_1 = 0.25, T_2 = 0.6, T_3 = 0.9$
	25	$T = 0.3, \zeta = 0.4, T_1 = 0.2, T_2 = 0.05, T_3 = 1.0$
	26	$T = 0.08, \zeta = 0.25, T_1 = 0.3, T_2 = 0.8, T_3 = 1.5$
	27	$T = 0.35, \zeta = 0.5, T_1 = 0.45, T_2 = 1.1, T_3 = 2.0$
	28	$T = 0.04, \zeta = 0.6, T_1 = 0.4, T_2 = 0.7, T_3 = 1.5$

3.5. Содержание отчета о выполнении лабораторной работы

Отчет должен содержать:

Отчет должен содержать:

- Цель работы.
- Предмет исследования.
- Графики исследуемых процессов.
- Развернутые комментарии к полученным графикам и результатам.
- Краткие выводы.

3.6. Контрольные вопросы

- Дайте определение корневого годографа САУ.
- Как построить уравнение модулей корневого годографа?
- Как построить уравнение фаз корневого годографа?
- Какие ветви корневого годографа называются ограниченными?
- Какие ветви корневого годографа называются неограниченными?
- Какие точки корневого годографа называются базовыми?
- Какие точки корневого годографа называются точками выхода?
- Какие точки корневого годографа называются точками входа?
- Как связаны базовые точки корневого годографа с корнями характеристического уравнения замкнутой системы?
- Как определить углы наклона асимптот корневого годографа?

11. Что понимают под центром асимптот корневого годографа?
12. Как определить центр асимптот корневого годографа?
13. В каком случае точка действительной оси может быть точкой корневого годографа?
14. Как определить количество неограниченных ветвей корневого годографа?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ВЛИЯНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

4.1. Цель работы

Изучить влияние корректирующих устройств на статические и динамические характеристики САУ скорости вращения двигателя постоянного тока.

4.2. Теоретические сведения

Синтез корректирующих устройств САУ - одна из важнейших задач, изучаемых теорией автоматического управления [1, 5]. Эта задача является весьма сложной, неоднозначной, требующей творческого подхода при ее решении. Если многие важные задачи теории управления изучаются и другими науками, то задача синтеза - это задача, собственно, теории управления. Указанная задача должна учитывать особенности работы конкретных систем управления, их конструкции, технические характеристики и т.п.

Рассматриваемую задачу решает, как правило, большой коллектив разработчиков: специалисты по отдельным элементам систем; специалисты, изучающие объект управления и строящие его математическую модель; математики (специалисты по численным методам) и др.

Проблема синтеза корректирующих устройств в большинстве случаев точно не решается. Даже если можно построить алгоритм нахождения точного решения, то такой алгоритм интересен лишь с точки зрения выявления тех трудностей, которые необходимо преодолеть при решении задачи.

При решении сложных инженерных задач общую задачу синтеза регуляторов часто рассматривают как совокупность частных задач, которые вытекают из проектируемой системы и степени сложности задачи синтеза регулятора. К частным можно отнести следующие задачи:

- стабилизация объекта управления и повышение запаса устойчивости;
- обеспечение необходимой точности воспроизведения воздействий в установившемся режиме;
- обеспечение заданного качества в переходном режиме.

Решение указанных задач базируется на некоторых общих принципах. Эти общие принципы указывают пути достижения высокого качества работы САУ как в переходном, так и в установившемся режимах.

Изложим основные этапы решения задачи синтеза регуляторов, определяющие содержание этой сложной проблемы [1, 6].

1-й этап. Постановка технической задачи. На этом этапе постановка задачи делается в содержательных терминах. Ведется обсуждение с использованием таких понятий, как возможные режимы работы системы (установившийся или переходный), необходимая точность, ограничения, ориентировочное время работы системы и др. Формируется функциональная схема системы, рассматриваются энергетические вопросы, обсуждаются вопросы выбора типа исполнительных элементов и усилительных устройств и т.д.

2-й этап. Математическое описание технической задачи и ее постановка. На этом этапе строятся математические модели всех элементов, входящих в систему, выбирается структура регулятора и место его включения. Задается эталонная система или эталонный выходной сигнал. Выбирается критерий приближения к эталону.

3-й этап. Синтез регулятора. На 2-ом этапе была выбрана возможная структура регулятора. На 3-ем этапе решается задача синтеза регулятора, состоящая в расчете его параметров.

Методы синтеза можно условно разбить на две группы. Первая группа включает методы, в которых эталоном является выходной сигнал. При использовании этого подхода в качестве эталона чаще всего задается желаемая переходная характеристика, а параметры регулятора выбираются из следующего условия: реальная переходная характеристика системы должна возможно меньше, в известном смысле, отличаться от эталонной. Вторая группа методов использует понятие эталонного оператора. При этом подходе задача ставится так: надо подобрать параметры регулятора таким образом, чтобы оператор системы возможно меньше, в известном смысле, отличался от эталонного оператора.

4-й этап. Анализ полученного решения. Полученные на предыдущем этапе значения параметров регулятора подставляются в уравнения системы, и проводится ее анализ на предмет устойчивости. Если система устойчива, то строится ее переходная функция и другие характеристики, по которым проверяется соответствие скорректированной системы требованиям, сформулированным в техническом задании. Если система не удовлетворяет предъявленным требованиям, то необходимо вернуться ко второму и третьему этапам.

5-й этап. Аппаратная реализация регулятора. Результатом реализации этого этапа является принципиальная схема регулятора, построенная в соответствии с выбранной структурой и рассчитанными параметрами. Если предполагается реализация регулятора на базе специализированной ЭВМ, то формируются требования к ЭВМ, работающей в контуре САУ в реальном масштабе времени; строится алгоритмическое и программное обеспечение ЭВМ.

6-й этап. Испытания системы.

При проектировании регуляторов необходимо иметь в виду некоторые общие положения, которые могут облегчить решение конкретных задач. Можно указать следующие пути обеспечения заданного качества работы САУ в переходном и установившемся режимах:

- введение в прямую и обратную цепи системы дифференцирующих звеньев для обеспечения заданного качества работы в переходном режиме;

- введение в прямую цепь интеграторов для обеспечения заданной точности работы САУ в установившемся режиме;
- введение в прямую цепь усилителя с таким коэффициентом усиления, который рационально влиял бы на качество, как в переходном, так и в установившемся режимах.

Также имеют место и другие положения принципиального характера [1, 3, 6].

4.3. Порядок теоретической подготовки

В лабораторной работе исследуются характеристики САУ скорости вращения двигателя постоянного тока при использовании различных принципов коррекции этой системы [1, 2, 5, 6].

Функциональная схема исходной (нескорректированной) системы представлена на рисунке 4.1.

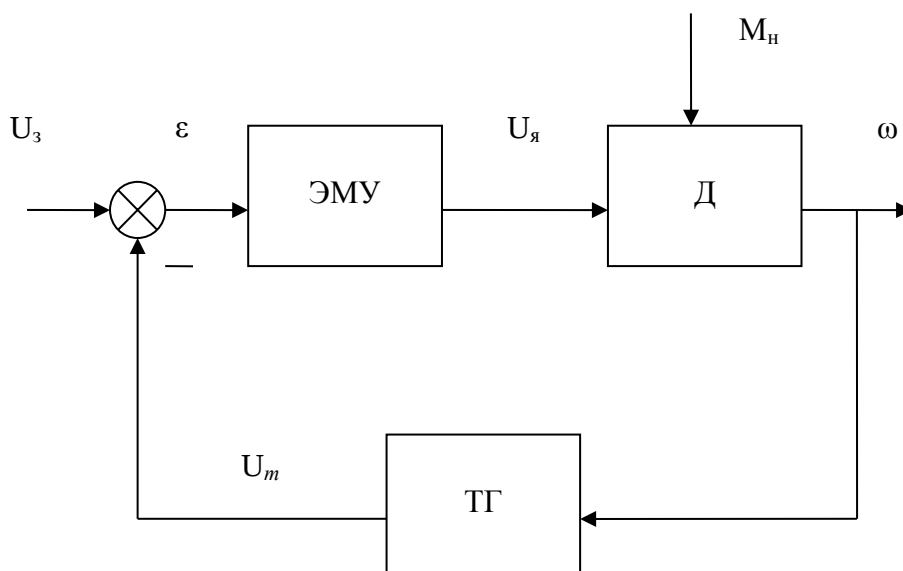


Рисунок 4.1 – Функциональная схема САУ скорости вращения двигателя постоянного тока

На рисунке 4.1 Д – двигатель постоянного тока (объект управления); ЭМУ – электронный усилитель; ТГ – тахогенератор; U_3 – задающее напряжение; ε – сигнал рассогласования (ошибка в системе); $U_я$ – управляющее напряжение в цепи якоря электродвигателя постоянного тока; M_n – момент нагрузки на валу двигателя (возмущающее воздействие); ω – угловая скорость вращения вала двигателя (регулируемая координата); U_m – напряжение тахогенератора.

Математическое описание системы, представленной на рисунке 4.1, задается системой уравнений (1).

$$\begin{cases} T_d \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = K_d U_{\text{я}}(t) - K_f M_{\text{н}}(t); \\ T_{\text{э}} \frac{dU_{\text{я}}(t)}{dt} + U_{\text{я}}(t) = K_{\text{э}} (U_{\text{з}}(t) - U_m(t)); \\ U_m(t) = K_{\text{мг}} \omega(t). \end{cases} \quad (1)$$

где T_d , $T_{\text{э}}$ – постоянные времени электродвигателя постоянного тока и электромагнитного усилителя соответственно;
 K_d , K_f – коэффициенты усиления (передачи) электродвигателя по управлению и возмущению соответственно;
 $K_{\text{э}}$, $K_{\text{мг}}$ – коэффициенты передачи электромагнитного усилителя и тахогенератора соответственно.

В целях улучшения статических и динамических характеристик исследуемой системы в ее состав вводится последовательное (рисунок 4.2) и параллельное (рисунок 4.3) корректирующее звено (КЗ).

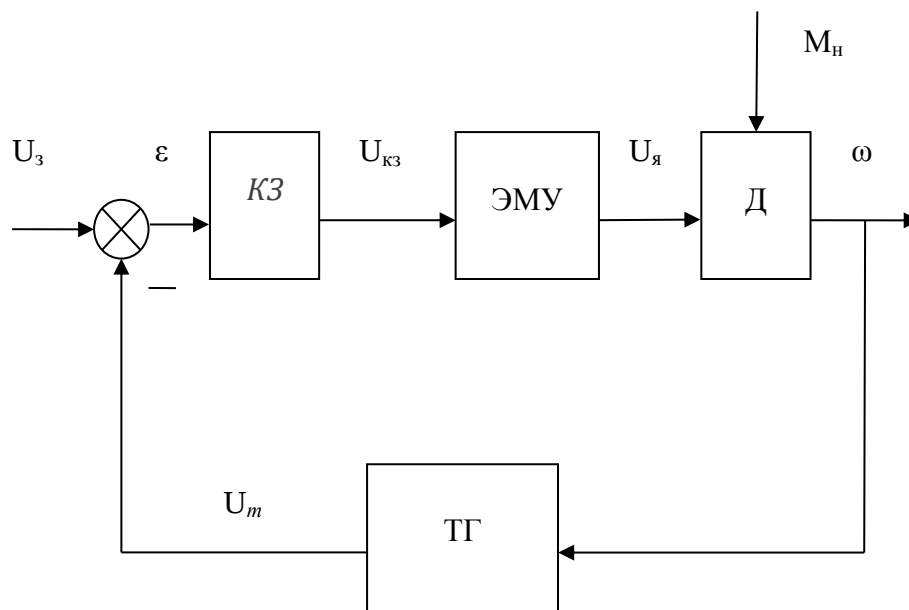


Рисунок 4.2 – Функциональная схема САУ скорости вращения двигателя постоянного тока с последовательным корректирующим устройством

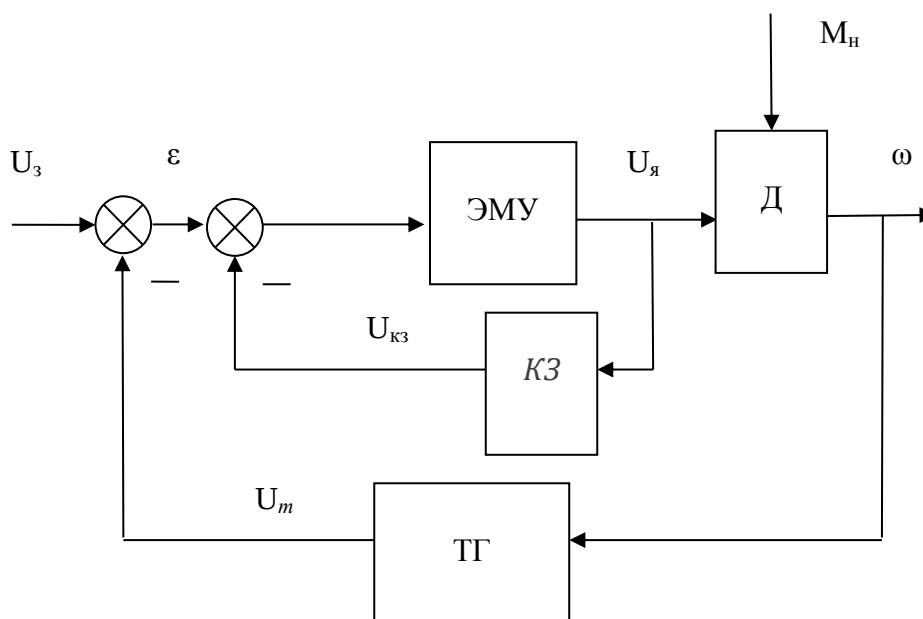


Рисунок 4.3 – Функциональная схема САУ скорости вращения двигателя постоянного тока с параллельным корректирующим устройством

В работе требуется исследовать влияние на устойчивость и качество САУ корректирующих звеньев с передаточными функциями вида:

- для последовательной коррекции $W_{кз1}(s) = \frac{K}{s}$, $W_{кз2}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1}$; (2)

- для параллельной коррекции $W_{кз3}(s) = K_{ос}$, $W_{кз4}(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1}$; (3)

Программа теоретических исследований:

- Изучить основные задачи и способы коррекции САУ.
- По уравнениям (1) получить передаточные функции элементов системы, представленной на рисунке 4.1 и построить ее структурную схему.

В качестве примера рассмотрим получение передаточной функции двигателя постоянного тока по первому уравнению системы (1). Применяв принцип суперпозиции, разбиваем это уравнение на два – по управлению и возмущению:

$$T_d \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = K_d U_{я}(t) \quad (4)$$

и

$$T_d \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = -K_f M_H(t).$$

Уравнение (4) запишем в операторном виде при нулевых начальных условиях:

$$T_d s \omega(s) + \omega(s) = K_d U_{я}(s), \Rightarrow$$

$$\omega(s)(T_d s + 1) = K_d U_{\text{я}}(s), \quad \Rightarrow$$

$$W_d(s) = \frac{\omega(s)}{U_{\text{я}}(s)} = \frac{K_d}{T_d s + 1}, \quad \Rightarrow$$

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}.$$

Для получения структурной схемы САУ необходимо в функциональной схеме на рисунке 4.1 заменить внутри блоков буквенные обозначения устройств на их, полученные по системе (1), передаточные функции.

в) Рассчитать установившееся значение переходной функции нескорректированной системы по задающему воздействию для заданного варианта. Численные значения параметров системы приведены в таблице 4.1. Номер варианта задания выдается преподавателем.

Для вычисления установившегося значения переходной функции необходимо по полученной структурной схеме нескорректированной САУ получить передаточную функцию замкнутой системы $\Phi(s)$. Тогда установившиеся значения переходных функций $h_{\text{уст}}$ определяется по формуле

$$h_{\text{уст}} = \Phi(0). \quad (5)$$

Установившееся значение переходного процесса можно найти, воспользовавшись программной средой MatLab [3].

Ниже приводится пример кода программы MatLab:

```
% задание параметров передаточных функций звеньев САУ
Kd=2;
Td=0.8;
Ke=4;
Te=0.2;
Ktg=0.2;
% ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ
s=tf('s');
% Передаточная функция электронного усилителя
We=Ke/(Te*s+1)
% Передаточная функция двигателя постоянного тока
Wd=Kd/(Td*s+1)
% Передаточная функция тахогенератора
Wtg=Ktg
% Получение передаточной функции замкнутой системы
F=(We*Wd)/(1+We*Wd*Wtg);
% Упрощение передаточной функции замкнутой системы
Ff=minreal(F)
% ВЫЧИСЛЕНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ЗНАЧЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА
% Выделение полинома числителя передат. функции замкнутой САУ
b=F.num{1};
% Выделение полинома знаменателя передат. функции замкнутой САУ
```

```

a=F.den{1};
% Вычисление установившегося значения
s=0
b1=polyval(b,s);
a1=polyval(a,s);
Hust=b1/a1

```

Получаем следующий результат:

Hust =

3.0769

>>

г) Выполнить анализ устойчивости нескорректированной САУ.

Выполнить анализ устойчивости САУ можно, например, вычислив корни характеристического уравнения (полюса передаточной функции замкнутой системы $\Phi(s)$). Для этого воспользуемся программной средой MatLab [3].

Ниже приводится пример кода программы MatLab:

```

% задание параметров передаточных функций звеньев САУ
Kd=2;
Td=0.8;
Ke=4;
Te=0.2;
Ktg=0.2;
% ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ
s=tf('s');
% Передаточная функция электронного усилителя
We=Ke/(Te*s+1)
% Передаточная функция двигателя постоянного тока
Wd=Kd/(Td*s+1)
% Передаточная функция тахогенератора
Wtg=Ktg
% Получение передаточной функции замкнутой системы
F=(We*Wd)/(1+We*Wd*Wtg);
% Упрощение передаточной функции замкнутой системы
Ff=minreal(F)
% Вычисление корней характеристического полинома (полинома знаменателя)
% замкнутой системы для анализа устойчивости
pole(Ff)

```

Получаем следующий результат:

ans =

-3.1250 + 2.5464i
-3.1250 - 2.5464i

>>

Все полученные корни имеют отрицательную действительную часть (находятся в левой полуплоскости комплексной плоскости). Это говорит о том, что исследуемая система является устойчивой.

д) Выполнить анализ устойчивости САУ (рисунок 4.2) с последовательными корректирующими звеньями (2). Численные значения параметров корректирующих звеньев (2) приведены в таблице 4.2.

е) Выполнить анализ устойчивости САУ (рисунок 4.3) с параллельными корректирующими звеньями (3). Численные значения параметров корректирующих звеньев (3) приведены в таблице 4.2.

ж) Рассчитать установившиеся значения переходных функций системы по задающему воздействию с корректирующими звеньями вида (2) и (3) для заданного варианта численных значений параметров.

Для вычисления установившихся значений переходных функций необходимо по полученным структурным схемам САУ с корректирующими звеньями получить их замкнутые передаточные функции $\Phi(s)$. Тогда установившиеся значения переходных характеристик определяются по формуле (5).

Пункты б), в), г), д), е) и ж) теоретической части работы необходимо выполнить в форме предварительного отчета по лабораторной работе.

4.4. Порядок выполнения экспериментальных исследований

а) Построить единичную переходную функцию нескорректированной САУ (рисунок 4.1) по управлению для регулируемого выхода ω и ошибки ε . По построенному графику для выхода ω определить прямые показатели качества и установившееся значение переходного процесса. Сравнить полученное установившееся значение с рассчитанным теоретически. По графику для ошибки определить значение установившейся ошибки. Сделать выводы.

Процессы в исследуемой САУ можно построить, например, с помощью подсистемы Simulink пакета MATLAB. В соответствии с приведенной на рисунке 4.1 структурой в среде Simulink модель такой системы может иметь вид, изображенный на рисунке 4.4. Для этой модели в рабочем пространстве окна Matlab задаются параметры САУ:

```
>> % задание параметров передаточных функций звеньев САУ
Kd=2
Td=0.8
Ke=4
Te=0.2
Ktg=0.2
```

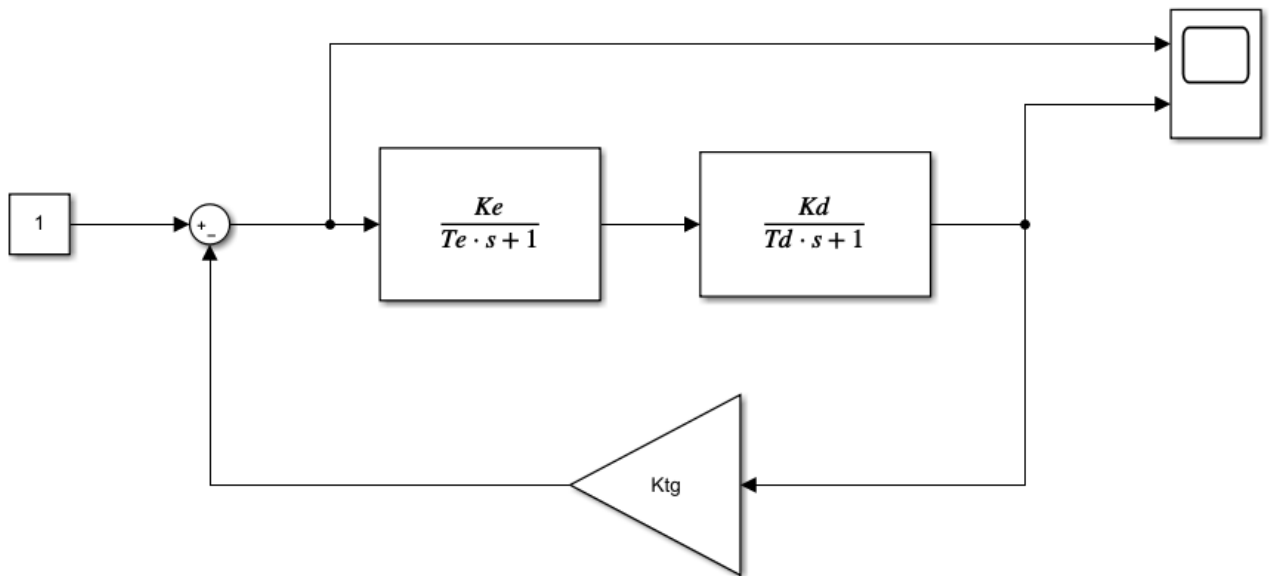


Рисунок 4.4 – Модель нескорректированной САУ в среде Simulink

б) Построить графики переходных процессов в САУ (рисунок 4.2) с последовательным корректирующим звеном $W_{кз1}(s)$ по управлению для регулируемого выхода ω и ошибки ε при базовом значении параметра K , взятом из таблицы 4.2, а также при значениях параметра K больших и меньших базового. Определить по ним для выхода ω прямые показатели качества и установившиеся значения. По графикам для ошибки определить значения установившейся ошибки. Выявить влияние параметра K на статические и динамические характеристики корректируемой САУ, а также на установившуюся ошибку. Дать развернутые комментарии к полученным графикам и результатам, сделать выводы.

в) Построить графики переходных процессов в САУ (рисунок 4.2) с последовательным корректирующим звеном $W_{кз2}(s)$ по управлению для регулируемого выхода ω и ошибки ε при базовом значении параметра T_1 , взятом из таблицы 4.2, а также при значениях параметра T_1 больших и меньших базового. Определить по ним для выхода ω прямые показатели качества и установившиеся значения. По графикам для ошибки определить значения установившейся ошибки. Выявить влияние параметра T_1 на статические и динамические характеристики корректируемой САУ, а также на установившуюся ошибку. Дать развернутые комментарии к полученным графикам и результатам, сделать выводы.

г) Построить графики переходных процессов в САУ (рисунок 4.3) с параллельным корректирующим звеном $W_{кз3}(s)$ по управлению для регулируемого выхода ω и ошибки ε при базовом значении параметра K_{oc} , взятом из таблицы 4.2, а также при значениях параметра K_{oc} больших и меньших базового. Определить по ним для выхода ω прямые показатели качества и установившиеся значения. По графикам для ошибки определить значения установившейся ошибки. Выявить влияние параметра K_{oc} на статические и динамические характеристики корректируемой САУ, а также на установившуюся ошибку. Дать развернутые комментарии к полученным графикам и результатам, сделать выводы.

д) Построить графики переходных процессов в САУ (рисунок 4.3) с параллельным корректирующим звеном $W_{кз4}(s)$ по управлению для регулируемого выхода ω и ошибки ε при базовом значении параметра T_2 , взятом из таблицы 4.2, а также при значениях параметра T_2 больших и меньших базового. Определить по ним для выхода ω прямые показатели качества и установившиеся значения. По графикам для ошибки определить значения установившейся ошибки. Выявить влияние параметра T_2 на статические и динамические характеристики корректируемой САУ, а также на установившуюся ошибку. Дать развернутые комментарии к полученным графикам и результатам, сделать выводы.

Графики процессов в исследуемой САУ, построенные на экране монитора, включаются в отчет по лабораторной работе.

Таблица 4.1 – Значения параметров нескорректированной системы

№ вар.	K_{mg}	K_d	T_d	K_3	T_3
1	0.8	2	0.5	5	0.3
2	0.5	3	0.3	7	0.2
3	0.7	5	0.2	10	0.1
4	0.6	7	0.4	6	0.5
5	0.4	9	0.5	4	0.6
6	0.9	12	0.3	6	0.3
7	0.8	15	0.2	5	0.4
8	0.5	11	0.4	3	0.5
9	0.7	7	0.5	8	0.4
10	0.4	9	0.3	4	0.7
11	0.6	3	0.2	3	0.2
12	0.3	4	0.4	7	0.3
13	0.4	6	0.5	8	0.4
14	0.8	2	0.3	5	0.2
15	0.2	8	0.2	9	0.3
16	0.9	6	0.4	6	0.2
17	4	11	0.5	11	0.1
18	7	18	0.3	10	0.5
19	9	21	0.2	7	0.6
20	5	11	0.4	4	0.3
21	0.9	14	0.5	3	0.2
22	0.7	16	0.3	9	0.1
23	3	9	0.2	15	0.5
24	1	7	0.4	11	0.6
25	0.5	5	0.5	12	0.3
26	0.6	3	0.2	3	0.1
27	0.3	4	0.4	7	0.2
28	0.4	6	0.5	8	0.3
29	0.8	2	0.3	5	0.5
30	0.2	8	0.2	9	0.4

Таблица 4.2 – Значения параметров корректирующих звеньев

№ вар.	K	K_1	T_1	K_{oc}	K_2	T_2
1	5	0.3	0.3	0.5	7	0.3
2	6	0.4	0.2	0.4	9	0.2
3	7	0.5	0.1	0.3	5	0.1
4	8	0.6	0.4	0.6	15	0.4
5	9	0.7	0.5	0.5	12	0.5
6	10	0.8	0.2	0.7	11	0.2
7	11	0.9	0.3	0.9	6	0.3
8	12	0.3	0.5	0.6	8	0.5
9	13	0.4	0.7	0.3	3	0.7
10	14	0.5	0.1	0.1	9	0.1
11	15	0.6	0.05	0.8	5	0.05
12	16	0.7	0.07	0.5	7	0.07
13	17	0.8	0.09	0.3	1	0.09
14	18	0.9	0.08	0.2	3	0.08
15	19	0.3	0.1	0.4	9	0.1
16	20	0.4	0.3	0.6	6	0.3
17	21	0.5	0.4	0.7	3	0.4
18	22	0.6	0.2	0.2	4	0.2
19	23	0.7	0.1	0.1	17	0.1
20	24	0.8	0.5	0.5	12	0.5
21	25	0.9	0.2	0.4	18	0.2
22	26	0.8	0.3	0.3	15	0.3
23	27	0.7	0.5	0.7	11	0.5
24	28	0.6	0.1	0.3	1	0.1
25	29	0.5	0.2	0.4	2	0.2
26	13	0.4	0.7	0.3	3	0.7
27	14	0.5	0.1	0.1	9	0.1
28	15	0.6	0.05	0.8	5	0.03
29	16	0.7	0.07	0.5	7	0.02
30	17	0.8	0.09	0.3	1	0.05

4.5. Содержание отчета о выполнении лабораторной работы

Отчет должен содержать:

- а) Цель работы.
- б) Предмет исследования.
- в) Аналитическое исследование системы.
- г) Графики исследуемых процессов.
- д) Развернутые комментарии к полученным графикам и результатам.
- к) Краткие выводы.

4.6. Контрольные вопросы

1. Каково назначение корректирующих устройств?
2. С помощью каких корректирующих звеньев можно решать задачи стабилизации и точности системы регулирования?

3. Как сделать систему астатической по возмущению (управлению)?
4. Как повысить быстродействие системы?
5. Что такое жесткая, гибкая, положительная, отрицательная, идеальная, реальная обратные связи?
6. Чем определяется вид и место включения корректирующего устройства?
7. Что такое закон управления (регулирования)?
8. Какие вида законов регулирования вы знаете?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

5.1. Цель работы

Изучить влияние типовых законов управления (параметров настройки ПИД-регулятора) на статические и динамические характеристики САУ скорости вращения двигателя постоянного тока.

5.2. Теоретические сведения

Наиболее популярным типом применяемых в промышленности регуляторов в системах управления замкнутыми системами можно считать ПИД-регуляторы. И если структуру и принцип действия контроллера инженеры знают достаточно хорошо, то его настройка, т.е. расчет коэффициентов регулятора, до сих пор является проблемой. Существует большое количество литературы (например, [2, 4]), где объясняется настройка регуляторов.

Так как регуляторы реализуют только типовые законы регулирования, а объекты описываются типовыми передаточными функциями, то и расчет параметров настроек регуляторов ведут из условия получения типовых переходных процессов.

Настройка параметров ПИД-регулятора может производиться, например, по методу Зиглера-Никольса, CHR и другим [1, 4, 6]. Однако расчет параметров по формулам не может дать оптимальной настройки регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основываются на сильно упрощенных моделях объекта. В частности, в них не учитывается всегда присутствующая нелинейность типа "ограничение" для управляющего воздействия. Кроме того, модели используют параметры, идентифицированные с некоторой погрешностью. Поэтому, после расчета параметров регулятора, желательно сделать его подстройку. Подстройку можно выполнить на основе правил, которые используются для ручной настройки. Эти правила получены из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов. Они сводятся к следующему [3]:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

В данной работе будет производиться исследование ПИД-регуляторов САУ с помощью автоматизированного способа настройки, основанного на таком инструменте среды Simulink, как подсистема Response Optimizer.

Рассмотрим линейную систему управления угловой скоростью двигателя постоянного тока, упрощенная структурная схема которой представлена на рисунке 5.1.

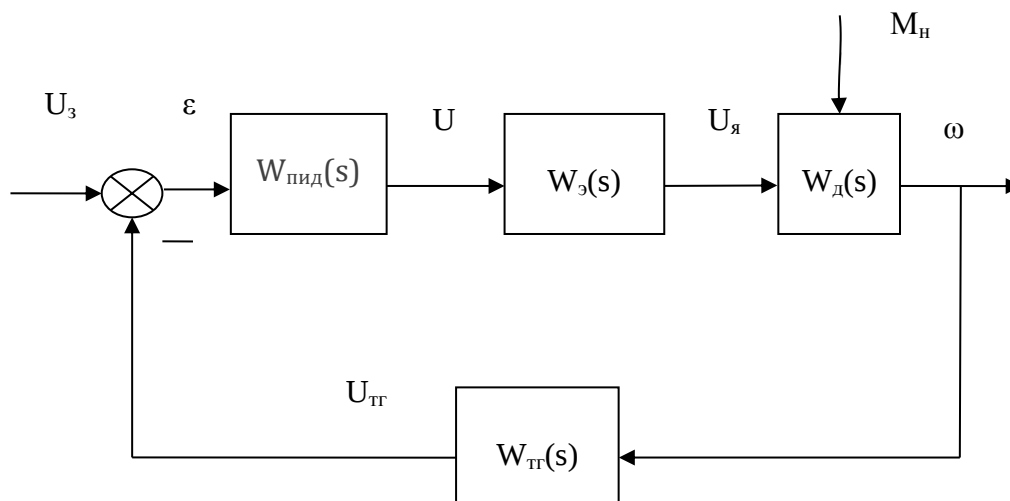


Рисунок 5.1 – Структурная схема САУ скорости вращения двигателя постоянного тока с ПИД-регулятором

На рисунке 5.1 $W_{\text{пид}}(s)$ – передаточная функция ПИД-регулятора; $W_{\text{э}}(s) = K_{\text{э}} / (T_{\text{э}}s + 1)$ – передаточная функция электронного усилителя мощности; $W_{\text{д}}(s) = K_{\text{дв}} / (T_{\text{дв}}s + 1)$ – передаточная функция двигателя постоянного тока по управляющему воздействию; $W_{\text{тг}}(s) = K_{\text{тг}}$ – передаточная функция тахогенератора; $U_{\text{зад}}$ – задающее напряжение; ε – сигнал рассогласования (ошибка в системе); U – управляющее напряжение на выходе ПИД-регулятора; $U_{\text{я}}$ – напряжение в цепи якоря электродвигателя постоянного тока; $M_{\text{н}}$ – момент нагрузки на валу двигателя (возмущающее воздействие); ω – угловая скорость вращения вала двигателя (регулируемая координата); $U_{\text{тг}}$ – напряжение тахогенератора.

В соответствии с приведенной структурой в среде Simulink была построена модель такой системы (рисунок 5.2).

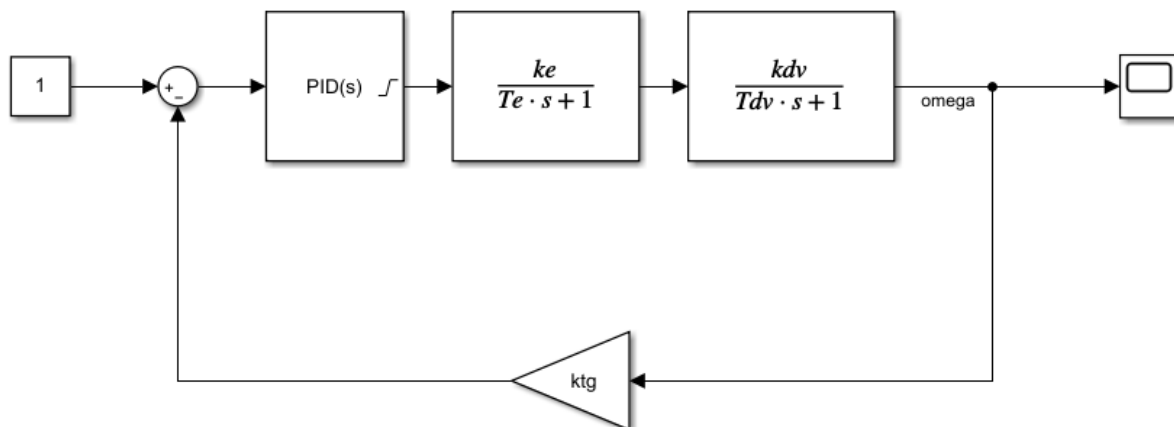


Рисунок 5.2 – Модель исследуемой САУ в среде Simulink

Параметры этой модели задаются в рабочем пространстве окна Matlab (рисунок 5.3).

```
>> kp=1;
>> ki=0;
>> kd=0;
>> ke=5;
>> Te=0.05;
>> kdv=10;
>> Tdv=0.2;
>> ktg=1;
>> n=50;
fx >>
```

Рисунок 5.3 – Задание параметров модели в рабочем пространстве Matlab

На рисунке 5.3 параметры k_p , k_i и k_d соответственно пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие ПИД-регулятора; k_e и T_e соответственно коэффициент передачи K_e и постоянная времени T_e электронного усилителя мощности; k_{dv} и T_{dv} соответственно коэффициент передачи K_{dv} и постоянная времени T_{dv} двигателя постоянного тока; k_{tg} – коэффициент передачи K_{tg} тахогенератора (датчика скорости); n – коэффициент фильтра 1-го порядка дифференциальной составляющей ПИД-регулятора, который вводится для поддержания качества процесса регулирования при воздействии высокочастотных помех.

Также производится первоначальная настройка ПИД-контроллера [7]. Настройка параметров осуществляется непосредственно в окне параметров блока PID Controller (рисунок 5.4), где мы записываем имена k_p , k_i , k_d и n настраиваемых переменных ПИД-регулятора.

Будем использовать ПИД-регулятор с параллельной структурой, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{\text{пид}}(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}, \quad (1)$$

где P – пропорциональная составляющая (составляющая П-закона регулирования);

I - интегральная составляющая (составляющая И-закона регулирования);

D - дифференциальная составляющая (составляющая Д-закона регулирования);

N - коэффициент фильтра 1-го порядка для подавления высокочастотных помех.

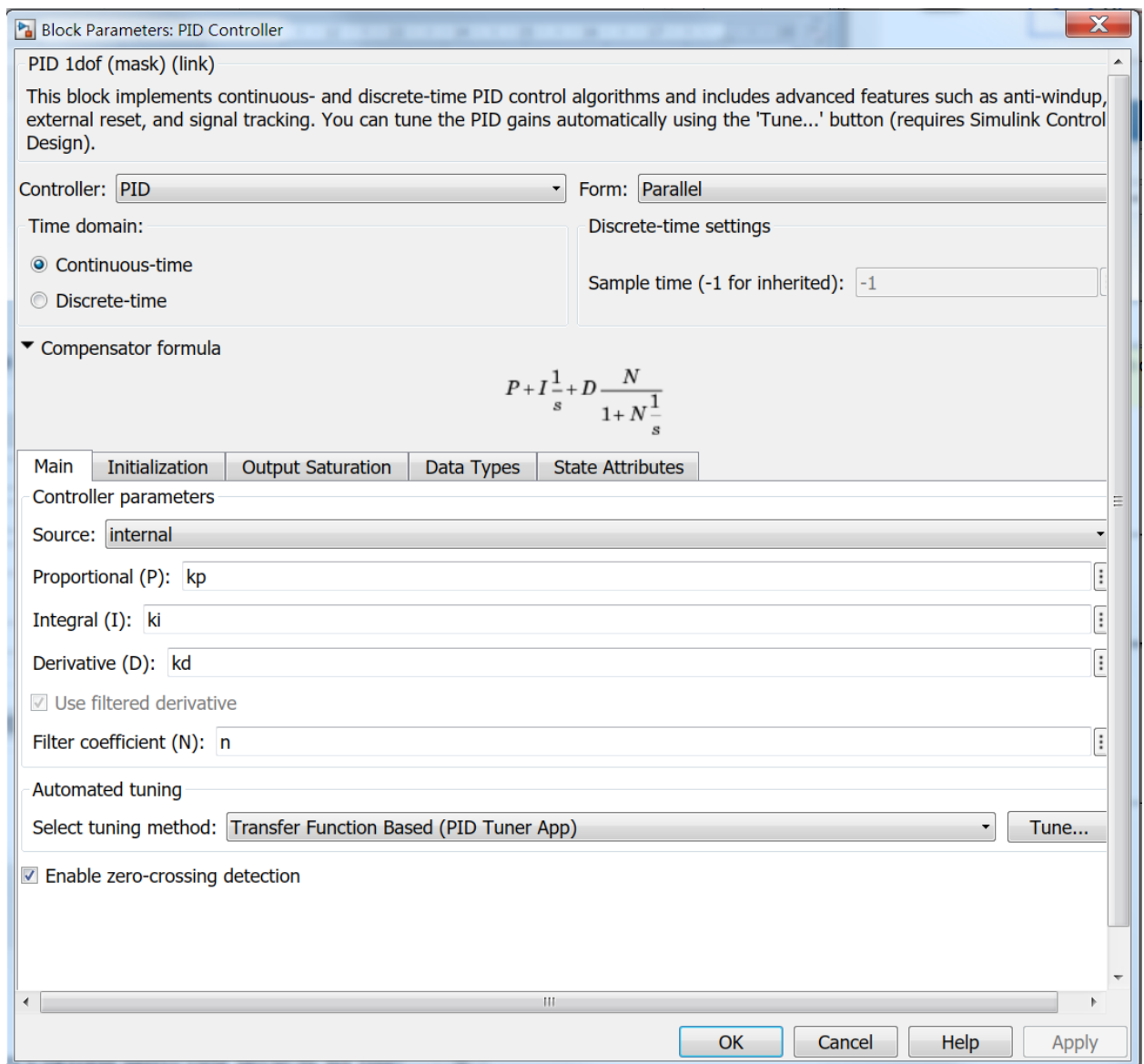


Рисунок 5.4 - Окно параметров блока PID Controller

Поскольку регулятор должен ограничивать напряжение, подаваемое на обмотку двигателя, до значения напряжения питания 24 и -24 В, то следует задать допустимый диапазон напряжений. Для этого:

1. Переходим во вкладку **Output Saturation** (рисунок 5.4).
2. Нажимаем на флаговую кнопку **Limit output**, в результате чего активируются поля для задания верхней (Upper limit) и нижней (Lower limit) границы диапазона выходной величины.
3. Устанавливаем границы диапазона.

Корректная работа блока регулятора в составе системы предполагает использования методов, направленных на борьбу с интегральным насыщением. В блоке реализованы два метода: back-calculation и clamping. Выбираем метод clamping. Выпадающее меню выбора метода расположено на панели **Anti-windup** вкладки **Output Saturation**.

В рассматриваемом случае запишем значения 24 и -24 В поля **Upper limit** и **Lower limit** соответственно, а также используем метод clamping для исключения интегрального насыщения.

Перед оптимальной настройкой параметров ПИД-регулятора запустим Simulink-модель на расчет, приняв передаточную функцию регулятора $W_{\text{пид}}(s)=1$. Передаточная функция регулятора равна 1, так как значения интегрального параметра k_i и дифференциального параметра k_d равны 0, а значение пропорционального параметра k_p равно 1 (рисунок 5.3). Результат моделирования при отработке входного сигнала показан на рисунке 5.5.

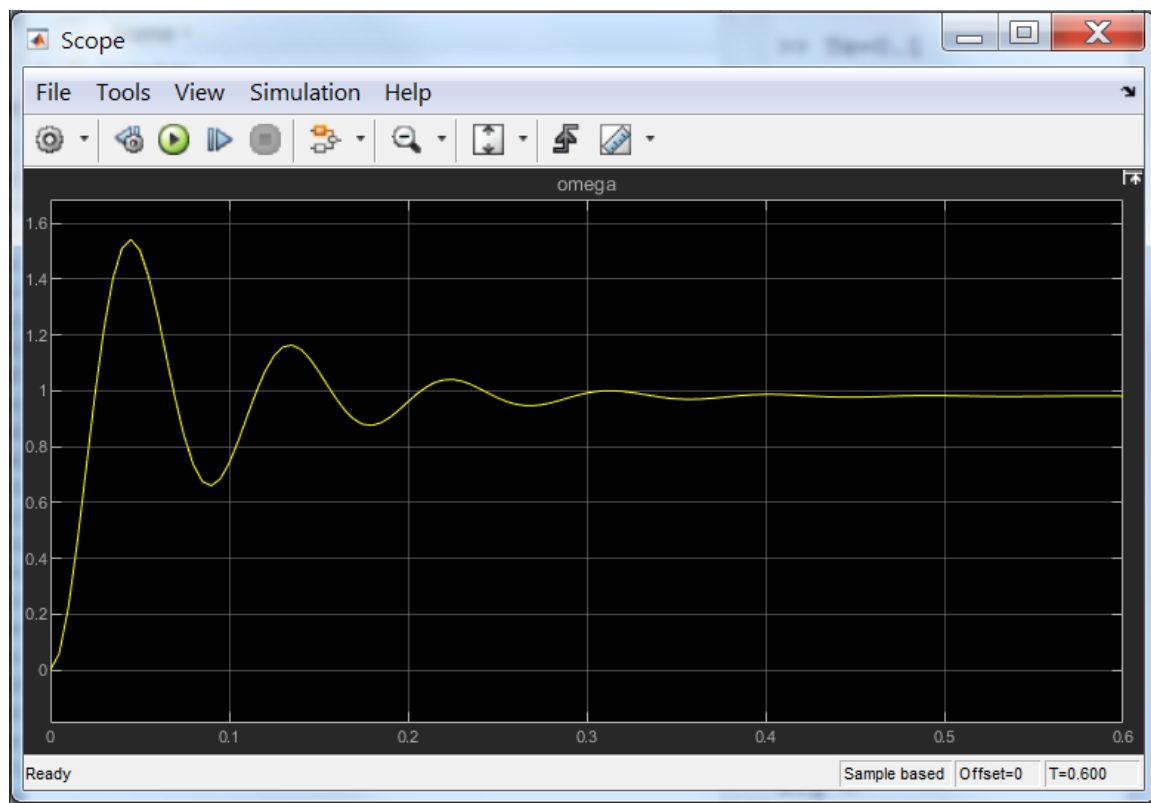


Рисунок 5.5 - Результат моделирования при начальных значениях параметров ПИД-регулятора

Из анализа приведенного графика видно, что:

- выходная координата системы управления не достигает заданного значения 1, т.е. в системе присутствует статическая ошибка;
- перерегулирование слишком большое (больше 50%);
- время регулирования также требует коррекции в сторону уменьшения.

Произведем настройку контроллера, обеспечивающую требуемое качество работы системы.

Пусть реакция системы на единичный импульс должна соответствовать следующим требованиям:

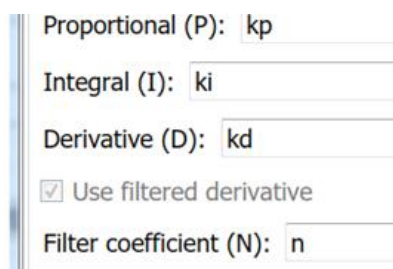
- перерегулирование (Overshoot) не более 10%,
- время нарастания (Rise time) менее чем 0.1 с,
- время переходного процесса (Settling time) менее чем 0.3 с.

Приложение [Response Optimizer](#) располагается во вкладке **APPS** окна модели Simulink, в разделе **CONTROL SYSTEMS**.

Поскольку инструмент использует численные методы оптимизации, то расчет модели будет выполняться многократно. Поэтому перед настройкой в блоке **SIMULATE** окна модели активируем опцию **Fast Restart** для уменьшения времени, затрачиваемого на эти действия.

Настройка регулятора осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом [7]:

1. Создаем MATLAB переменные, соответствующие параметрам регулятора, в окне Model Explorer вкладки MODELING модели Simulink и присваиваем их значениям начальные приближения. В нашем случае они уже созданы в рабочем окне MATLAB (рисунок 5.3).
2. Записываем переменные в соответствующие поля в окне параметров блока PID Controller. В нашем случае они уже записаны (рисунок 5.4):



Proportional (P):

Integral (I):

Derivative (D):

☒ Use filtered derivative

Filter coefficient (N):

3. Открываем инструмент Response Optimizer (рисунок 5.6). Слева в разделе **Model Workspace** (или в разделе **MATLAB Workspace**) на панели **Data Browser** показаны созданные ранее переменные.
4. Определяем список оптимизируемых параметров. Для этого нажимаем на кнопку **None** редактируемого поля **Design Variables Set** (рисунок 5.6).

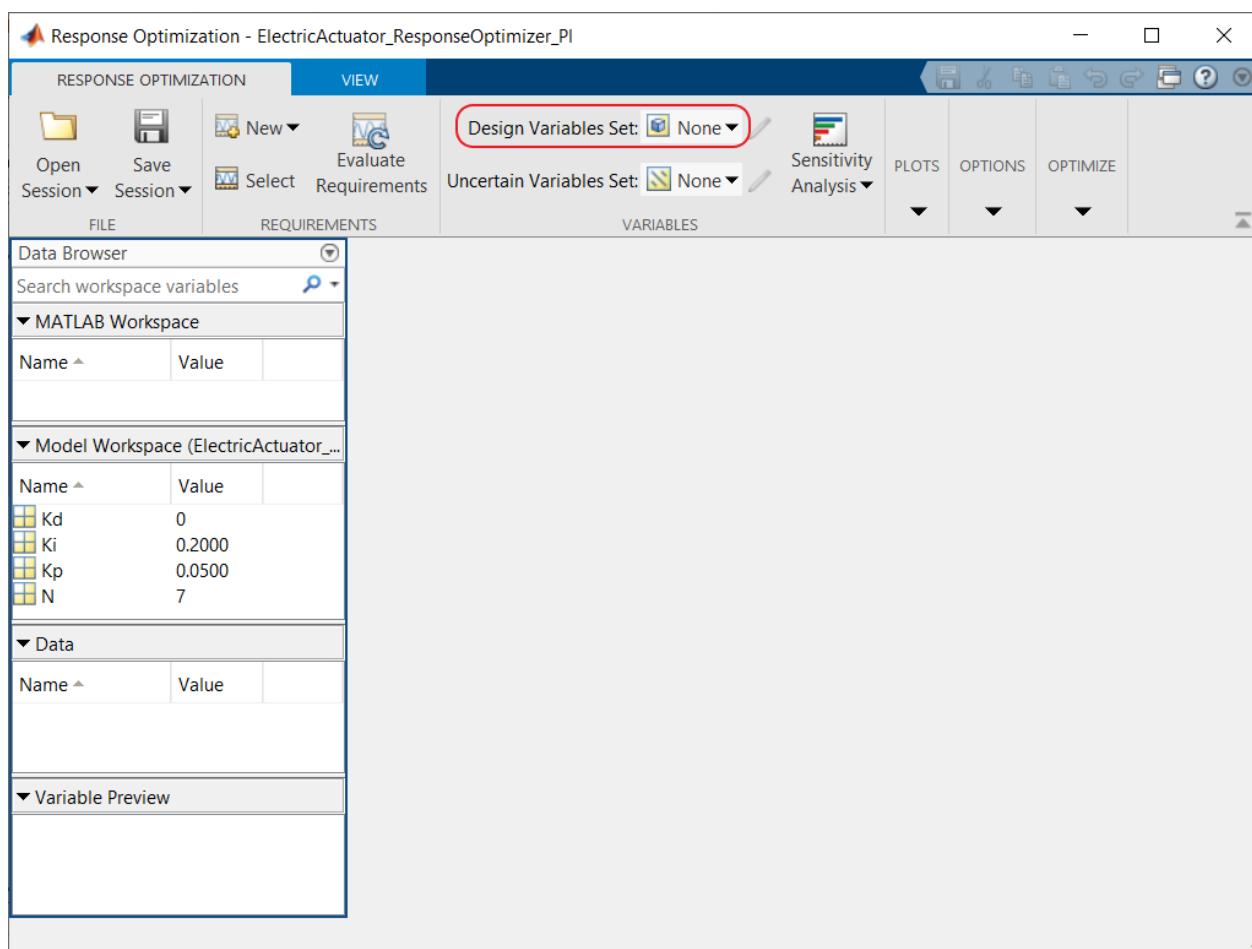


Рисунок 5.6 – Окно Response Optimizer

В выпадающем меню нажимаем **New...** В правом списке открывшегося окна Create Design Variables Set расположены переменные модели, а в левом — параметры для оптимизации. Выделяем переменные и нажимаем на кнопку со стрелкой, расположенной между двумя списками, для переноса их в левый список (рисунок 5.7).

Опционально можно указать границы диапазоны оптимизируемых параметров в столбцах Minimum и Maximum.

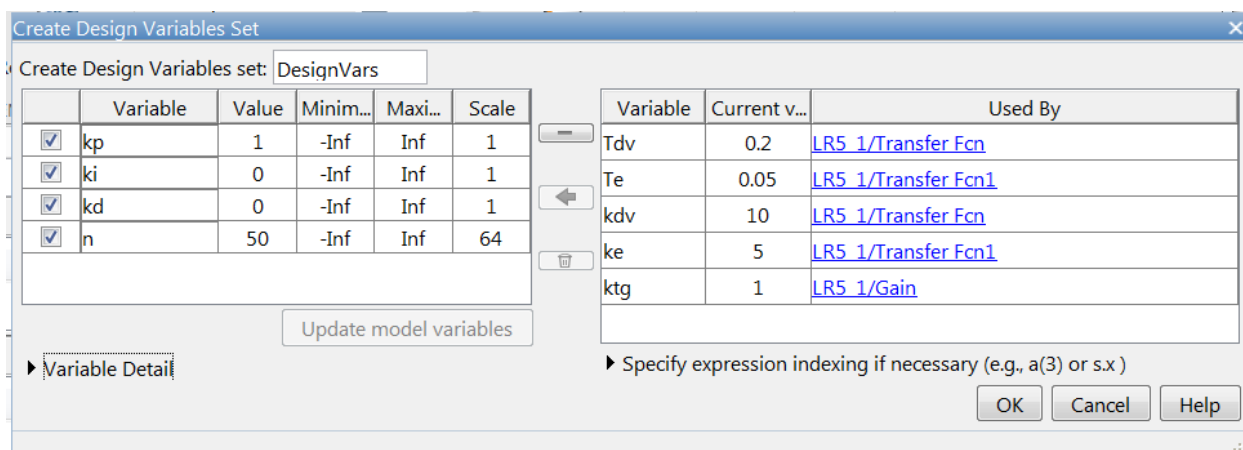


Рисунок 5.7 – Формирование параметров ПИД-регулятора для оптимизации

5. Выбираем задачу оптимизации. В блоке **REQUIREMENTS** нажимаем на кнопку **New** и в выпадающем меню в разделе **TIME-DOMAIN REQUIREMENTS** выбираем опцию **Step Response Envelope** (рисунок 5.8).

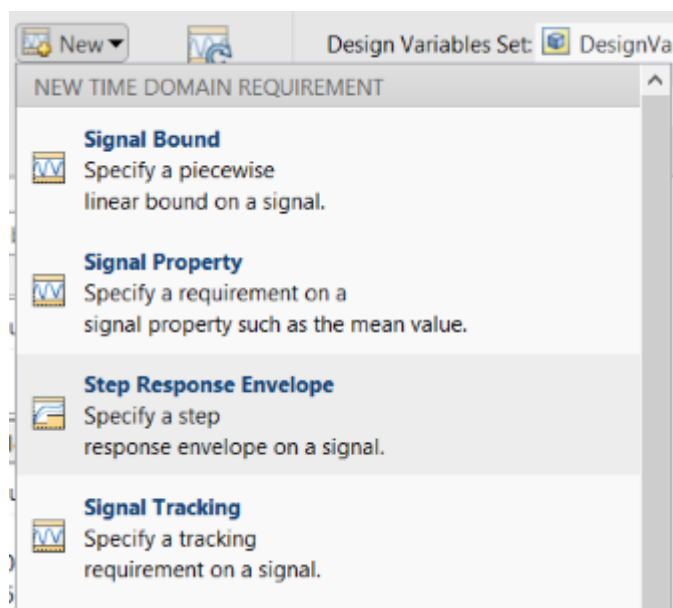


Рисунок 5.8 – Выбор задачи оптимизации

6. Задаем характеристики требуемого переходного процесса в появившемся окне в разделе **Specify Step Response Characteristics** (рисунок 5.9). Следует отметить, что значение параметра **%Settling** соответствует 3-5-процентному критерию относительно установившегося значения переходного процесса.

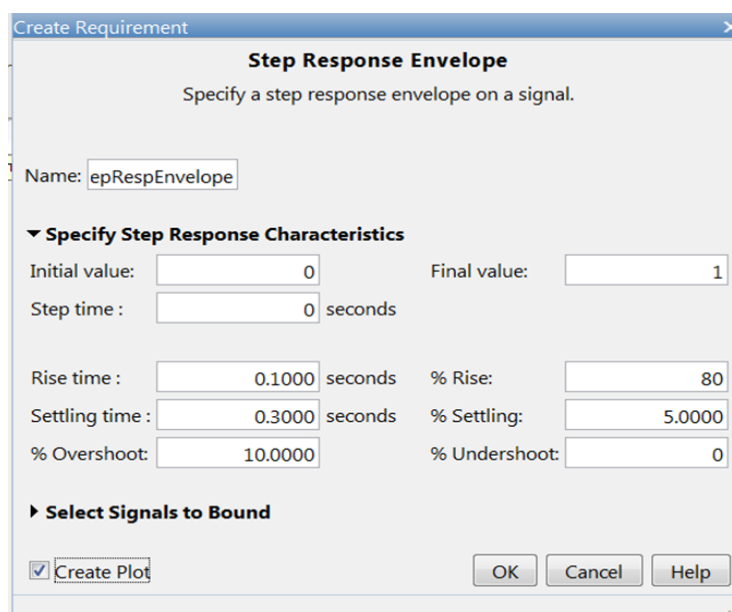


Рисунок 5.9 – Задание показателей качества требуемого переходного процесса

Характеристики качества переходного процесса показаны на рисунке 5.10.

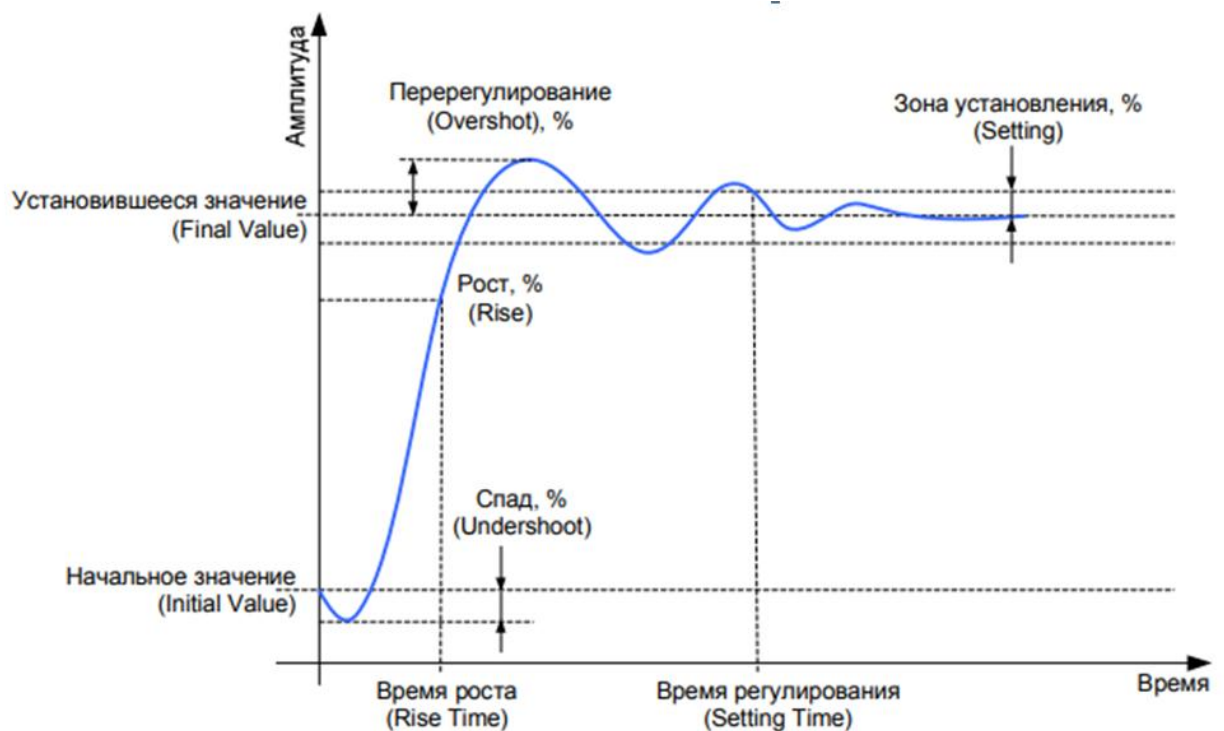


Рисунок 5.10 – Переходный процесс в САУ

7. Задаем сигнал, к которому предъявляются требования по переходному процессу. Для этого в Simulink-модели нажимаем левой кнопкой мыши на линию выходного сигнала САУ, она выделяется синим цветом (рисунок 5.11). В разделе **Select Signals to Bound** (рисунок 5.9) нажимаем на кнопку с плюсом рядом со списком. В левом списке открывшегося окна Create Signal Set выбираем сигнал (в нашем случае это сигнал *omega*) и нажимаем на кнопку со стрелкой. Завершаем выбор сигналов нажатием **OK** (рисунок 5.12).

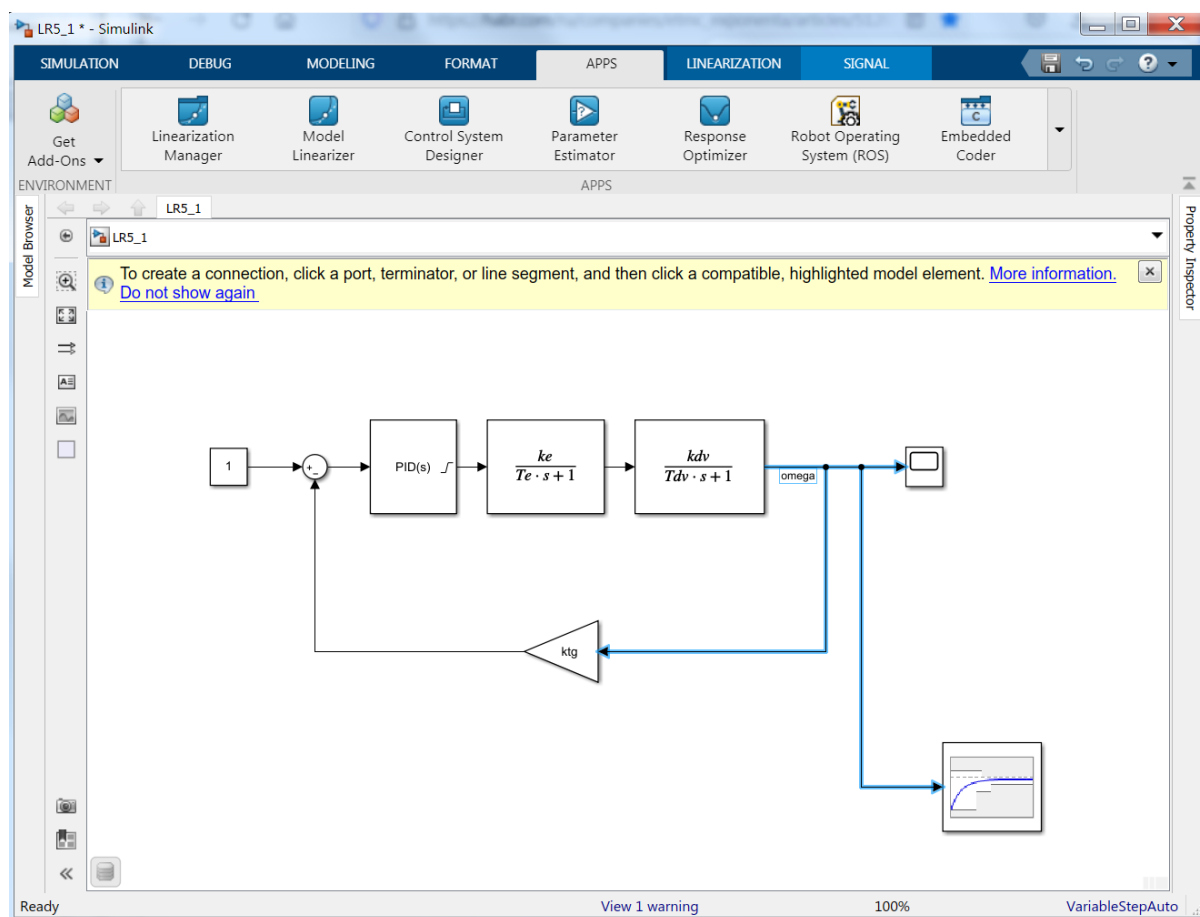


Рисунок 5.11 – Выделение выходного сигнала САУ

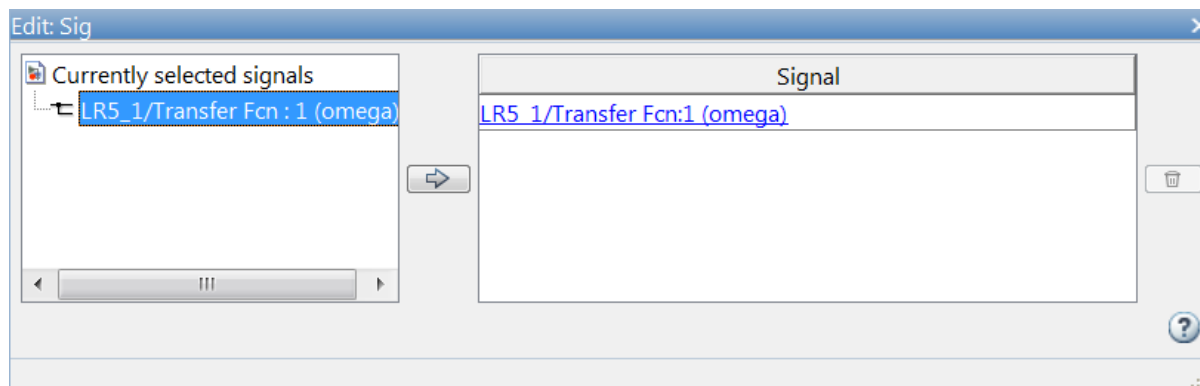


Рисунок 5.12 – Выбор необходимого выходного сигнала

В графической области окна инструмента появилась координатная плоскость с границами, за которые не может выходить график переходного процесса.

В разделе **Data** на панели **Data Browser** расположены три переменные: DesignVars содержит информацию о списке оптимизированных параметров, Sig — свойства выбранного сигнала и StepRespEnvelope — информацию о требованиях к переходному процессу.

Построим переходный процесс до настройки регулятора. Для этого выбираем переменную Sig и нажимаем на кнопку **Plot Model Response**, расположенную в блоке **PLOTS** (рисунок 5.13).

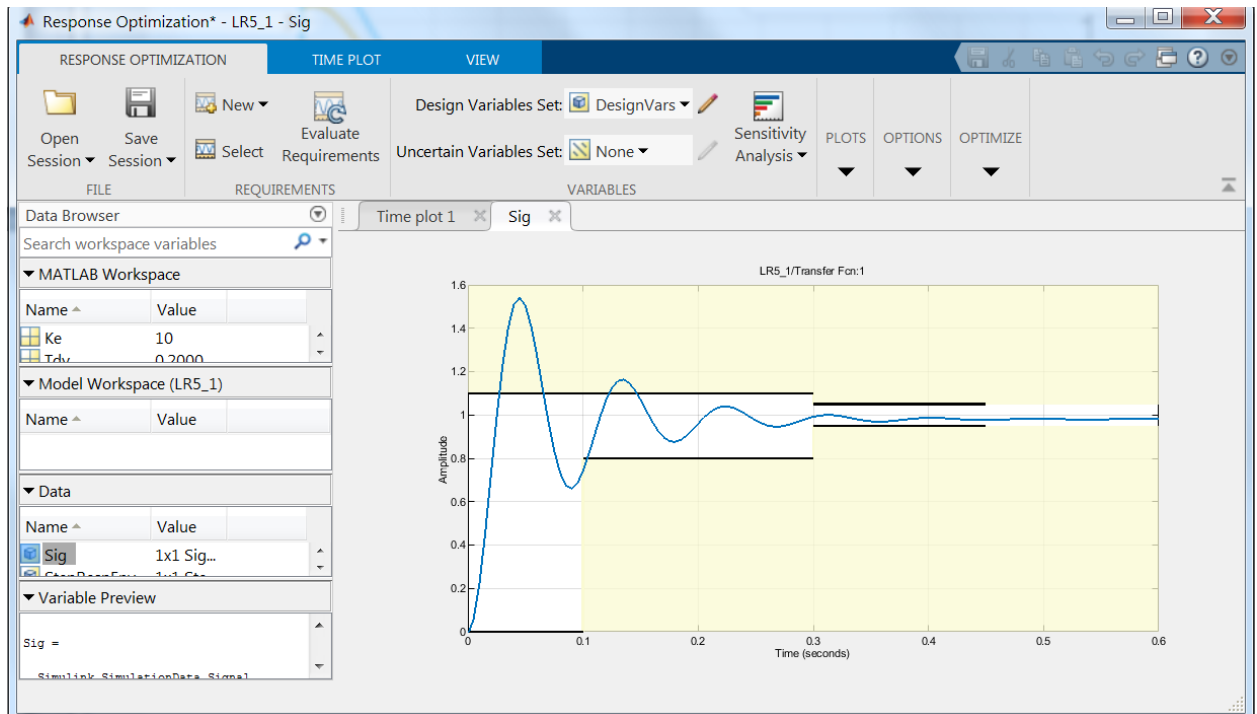


Рисунок 5.13 - Переходный процесс до настройки ПИД-регулятора

Видно, что переходный процесс не удовлетворяет поставленным требованиям по качеству.

8. Оптимизируем параметры регулятора. Выбираем переменную DesignVars и нажимаем на кнопку с зеленым треугольником в блоке **OPTIMIZE**.

Результаты процесса оптимизации отображаются в окне прогресса (рисунок 5.14).

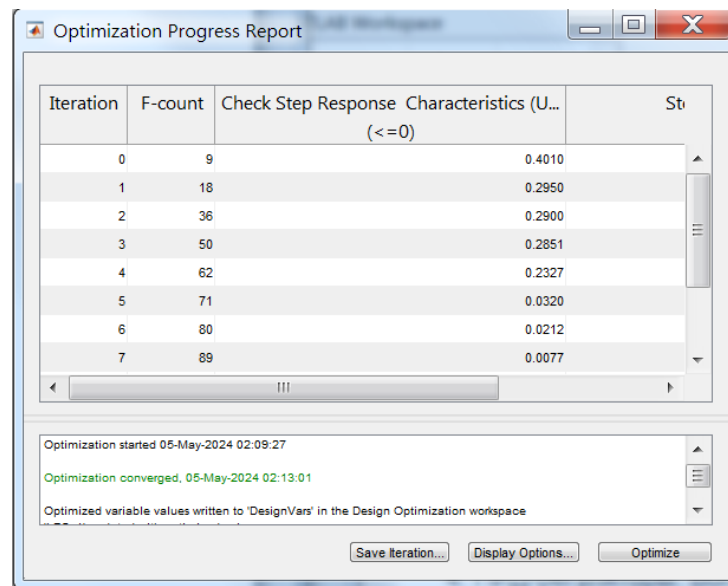


Рисунок 5.14 – Окно процесса оптимизации

В графическом окне (рисунок 5.15) можно видеть новый переходный процесс с оптимизированными параметрами регулятора (толстая линия), а также переходные процессы, построенные на предыдущих итерациях (тонкие линии).

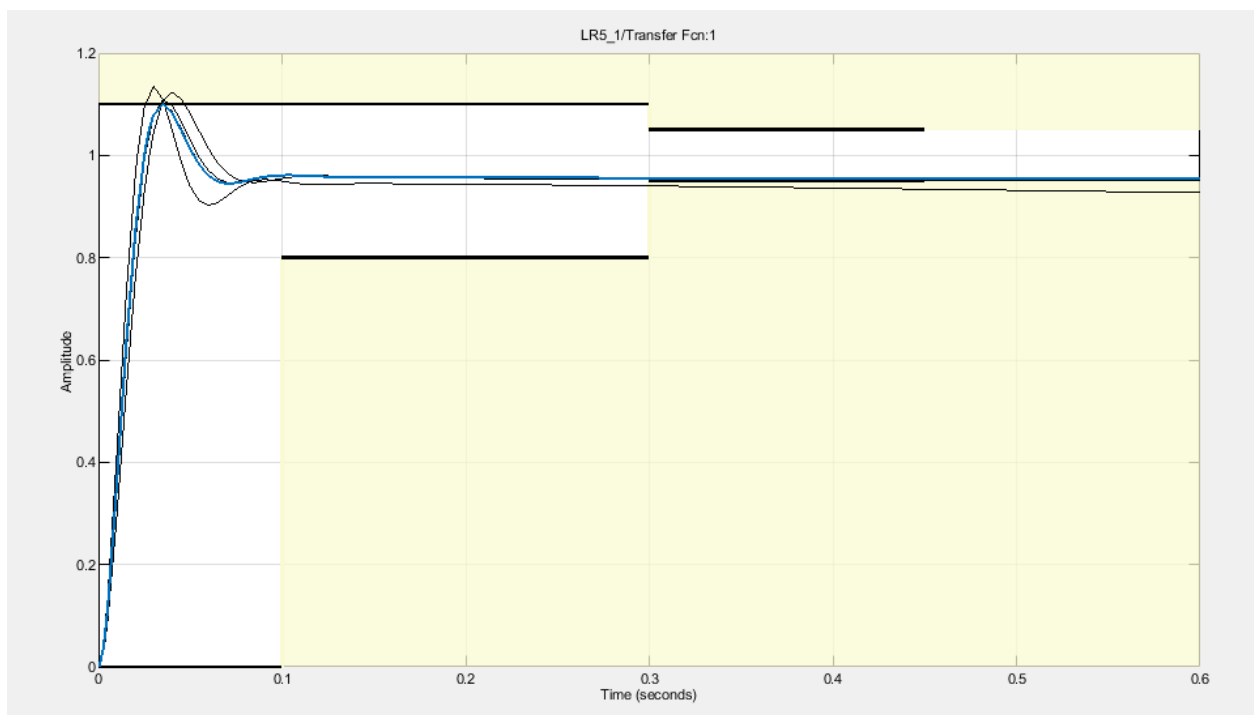


Рисунок 5.15 – Переходный процесс с оптимизированными параметрами

После окончания процесса оптимизации в разделе **MATLAB Workspace** на панели **Data Browser** появляются оптимизированные (новые) значения параметров регулятора (рисунок 5.16).

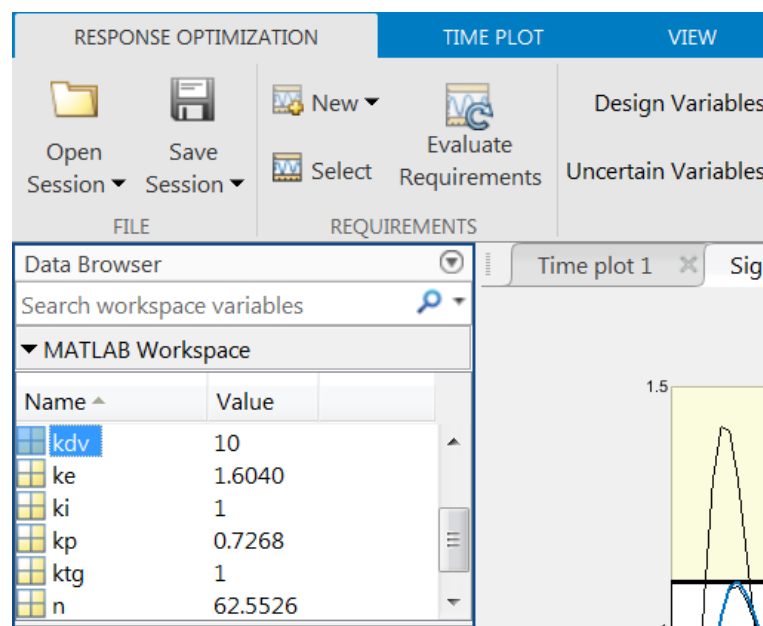


Рисунок 5.16 - Оптимизированные значения параметров регулятора

5.3. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуются характеристики САУ скорости вращения двигателя постоянного тока при использовании типовых законов управления.

Структурная схема исходной системы представлена на рисунке 5.1.

Программа исследований:

1. Изучить типовые законы управления и способы их применения.
2. Получить передаточную функцию замкнутой системы и выполнить анализ устойчивости САУ с ПИД-регулятором. Численные значения параметров звеньев САУ приведены в таблице 1. ПИД-регулятор описан формулой (1) и имеет следующие значения параметров: $P=k_p=1$, $I=k_i=1$, $D=k_d=0$, $N=n=50$. Если система не устойчива, то необходимо вручную подобрать значение P пропорциональной составляющей ПИД-регулятора, при котором будет обеспечена устойчивость.
3. Сформировать в подсистеме Simulink схему модели САУ (рисунки 5.2, 5.3, 5.4). Построить переходный процесс в САУ (рисунок 5.5) по управлению. По построенному графику определить прямые показатели качества и установившееся значение переходного процесса.
4. С помощью инструмента Response Optimizer провести исследование влияния П-закона управления на качество САУ для различных значений перерегулирования и времени регулирования требуемого переходного процесса. Время нарастания принимать равным времени регулирования. Сделать выводы.
5. С помощью инструмента Response Optimizer провести исследование влияния ПД-закона управления на качество САУ для различных значений перерегулирования и времени регулирования требуемого переходного процесса. Время нарастания принимать равным времени регулирования. Сделать выводы.
6. С помощью инструмента Response Optimizer провести исследование влияния ПИД-закона управления на качество САУ для различных значений перерегу-

лирования и времени регулирования требуемого переходного процесса. Время нарастания принимать равным времени регулирования. Сделать выводы.

Отчет должен содержать:

- а) Цель работы.
- б) Предмет исследования.
- а) Аналитическое исследование системы.
- б) Графики исследуемых процессов.
- в) Развернутые комментарии к полученным графикам.
- г) Краткие выводы.

Таблица 1 – Варианты индивидуальных заданий

№ вар.	Значения параметров передаточных функций исследуемой САУ				
	$K_{дв}$	$T_{дв}, c$	K_3	T_3, c	$K_{тг}$
1	2	0.8	4	0.02	0.2
2	3	0.6	3	0.015	0.3
3	4	0.3	2	0.025	0.4
4	5	0.7	3	0.03	0.5
5	6	0.2	4	0.02	0.6
6	3	0.6	5	0.035	0.7
7	2	0.3	5	0.025	0.9
8	4	0.1	2	0.015	0.6
9	8	0.3	3	0.02	0.4
10	2	0.5	5	0.017	0.1
11	7	0.4	1	0.019	0.3
12	4	0.3	2	0.027	0.5
13	2	0.6	3	0.03	0.8
14	9	0.8	4	0.022	0.3
15	11	0.7	5	0.033	0.9
16	7	0.5	6	0.02	0.2
17	5	0.3	7	0.03	0.5
18	8	0.1	8	0.01	0.8
19	14	0.4	9	0.04	0.4
20	3	0.6	10	0.02	0.4
21	15	0.8	11	0.03	0.1
22	19	0.3	12	0.02	0.3
23	12	0.6	13	0.035	0.7
24	9	0.1	14	0.025	0.5
25	8	0.7	15	0.02	0.4
26	4	0.2	2	0.027	0.55

№ вар.	Значения параметров передаточных функций исследуемой САУ				
	$K_{дв}$	$T_{дв}, с$	$K_э$	$T_э, с$	$K_{тг}$
27	2	0.5	3	0.03	0.3
28	9	0.7	4	0.022	0.8
29	11	0.6	5	0.033	0.9
30	7	0.8	6	0.02	0.1

4.6. Контрольные вопросы

1. Какие типовые законы управления вы знаете?
2. С помощью каких типовых законов управления можно решать задачу стабилизации системы регулирования?
3. С помощью каких типовых законов управления можно решать задачу точности системы регулирования?
4. С помощью какого типового закона управления можно сделать систему астатической по возмущению (управлению)?
5. С помощью какого типового закона управления можно повысить быстродействие системы?
6. Какие существуют структуры ПИД-регулятора?
7. Чем определяется место включения ПИД-регулятора?
8. Дайте развернутую характеристику ПД-закона управления.
9. Дайте развернутую характеристику ПИ-закона управления.
10. Дайте развернутую характеристику ПИД-закона управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления : учеб. изд. / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. - 4-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Профессия, 2007. - 752 с.
2. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования : учебник и практикум для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. — М. : Юрайт, 2023. — 279 с.
3. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. — 7-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2023. — 464 с.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. - М. : Горячая линия-Телеком, 2009. - 608 с.
5. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем : учебник для вузов / Н.Н. Иващенко. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — 736 с.
6. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Линейные системы : учебник и практикум для вузов / Д. П. Ким. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2023. — 311 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бесе́керский, В. А. Теория систем автоматического управления : учеб. изд. / В.А. Бесе́керский, Е. П. Попов. - 4-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Профессия, 2007. - 752 с.
2. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования : учебник и практикум для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. — М. : Юрайт, 2023. — 279 с.
3. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. — 7-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2023. — 464 с.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. - М. : Горячая линия-Телеком, 2009. - 608 с.
5. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем : учебник для вузов / Н.Н. Иващенко. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — 736 с.
6. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Линейные системы : учебник и практикум для вузов / Д. П. Ким. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2023. — 311 с.
7. Настройка ПИД-регуляторов. — М. : ЦИТМ Экспонента, 2020. — URL: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/513904/ (дата обращения 25.11.2022).
8. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления : учебное пособие для вузов / Е. П. Попов. - 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1989. - 304 с.
9. Ягодкина, Т. В. Теория автоматического управления : учебник и практикум для вузов / Т. В. Ягодкина, В.М. Беседин. — М. : Юрайт, 2023. – 470 с.

Т Е О Р И Я
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ*

Часть 2

Составители: **Грушун** Андрей Иванович,
Грушун Татьяна Александровна

В авторской редакции

Изд. № 87/2024. Объем 4,25 п.л. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 4,17.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»