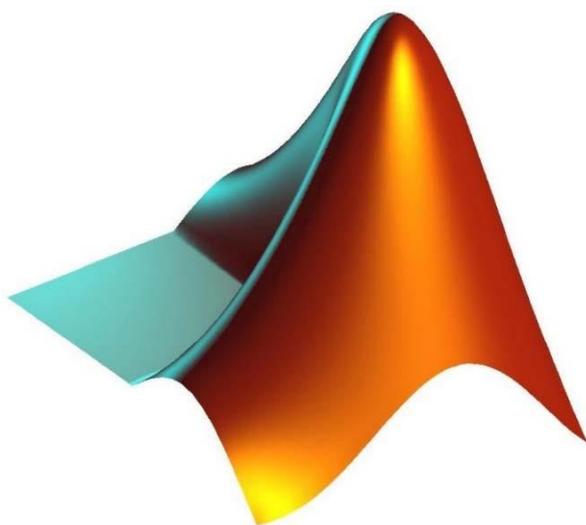


Владимирский государственный университет

С. И. ЛИХОДЕЕВ

**ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ В СРЕДЕ МАТЛАВ**

Практикум



Владимир 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

С. И. ЛИХОДЕЕВ

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В СРЕДЕ MATLAB

Практикум

Электронное издание



Владимир 2022

ISBN 978-5-9984-1364-3

© ВлГУ, 2022

© Лиходеев С. И., 2022

УДК 621.3+621.38

ББК 31.2+32.85

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
зам. начальника отдела измерительной техники
ЗАО НПП «Автоматика»
В. М. Дерябин

Кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. П. Умнов

Лиходеев, С. И.

Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде MATLAB [Электронный ресурс] : практикум / С. И. Лиходеев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2022. – 128 с. – ISBN 978-5-9984-1364-3. – Электрон. дан. (7,16 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Представлено 12 практических работ по основным разделам курса «Математические модели технических объектов управления», «Электротехника и электроника», которые выполняются в среде MATLAB.

Предназначен для бакалавров направления подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах». Может быть полезен для магистров направления подготовки 27.04.03 при выполнении практических работ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 11. Ил. 142. Библиогр.: 6 назв.

ISBN 978-5-9984-1364-3

© ВлГУ, 2022

© Лиходеев С. И., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Практическое занятие 1 Моделирование и исследование типовых динамических звеньев	5
Практическое занятие 2 Исследование частотных характеристик систем автоматического управления.....	17
Практическое занятие 3 Анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования с помощью критерия устойчивости Гурвица.....	24
Практическое занятие 4 Анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования с помощью частотных критериев устойчивости	32
Практическое занятие 5 Синтез систем автоматического регулирования.....	39
Практическое занятие 6 Исследование П-, И-, ПИ- регуляторов	44
Практическое занятие 7 Исследование качества переходных процессов линейной автоматической системы	56
Практическое занятие 8 Проектирование регулятора для линейной системы с помощью приложения SISOtool	59
Практическое занятие 9 Моделирование нелинейных систем управления	70
Практическое занятие 10 Исследование автоматической системы стабилизации постоянного напряжения	76
Практическое занятие 11 Моделирование устройств на базе операционных усилителей.....	89
Практическое занятие 12 Моделирование электронных устройств на базе комбинационных логических схем.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	127

ВВЕДЕНИЕ

Современные вычислительные средства позволяют без особого труда и затрат времени решать сложные задачи управления в технических системах не инженерными методами, а с использованием математических аппаратов любой степени сложности. При этом не требуется помощь программиста для реализации методов и визуализации проводимых исследований. Все это выполняет такая современная математическая система, как MATLAB.

Она вобрала в себя не только передовой опыт развития и компьютерной реализации численных методов, накопленный за последние три десятилетия, но и весь опыт становления математики за всю историю человечества [1].

Популярности системы MATLAB способствует ее матричная ориентация и мощное главное расширение Simulink. MATLAB и Simulink предоставляют пользователю удобные и простые средства, в том числе визуального объектно-ориентированного программирования, для моделирования линейных и нелинейных динамических систем, а также множество других пакетов расширения системы. Начинаящий пользователь MATLAB может в процессе работы совершенствовать свои знания как в области моделирования и численных методов, так и в области программирования и визуализации данных.

Практическое занятие 1

Моделирование и исследование типовых динамических звеньев

1. Цель работы:

Изучение временных и частотных характеристик типовых динамических звеньев с использованием MATLAB.

2. Предварительное домашнее задание

Составить уравнения и вывести передаточные функции $H(s)$ для всех типовых звеньев.

3. Краткие теоретические сведения.

Под динамическим звеном понимается устройство любого физического вида, описанное дифференциальными уравнениями не более второго порядка [2].

Динамика большинства функциональных элементов систем автоматического регулирования (САУ) независимо от исполнения может быть описана одинаковыми элементами. Такие элементы называют элементарными динамическими звеньями. Передаточная функция элементарного звена в общем виде задается отношением двух полиномов не более чем второй степени:

$$H(s) = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_2}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}$$

Любую сложную передаточную функцию линеаризованной САУ можно представить, как произведение передаточных функций элементарных звеньев. Каждому такому звену в реальной САУ, как правило, соответствует какой-то отдельный узел. Зная свойства отдельных звеньев можно судить о динамике САУ в целом.

Создание моделей в SIMULINK

Пакет SIMULINK [1] предназначен для моделирования систем. Вся модель строится из блоков, имеющих входы и выходы. Существует библиотека стандартных блоков, кроме того, можно создавать свои собственные блоки любой сложности. Существует две группы специальных устройств – источники сигналов (**Sources**) и устройства вывода (**Sinks**).

Блоки имеют названия. Для того, чтобы изменить название, надо щелкнуть по нему ЛКМ и отредактировать текст.

Каждый блок имеет свои настраиваемые свойства. Для их изменения надо дважды щелкнуть на блоке и изменить нужные значения в диалоговом окне.

Для того, чтобы повернуть блок на 90 градусов, надо выделить его и нажать клавиши **Ctrl+R**. Комбинация **Ctrl+I** позволяет выполнить зеркальное отражение входов и выходов.

Верхнее меню **Format** предназначено для изменения оформления выделенного блока. Также для этой цели можно использовать контекстное меню **ПКМ – Format**. Для выделенного блока можно изменить цвет текста и линий (**Foreground color**), цвет фона (**Background color**), вывести тень (**Show drop shadow**), переместить название на другую сторону (**Flip name**).

Для выделения одного блока или соединительной линии надо щелкнуть ЛКМ по нужному элементу. Для того, чтобы выделить несколько блоков, надо «обвести» их при нажатой ЛКМ. Клавиша **Delete** удаляют выделенную часть. Чтобы скопировать блок (или выделенную часть), надо перетащить его при нажатой правой кнопке мыши (ПКМ).

Блоки соединяются линиями связи, по которым распространяются сигналы. Для того, чтобы соединить блоки, надо щелкнуть ЛКМ по источнику сигнала и затем, при нажатой клавише **Ctrl**, по блоку-приемнику. Можно также протянуть мышкой линию связи между нужными выходом и входом.

Чтобы подать один сигнал на два блока (сделать «развилку»), надо сначала создать одну линию обычным способом. Чтобы провести вторую линию, следует нажать правую кнопку мыши на линии в точке развилки и протащить линию ко второму блоку.

Модель можно скопировать в буфер обмена в виде растрового рисунка. Для этого в окне модели надо выбрать в верхнем меню пункт **Edit – Copy model to clipboard**. Предварительно лучше уменьшить размеры окна до минимальных, чтобы не было белых полей.

Для того, чтобы запустить моделирование, надо щелкнуть ЛКМ по кнопке  на панели инструментов. Эта же кнопка позволяет остановить моделирование при необходимости.

Параметры моделирования (метод интегрирования, обработка ошибок) устанавливаются с помощью окна **Simulation – Parameters**.

Самые важные параметры – это время моделирования (**Stop time**) и метод численного интегрирования уравнений (**Solver options**).

Основные источники сигналов (Sources)



Constant – сигнал постоянной величины.



Step – ступенчатый сигнал, меняется время скачка (**Step Time**), начальное (**Initial Value**) и конечное значение (**Final Value**).



Ramp – линейно возрастающий сигнал с заданным наклоном (**Slope**). Можно задать также время начала изменения сигнала (**Start Time**) и начальное значение (**Initial Value**).



Pulse Generator – генератор прямоугольных импульсов, задаются амплитуда (**Amplitude**), период (**Period**), ширина (**Pulse Width**, в процентах от периода), фаза (**Phase Delay**).



Repeating Sequence – последовательность импульсов, их форма задается в виде пар чисел (время; величина сигнала)



Sine Wave – синусоидальный сигнал, задается амплитуда (**Amplitude**), частота (**Frequency**), фаза (**Phase**) и среднее значение (**Bias**).



Signal Builder – построитель сигналов, позволяющий задавать форму сигнала, перетаскивая мышью опорные точки.



Random Number – случайные числа с нормальным (гауссовым) распределением. Можно задать среднее значение (**Mean Value**), дисперсию (**Variance**), период изменения сигнала (**Sample Time**).



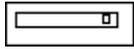
Uniform Random Number – случайные числа с равномерным распределением в заданном интервале от **Minimum** до **Maximum**.



Band Limited White Noise – случайный сигнал, ограниченный по полосе белый шум (имеющий равномерный спектр до некоторой частоты). Блок используется как источник белого шума для моделей непрерывных си-

стем. Задается интенсивность (**Noise Power**) и интервал дискретизации (**Sample Time**), в течение которого удерживается постоянное значение сигнала. Чем меньше интервал, тем точнее моделирование, однако больше вычислительные затраты.

Основные устройства вывода (Sinks)

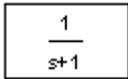


Display – цифровой дисплей, показывает изменение входного сигнала в цифровом виде.

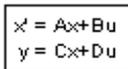


Scope – осциллограф, показывает изменение сигнала в виде графика, позволяет передавать данные в рабочую область MATLAB для последующей обработки и оформления.

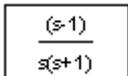
Линейные системы (Continuous)



Transfer Fcn – передаточная функция, в параметрах задаются числитель (**Numerator**) и знаменатель (**Denominator**) в виде полиномов.



State Space – модель в пространстве состояний, в параметрах задается четверка матриц, определяющих модель, и начальные условия для вектора состояния (**Initial conditions**).



Zero-Pole – модель в форме «нули-полюса», в параметрах задаются массивы нулей (**Zeros**), полюсов (**Poles**), а также коэффициент усиления (**Gain**).



Integrator – интегратор с возможностью установки начальных условий (**Initial condition**), а также пределов насыщения (**Lower saturation limit** и **Upper saturation limit**). Когда сигнал выхода выходит за границы, определяемые этими пределами, интегрирование прекращается.

Другие часто используемые блоки

Math Operations



Gain – усилитель, задается коэффициент усиления (**Gain**).



Sum – сумматор, используется для сложения и вычитания входов. Параметр **List of signs** задает количество входов, их знаки («+» для сложения и «-» для вычитания). Промежутки между входами (обозначаются знаком |).



Trigonometric Function – тригонометрическая функция.

Signal Routing



Manual Switch – ручной переключатель, позволяет двойным щелчком переключать выход на один из двух входных сигналов.



Mux – мультиплексор, объединяет несколько сигналов в один «жгут» (векторный сигнал), в параметрах задается число входов (**Number of Inputs**).

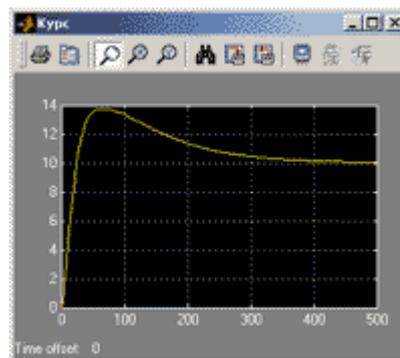


Demux – демультиплексор, позволяет «разбить» векторный сигнал на несколько скалярных, в параметрах задается число выходов (**Number of Outputs**).

Блок Scope

В окне блока **Scope** изображается график изменения входного сигнала. Если вход соединен с выходом мультиплексора, сразу строится несколько графиков (по размерности входного «жгута»).

По умолчанию на оси ординат используется диапазон от -5 до 5. Если этот вариант не подходит, выбрать масштаб автоматически (так, чтобы весь график был виден) можно с помощью кнопки . Соседняя кнопка  сохраняет эти настройки для следующих запусков.



Кнопка  открывает окно настроек, причем наиболее важные данные содержатся на вкладке **Data history**. Если не сбросить флажок **Limit data points**, в памяти будет сохраняться только заданное число точек графика, то есть, при большом времени моделирования начало графика будет потеряно.

Отметив на этой же странице флажок **Save data to workspace** можно сразу передать результаты моделирования в рабочую область MATLAB для того, чтобы их можно было дальше обрабатывать, выводить на графики и сохранять в файле. Поле **Variable name** задает имя переменной в рабочей области, в которой сохраняются данные. В простейшем случае выбирается формат **Array** (в списке **Format**). Это означает, что данные будут сохраняться в массиве из нескольких

столбцов (первый столбец – время, второй – первый сигнал, третий – второй сигнал и т.д., по порядку входов мультиплексора).

Оформление графиков

Для создания нового окна для рисунка в MATLAB используется команда

```
>> figure(1);
```

Вместо единицы можно ставить любой номер рисунка. Если рисунок с таким номером уже есть, он становится активным и выводится на первый план. Если такого рисунка нет, он создается и становится активным.

В MATLAB есть возможность строить несколько графиков на одном рисунке. Иначе говоря, рисунок можно разбить на «клетки», в каждой из которых строится отдельный график. Для этого надо сделать активным нужный рисунок и применить команду

```
>> subplot(2, 1, 1);
```

Первое число в команде **subplot** показывает количество «строк» в такой матрице, второе – количество столбцов, третье – какой по счету график сделать активным (считая по строкам, справа налево и сверху вниз). Все дальнейшие команды (**plot**, **title**, **xlabel**, **ylabel**, **legend** и др.) относятся к этому «подграфику».

В командах можно передавать в качестве аргументов не целые массивы, а их части. Например, по команде

```
>> plot(x(1:20), y(11:30));
```

строится график, на котором по оси абсцисс откладываются значения элементов массива **x** с номерами от 1 до 20, а по оси ординат – соответствующие им значения из массива **y** с номерами от 11 до 30.

Двоеточие означает «все строки» или «все столбцы». Например, по команде

```
>> plot(x(:,1), x(:,2));
```

строится зависимость между первым и вторым столбцами массива **x** (здесь двоеточие вместо первого индекса обозначает «все строки»).

С помощью команды **plot** (а также и других подобных – **semilogx**, **semilogy**, **loglog**) можно строить несколько линий на одном графике. Для этого среди аргументов перечисляются пары массивов:

```
>> plot(x, y, v, z);
```

Первая линия будет показывать зависимость **y** от **x**, а вторая – зависимость **z** от **v**. массивы в каждой паре должны быть одинаковой длины. При желании можно указать цвета для каждой линии, Например,

```
>> plot(x, y, 'b', v, z, 'g');
```

Первая линия (зависимость **y** от **x**) будет синей, вторая (зависимость **z** от **v**) – зеленой. Можно использовать следующие цвета

b синий (**blue**)
g зеленый (**green**)
r красный (**red**)
c голубой (**cyan**)
m фиолетовый (**magenta**)
y желтый (**yellow**)
k черный (**black**)

По умолчанию первая линия – синяя, вторая – зеленая и т.д. в порядке перечисления цветов в списке. Дополнительно можно указать тип линии

- сплошная
- : точечная
- . штрих-пунктирная
- штриховая

Например,

```
>> plot(x, y, 'b:', v, z, 'g--');
```

Первая линия – точечная синего цвета, вторая – штриховая зеленого цвета. По умолчанию все линии сплошные.

Для оформления графика также используются команды

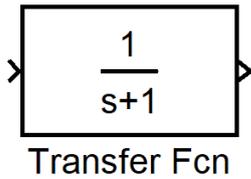
title заголовок графика
xlabel название оси абсцисс
ylabel название оси ординат

У всех этих команд обязателен один аргумент – текст в апострофах.

Команда **legend** служит для вывода легенды графика. Легенда нужна, если на графике есть несколько линий и надо показать, что обозначает каждая из них. Параметрами команды **legend** являются символьные строки, их должно быть столько, сколько построено линий.

Рассмотрим типовые динамические звенья, исследуемые в данной работе:

1. Безынерционное (идеальное усилительное) $H(s) = k$ звено реализуется с помощью элемента Gain библиотеки Math Operations раздела Simulink. Коэффициент усиления задается свойством Gain.
2. Апериодическое (инерционное) звено первого порядка $H(s) = \frac{k}{Ts+1}$, и аperiодическое звено второго порядка $H(s) = \frac{1}{T^2s^2+T_2s+1}$,



Transfer Fcn библиотеки Continuous. В свойствах можно задать порядок числителя и знаменателя введя соответствующие коэффициенты перед степенями s . Для числителя свойство Numerator, для знаменателя свойство Denominator. Последнее

число в квадратных скобках соответствует коэффициенту при s^0 , числа левее соответствуют степеням s на единицу большим (рис.1.)

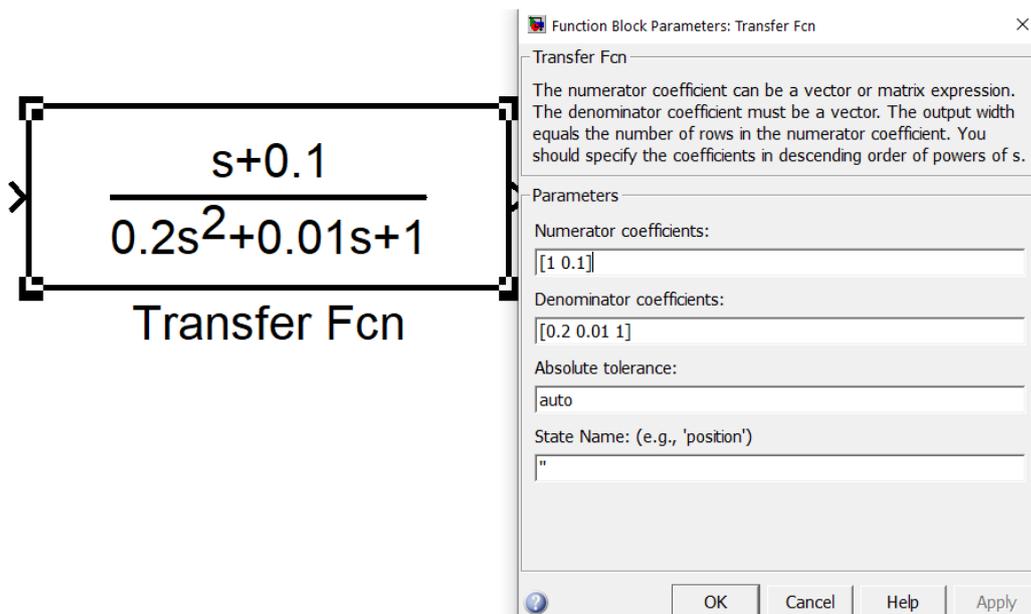


Рис.1.1. Настройка блока «Transfer Fcn»

3. Дифференцирующее звено $H(s) = s$ реализуется с помощью элемента Derivative библиотеки Continuous
4. Интегрирующее звено $H(s) = 1/s$ реализуется с помощью элемента Integrator библиотеки Continuous. Также его можно реализовать с помощью «Transfer Fcn» (рис.2)

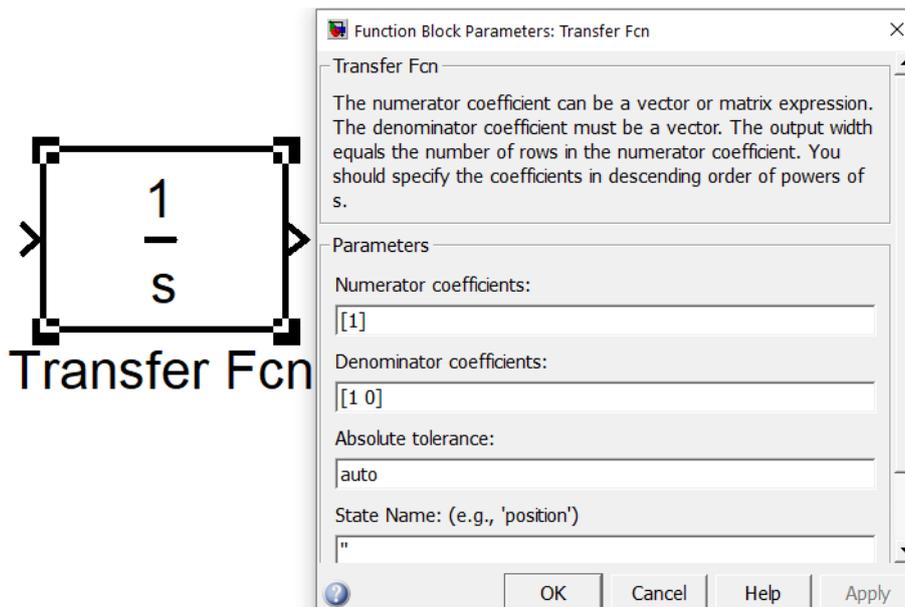


Рис.1.2. Настройка блока «Transfer Fcn» для интегрирующего звена

5. Форсирующее звено $W(p) = k(Ts + 1)$ реализуется с помощью параллельного включения элемента Gain и Derivative, значение постоянной времени T можно задать подключив еще один элемент Gain последовательно к Derivative

Рассмотрим пример программы (рис.1.3) для расчета асимптотических и точных характеристик колебательного звена.

%Колебательное звено

```
clear, clc
s=tf('s');
w=1:1:1000; % задание диапазона частот;
s=w*i;
k1=25;T1=0.01;e=0.1;
h1=[k1./(T1.^2*s.^2+2*e*T1.*s+1)]; % ККП для h1
Re=real(h1); % реальная часть ККП
Im=imag(h1); % мнимая часть ККП
Aw=sqrt(Re.^2+Im.^2); % амплитуда ККП
faza=atan2(Im,Re);% фаза ККП
for k=1:1000 % построение асимптотических логарифмических
характеристик
    w1=1*k;
    C(:,k)=log10(w1);
    if(w1<1/T1) A(:,k)=20*log10(k1);end;
```

```

if(w1>=1/T1)A(:,k)=20*log10(k1)-40*log10(T1*w1);end;
end;
subplot(2, 2, 2);plot(Re,Im);
title('годограф ОР');ylabel('Im');xlabel('Re');
grid on
subplot(2, 2, 1);plot(log10(w),20*log10(Aw),C,A)
title('ЛАЧХ ОР');ylabel('20lg(Aw)');xlabel('lg(w)');
grid on
subplot(2, 2, 3);plot(log10(w),faza*180/pi);
title('ЛФЧХ ОР');ylabel('фаза (град)');xlabel('lg(w)');
grid on
% расчет переходной характеристики
s=tf('s');
h1=k1/(T1^2*s^2+2*e*T1*s+1);
subplot(2,4,8)
step(h1),grid on

```

Рис.1.3. Код программы для расчета асимптотических и точных характеристик колебательного звена

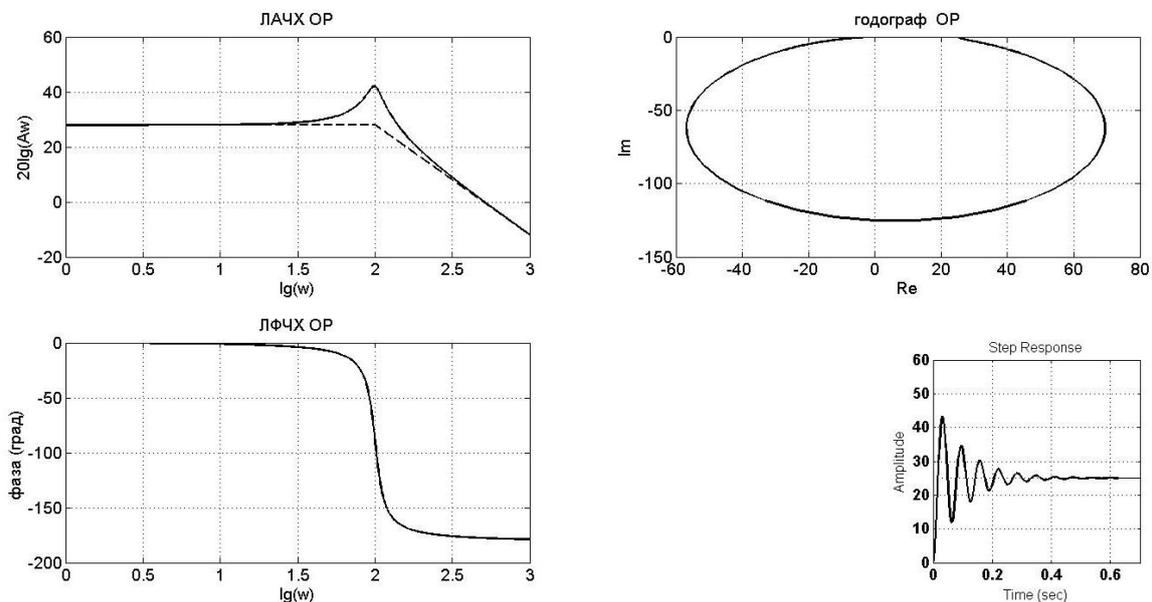


Рис.1.4. Характеристики колебательного звена

Для расчёта точных характеристик можно воспользоваться командой `ltiview(h)`, где h – передаточная функция.

Также, можно провести линейный анализ системы. Для этого необходимо создать в Simulink модель (рис.1.5). Указать на схеме входную и выходную величины.

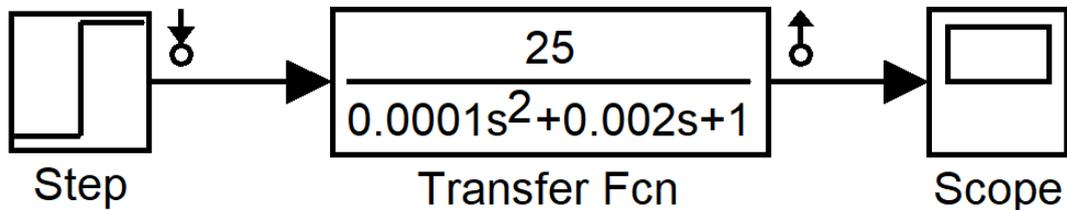


Рис.1.5. Модель для расчета характеристик колебательного звена

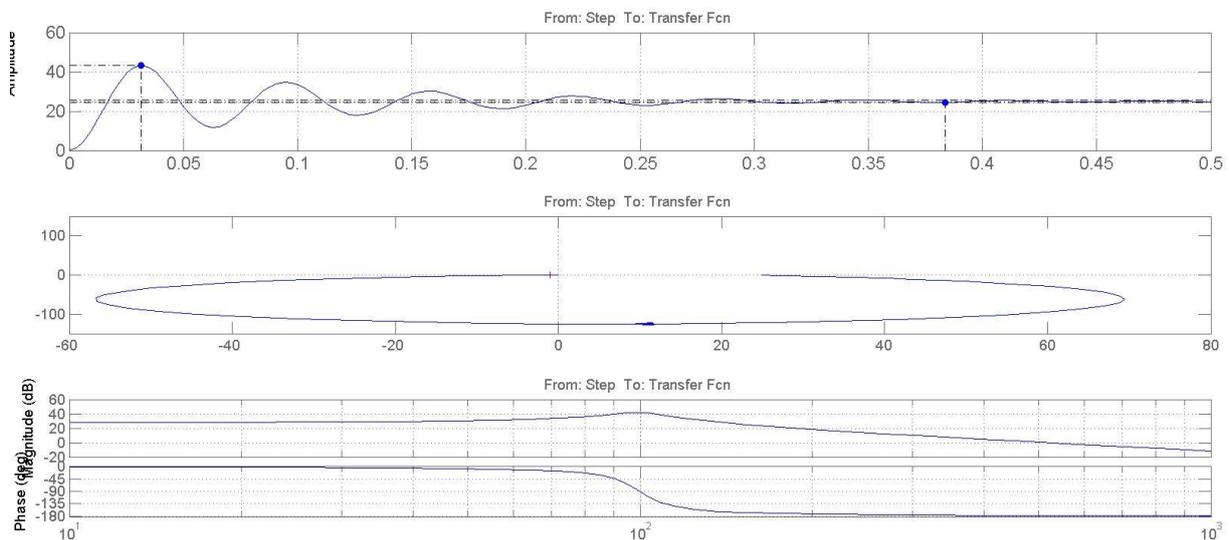


Рис.1.6. Характеристики колебательного звена при линейном анализе

4. Задание

1. Привести названия и графики, использованных типовых возмущающих воздействий. Описать изменения в реакции типовых звеньев на варьирование параметров воздействий.
2. Для каждого звена привести:
 - ✓ название звена;
 - ✓ вывод передаточной функции;
 - ✓ исследуемую модель звена в Simulink с рассчитанными характеристиками (переходная функция; ЛАЧХ и ЛФЧХ и годограф);

- ✓ программу (М-файл) для построения асимптотических и точных ЛАЧХ и ЛФЧХ и годографа;

Таблица вариантов:

Таблица 1.1

№ варианта	Аперидическое звено 1		Аперидическое звено 2		Апериодическое звено второго порядка и колебательное			Интегрирующее звено	Издранное звено			Реальное дифференцирующее звено	
	k1	T1	k2	T2	k3	T3	ξ		k4	k5	T6	k7	T7
1	4	0.4	7	0.07	3	0.4	2.5 (0.25)	4	4	0.8	4	0.5	
2	2	0.7	4	0.05	1	0.4	2 (0.5)	4	4	0.8	4	0.5	
3	4	0.4	7	0.07	3	0.4	2.5 (0.25)	2	6	0.6	2	0.1	
4	4	0.4	5	0.02	3	0.4	1.5 (0.25)	4	4	0.6	4	0.5	
5	1	0.1	4	0.08	6	0.4	2.5 (0.5)	4	2	0.5	4	0.5	
6	1	0.8	7	0.07	3	0.4	1 (0.025)	4	4	0.8	6	0.5	
7	3	0.4	9	0.09	7	0.2	0.5 (0.01)	1	4	0.8	4	0.6	
8	4	0.5	7	0.02	5	0.2	0.5 (0.01)	1	4	0.8	6	0.3	
9	5	0.4	4	0.01	4	0.2	0.5 (0.01)	2	6	0.3	4	0.6	
10	7	0.8	2	0.04	3	0.2	0.5 (0.01)	1	4	0.5	8	0.3	
11	2	0.9	4	0.05	8	0.2	0.5 (0.01)	3	7	0.8	9	0.6	
12	3	0.4	7	0.06	3	0.2	0.5 (0.01)	4	4	0.7	4	0.5	

5. Содержание отчета. Отчет должен содержать:

1. Заданные схемы с параметрами.
2. Характеристики звеньев, выполненные в MATLAB.
3. программы (М-файл) для построения асимптотических и точных ЛАЧХ и ЛФЧХ и годографа;
4. Выводы.

6. Контрольные вопросы.

1. Какие временные характеристики САУ вы знаете и какова их связь с передаточными функциями САУ?
2. Какие виды частотных характеристик САУ вам известны и какой их физический смысл?
3. Какие типовые динамические звенья вы знаете, их передаточные функции и дифференциальные уравнения?
4. Как получить частотные характеристики звеньев по их передаточным функциям?
5. Как строятся логарифмические частотные характеристики?

Практическое занятие 2

Исследование частотных характеристик систем автоматического управления

1. Цель работы:

Изучение частотных характеристик САУ (АФЧХ и ЛАФЧХ); исследование указанных характеристик при изменении параметров звеньев САУ.

2. Содержание работы

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе системы, вызванные гармоническим воздействием на ее входе[1].

В результате разбиения САУ на звенья и определения их математического описания в виде передаточных функций, частотных или переходных характеристик составляется структурная схема системы. По структурной схеме затем получают передаточную функцию или характеристики САУ в целом.

Наиболее просто описание САУ (передаточную функцию) можно найти, оперируя передаточными функциями звеньев. При последо-

вательном соединении передаточная функция цепочки звеньев $H(s)$ равна произведению передаточных функций звеньев [1].

Передаточная функция группы параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев. Если звено с передаточной функцией $H_1(s)$ охвачено обратной связью через звено $H(s)_{oc}$, то передаточная функция такого замкнутого контура $H_3(s)$ определяется выражением:

$$H_3 = \frac{H_1}{1 \mp H_1 H_{oc}}$$

Здесь знак плюс в знаменателе соответствует отрицательной обратной связи, а минус – положительной.

На основании приведенных формул каждая группа звеньев может быть заменена одним эквивалентным звеном, а вся система управления приведена к одноконтурному виду.

Связь между частотными характеристиками системы и составляющих ее звеньев определяется следующим выражением:

$$K(j\omega)_{s=j\omega} = H(s)$$

Соответственно АФЧХ цепочки последовательно соединенных звеньев разомкнутой САУ равна:

$$K(j\omega) = \prod_{i=1}^n K_i(j\omega),$$

где $K(j\omega)_i$ – АФЧХ i -го звена САУ.

Из последней формулы можно получить:

$$A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega),$$

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega),$$

$A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ – амплитудная и фазовая частотные характеристики САУ, а $A_i(\omega)$ и $\varphi_i(\omega)$ – соответствующие характеристики i -го звена.

При логарифмировании $A(\omega)$ получим выражение для ЛАЧХ цепочки звеньев $L(\omega)$

$$L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega)$$

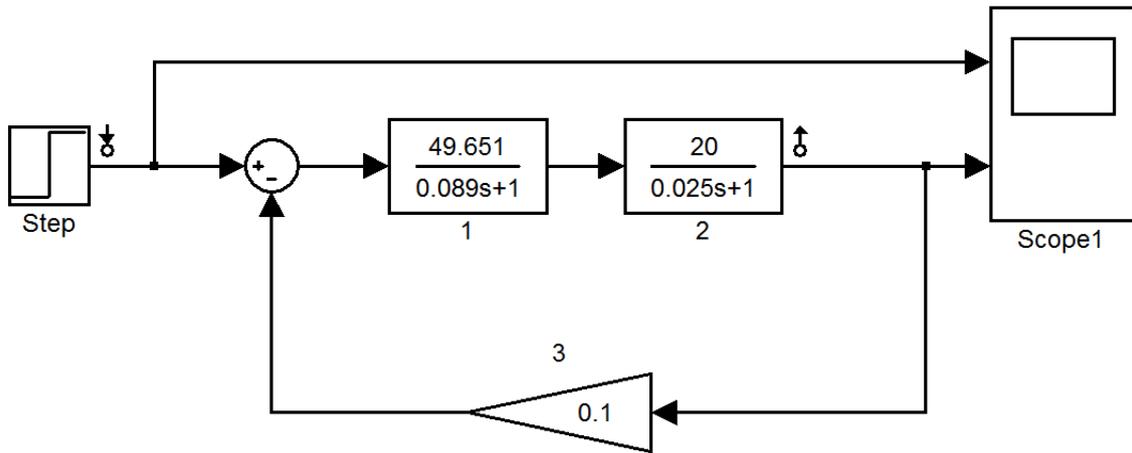


Рис.2.1. Модель для исследования с помощью линейного анализа.

Рассмотрим пример. Для модели, представленной на рисунке 2.1 необходимо построить характеристики с помощью линейного анализа.

Укажем точку входа и выхода (рис 2.1)

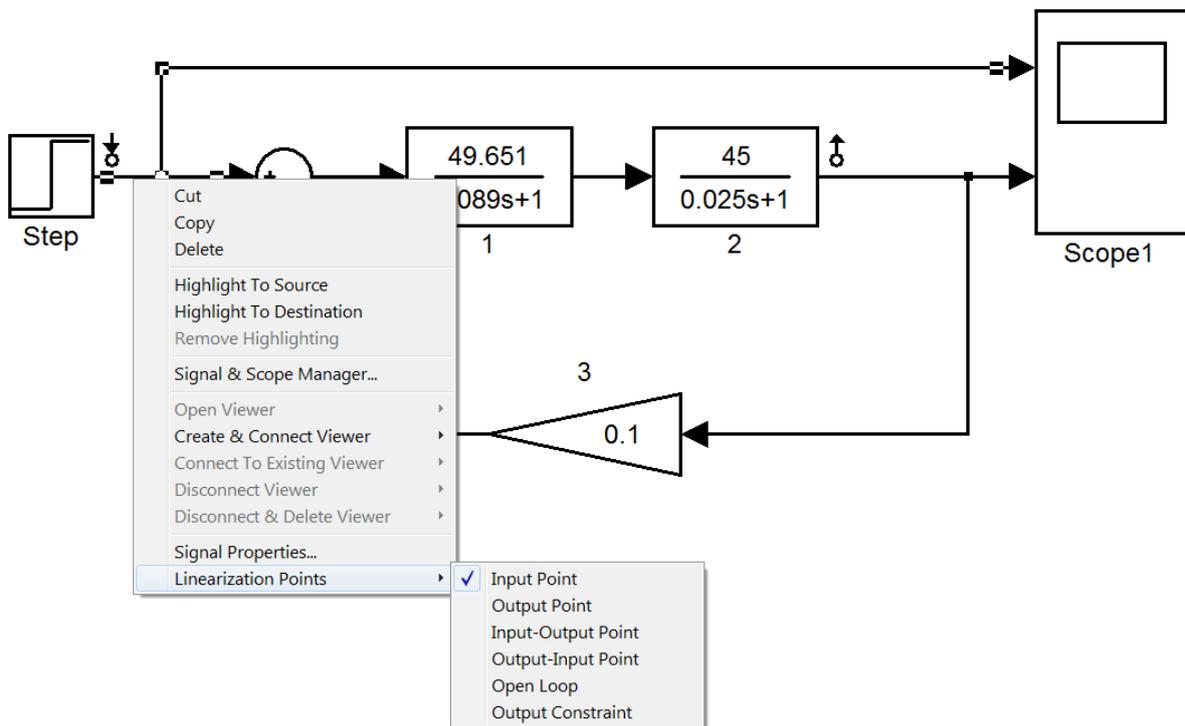


Рис.2.2. Фиксация входного и выходного сигналов.

После определения входной и выходной величин, необходимо запустить линейный анализ (рис 2.3).

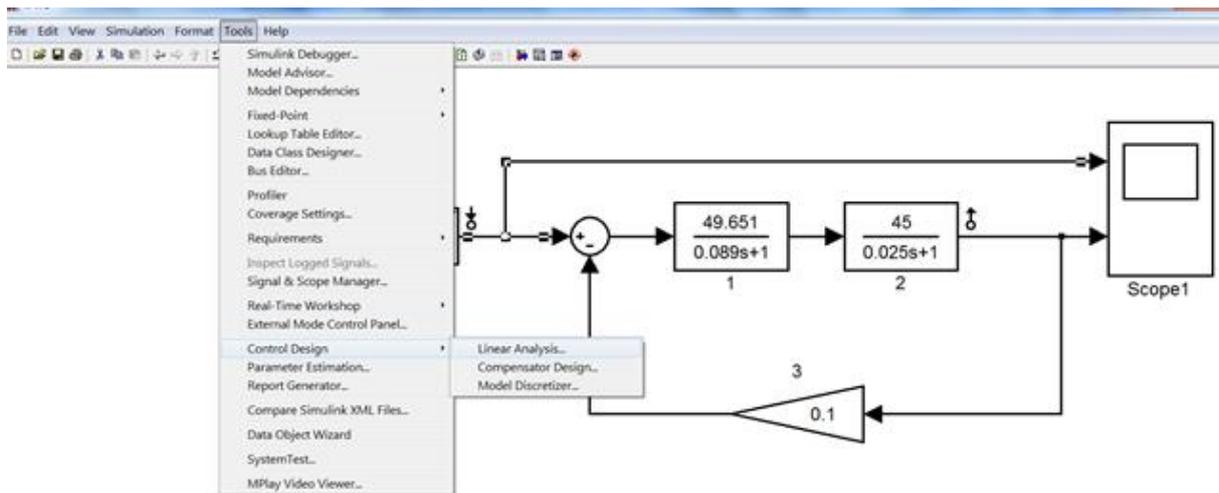


Рис.2.3. Запуск линейного анализа.

После запуска линейного анализа появляется форма, представленная на рис.2.4

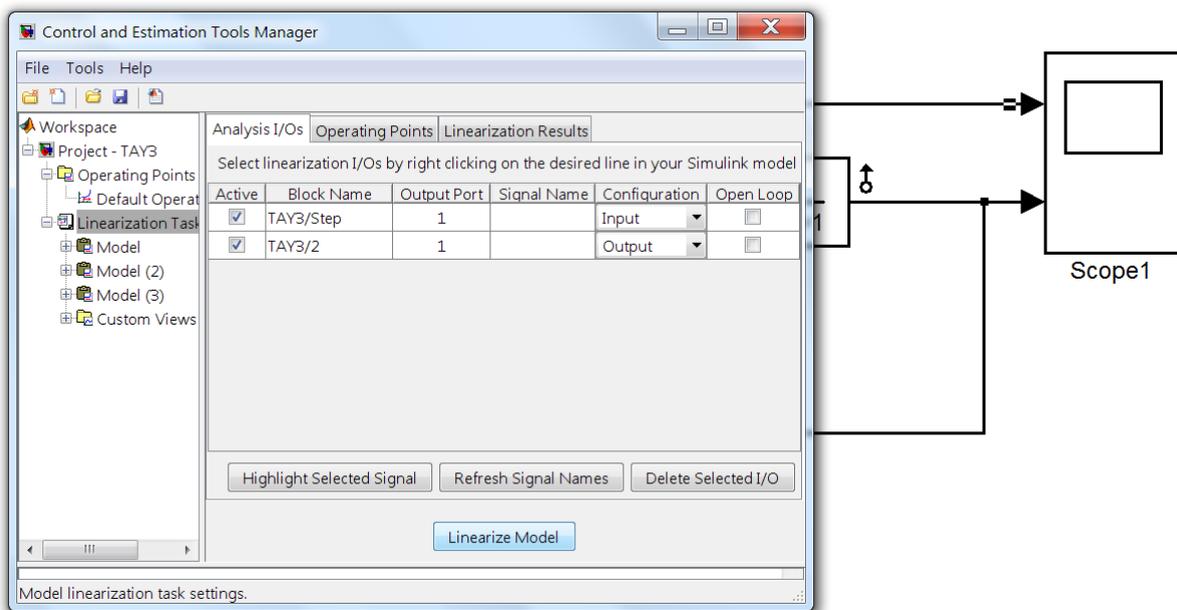


Рис.2.4. Форма для анализа.

Для расчёта характеристик при разных коэффициентах усиления необходимо:

- ✓ В модели (Рис.2.1) изменить коэффициентах усиления;
- ✓ Нажать на иконку «Linearize Model»

Результаты расчета для трех коэффициентов усиления представлены на рисунке 2.5.

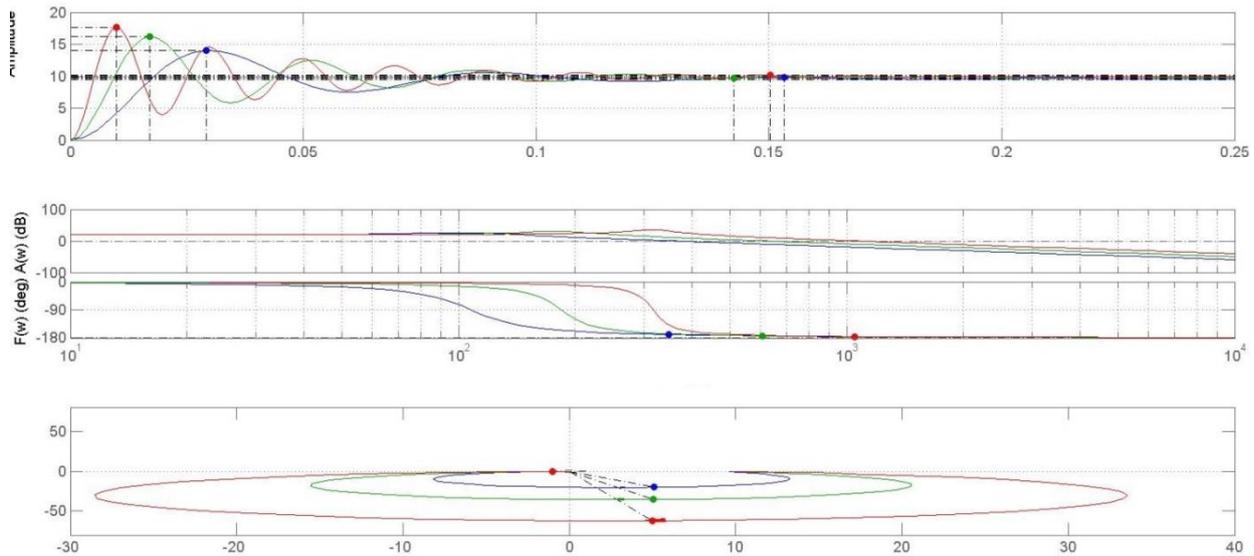


Рис.2.5.Результаты расчета для трех коэффициентов усиления

Для исследования динамических характеристик системы, при входном сигнале большем единице, необходимо собрать модель, представленную на рис.2.6.

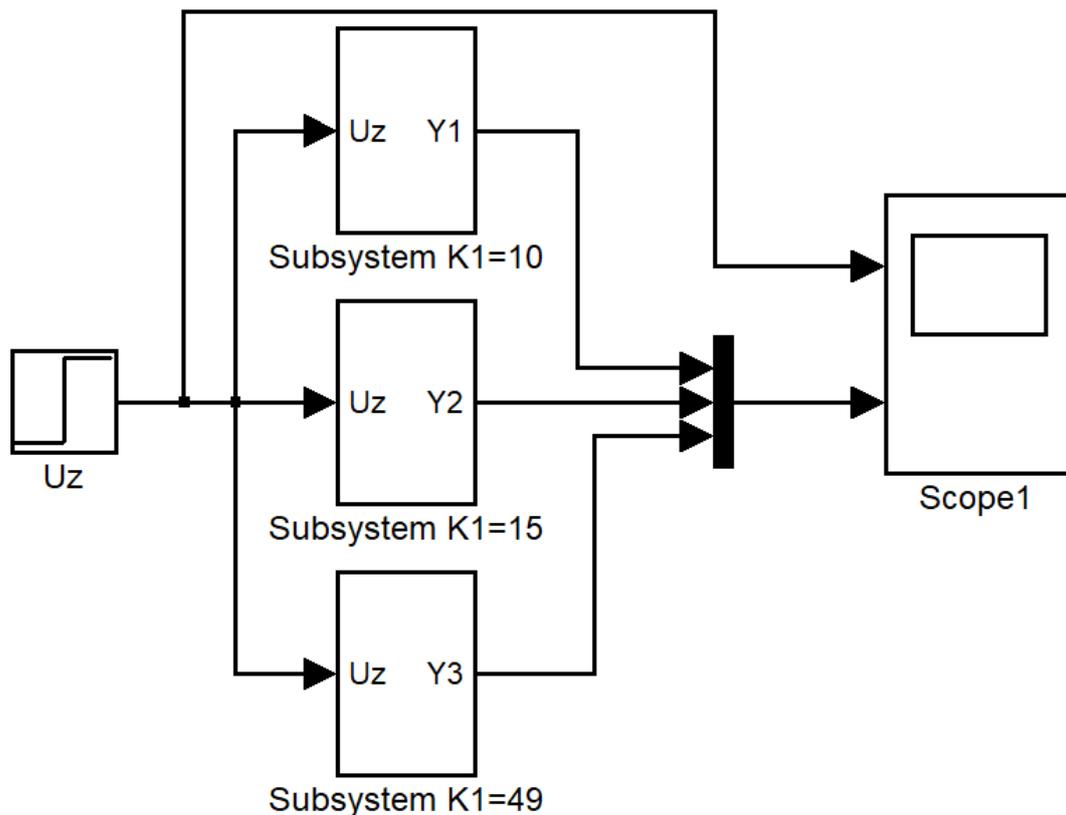


Рис.2.6. Модель для исследования динамических характеристик системы ($U_z=5$; $K_1=49, 15, 10$).

Модель subsystemы при $K1=10$ представлена на рис.2.7.

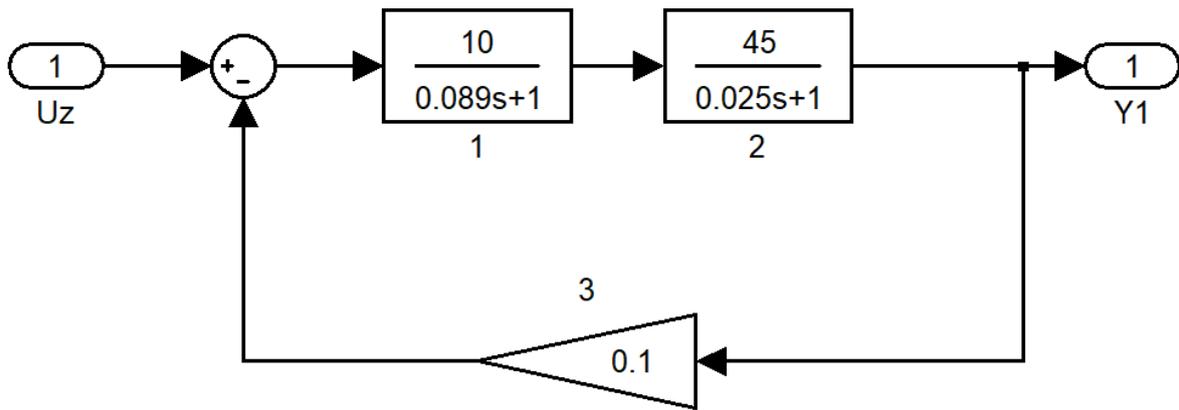


Рис.2.7. Модель subsystemы при $K1=10$.

Другие subsystemы (рис 2.6) имеют такой же вид, но другие значения $K1$.

Результаты моделирования представлены на рис.2.8.

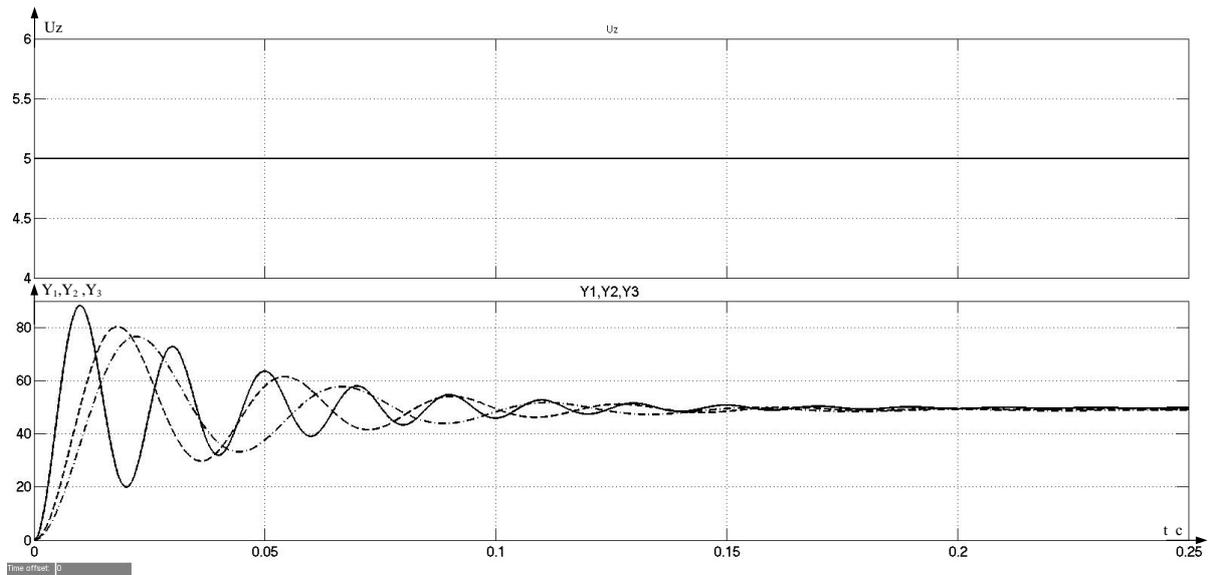


Рис.2.8. Динамические характеристики системы.

3. Задание

1. Для САУ, структурная схема которой показана на рис.2.9, получить выражения передаточной функции, частотной передаточной функции и частотных характеристик ($K(j\omega)$, $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$, $L(\omega)$).
2. Набрать модель разомкнутой САУ в MATLAB, структурная схема которой показана на рис.2.9, со следующими значениями

параметров: $K_1 = 1$; $T_1 = 0,1$; $K_2 = 5$; $T_2 = 0,05$; $K_3 = 10$; $T_3 = 0,8$; $\xi = 0,5$; $K_4 = 0,2$; $K_{oc} = 1$.

3. Построить ЛАЧХ, ФЧХ и АФЧХ разомкнутой системы.
4. Набрать модель замкнутой системы в MATLAB (рис.2.9). Пример модели показан на рис 2.10. Пример реализации передаточной функции форсирующего звена показан на рис.2.11. Получить выражения передаточных функций и частотных характеристик ($K_3(j\omega)$, $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$, $L(\omega)$) замкнутой системы.
5. Для разомкнутой системы (рис.2.9) построить асимптотические логарифмические характеристики.
6. Провести анализ частотных характеристик замкнутой САУ при изменении $K_1 = 1 \dots 10$;
- 7.

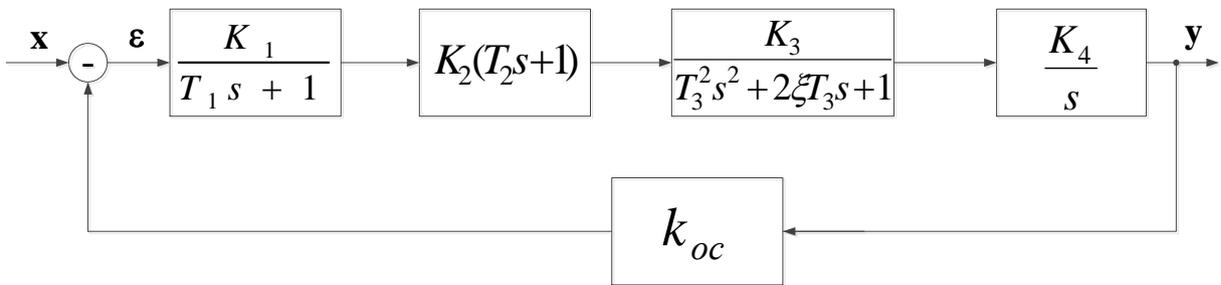


Рис.2.9. Система автоматического управления.

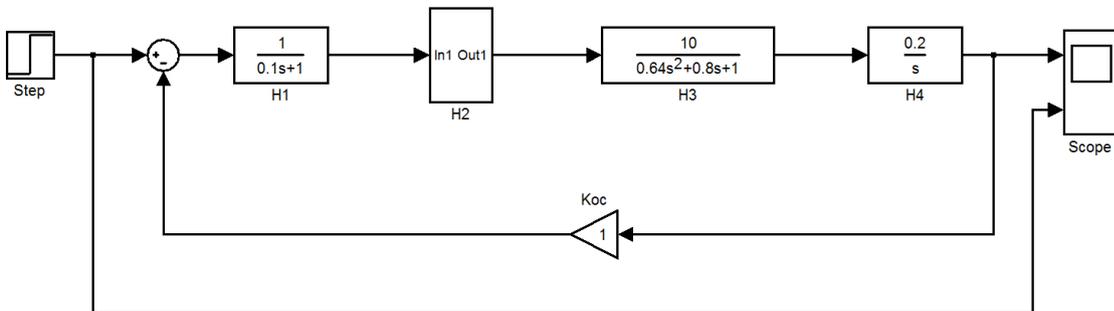


Рис.2.10. Модель системы автоматического управления.

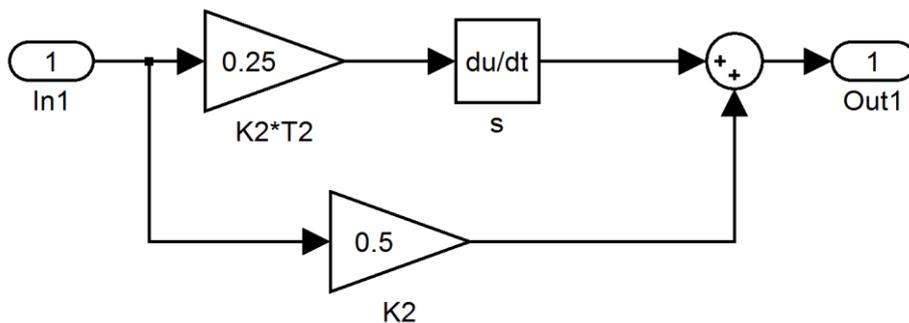


Рис.2.11. Пример реализации передаточной функции форсирующего звена.

4. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:

5. Заданные схемы с параметрами.
6. Построенные точные и асимптотические характеристики системы.
7. Программы (М-файл) для построения асимптотических и точных ЛАЧХ и ЛФЧХ и годографа;
8. Анализ частотных характеристик замкнутой САУ при изменении $K_1=1 \dots 10$;
9. Выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Как вычислить передаточные функции при последовательном и параллельном соединении звеньев?
2. Как определяются частотные характеристики различных соединений звеньев?
3. Как построить ЛАЧХ при последовательном соединении звеньев?
4. Каким образом выполняется приведение САУ к единичной обратной связи?
5. Как получить частотные характеристики САУ по передаточной функции?

Практическое занятие 3

Анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования с помощью критерия устойчивости Гурвица

Цель работы. Использование алгебраического критерия устойчивости Гурвица.

Для устойчивых систем необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения лежали слева от мнимой оси комплексной плоскости, то есть, были отрицательными. Если хотя бы один вещественный корень или пара комплексных сопряженных корней находится справа от мнимой оси, то система является неустойчивой. Если имеется нулевой корень или пара чисто мнимых корней, то система считается нейтральной (находящейся на границе устойчиво-

сти и неустойчивости). Таким образом, мнимая ось комплексной плоскости является границей устойчивости [1].

1. Критерий Гурвица.

Линейная система, характеристический полином которой равен

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_{n-1} s + \dots + a_n s^{n-1},$$

где $a_0 > 0$, устойчива, если положительны n главных определителей матрицы Гурвица:

$$\begin{array}{cccccc} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & a_n \end{array}$$

Для оценки устойчивости системы необходимо вычислить определители Гурвица Δ_i ($i = 1, 2, \dots, n$), которые получают из матрицы путем

отчёркивания равного числа строк и столбцов в левом верхнем углу матрицы.

Система устойчива, если $\Delta_i > 0$ для всех $i = 1, 2, \dots, n$.

Последний определитель Гурвица, как видно из приведенной выше матрицы, равен

$$\Delta_n = a_n \times \Delta_{n-1}.$$

Поэтому его положительность сводится при $\Delta_{n-1} > 0$ к условию $a_n > 0$,

Для систем первого и второго порядка критерий Гурвица сводится просто к положительности коэффициентов a_i .

Рассмотрим исследование системы (рис.3.1) с параметрами, приведёнными в таблице 3.1.

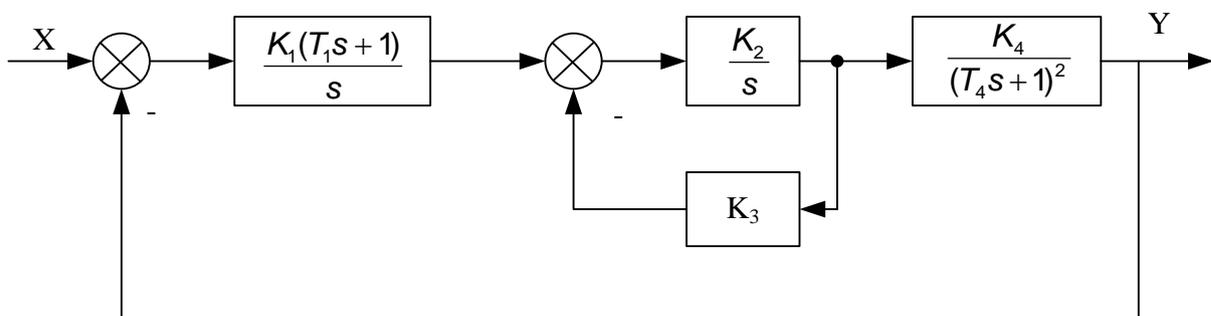


Рис. 3.1. Структурная схема САП

Таблица 3.1

K_1	K_2	K_3	K_4	$T_1(\text{сек})$	$T_4(\text{сек})$
3	3	20	5	0.25	0.15

После упрощения получим следующую САР (Рис. 3.2).

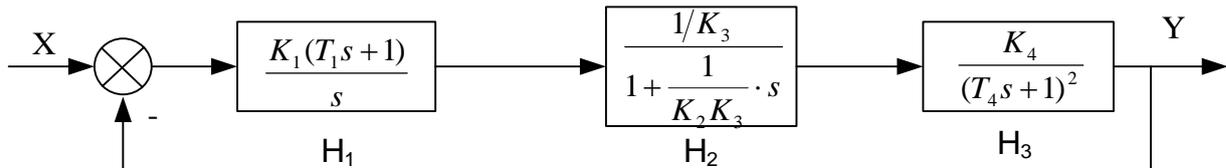


Рис. 3.2. Структурная схема преобразованной САР

Вычислим в системе MatLab передаточные функции САР разомкнутой и замкнутой системы и передаточную функцию по ошибке. Код программы представлен на рис.3.3.

```

%Вычисление передаточной функций
K1=3;K2=3;K3=20;K4=5;T1=0.25;T4=0.15; % Ввод данных.
H1=tf([K1*T1 K1],[1 0]); % вычисление передаточной функции H1.
H2=feedback(tf(K2,[1 0]),tf(K3));% вычисление передаточной функции
H2.
H3=tf(K4,[T4*T4 2*T4 1]);% вычисление передаточной функции H3.
H=H1*H2*H3 % вычисление передаточной функции разомкнутой си-
стемы H.
Hz=feedback(H,1)% вычисление передаточной функции разомкнутой
системы Hz.
He=feedback(1,H)% вычисление передаточной функции системы по
ошибке He.

```

Рис.3.3. Код программы для вычисления передаточных функций.

$$H = \frac{11.25 s + 45}{0.0225 s^4 + 1.65 s^3 + 19 s^2 + 60 s};$$

$$H_z = \frac{11.25 s + 45}{0.0225 s^4 + 1.65 s^3 + 19 s^2 + 71.25 s + 45};$$

$$H_e = \frac{0.0225 s^4 + 1.65 s^3 + 19 s^2 + 60 s}{0.0225 s^4 + 1.65 s^3 + 19 s^2 + 71.25 s + 45}.$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид:

$$0,0225s^4 + 1,65s^3 + 19s^2 + 71.25s + 45 = 0$$

Определим устойчивость системы в замкнутом состоянии, критический коэффициент усиления, построим область устойчивости в плоскости параметров K_1 и T_1 .

Определим устойчивость системы, используя алгебраический критерий Гурвица, для этого составим матрицу с коэффициентами характеристического уравнения.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1,65 & 71,25 & 0 & 0 \\ 0,0225 & 19 & 45 & 0 \\ 0 & 1,65 & 71,25 & 0 \\ 0 & 0,0225 & 19 & 45 \end{vmatrix}$$

Необходимое условие: $a_0=0,0225 > 0$; $a_1=1,65 > 0$; $a_2=19 > 0$; $a_3=71,25 > 0$; $a_4=45 > 0$.

Для того чтобы проверить достаточное условие необходимо провести вычисление миноров матрицы. Проведем вычисление с помощью Matlab. Код программы представлен на рис 3.4

`%Вычисление миноров матрицы выполним с помощью Matlab`

```
M=[1.65 71.25 0 0;0.0225 19 45 0;0 1.65 71.25 0;0
0.0225 19 45]
M1=M(1,1)
M2=M(1:2,1:2)
M3=M(1:3,1:3)
D1=det(M1)
D2=det(M2)
D3=det(M3)
```

Рис. 3.4. Вычисление миноров матрицы.

Результаты вычислений представлены ниже:

$$M1 = 1.6500$$

$$M2 =$$

$$1.6500 \quad 71.2500$$

$$0.0225 \quad 19.0000$$

$$M3 =$$

$$1.6500 \quad 71.2500 \quad 0$$

$$0.0225 \quad 19.0000 \quad 45.0000$$

$$0 \quad 1.6500 \quad 71.2500$$

$$D1 = 1.6500$$

$$D2 = 29.7469$$

$$D3 = 1.9970e+003$$

Достаточные условия выполняются, так как все определители ($D_i > 0$). Из выше сказанного можно сделать вывод, что система устойчива.

Определим критический коэффициент усиления для этой системы.

Запишем характеристическое уравнение замкнутой системы и выделим в передаточной функции (ПФ) системы коэффициент усиления.

$$0,0225s^4 + 1,65s^3 + 19s^2 + (60 + k * 0.25)s + k = 0$$

Найдем $K_{кр}$ из условия, что $\Delta_3 = 0$. Составим определитель:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1,65 & 60 + 0.25K & 0 \\ 0,0225 & 19 & K \\ 0 & 1,65 & 60 + 0.25K \end{vmatrix}$$

Код программы для вычисления $K_{кр}$ в Matlab представлен на рис.3.5:

```
% Определение Kкр;
```

```
syms k
```

```
MM=[1.65 k*0.25+60 0;0.0225 19 k;0 1.65 k*0.25+60] % формирование определителя;
```

```
P=det(MM) % вычисление;
```

```
Pk=sym2poly(P) % определение коэффициентов;
```

```
Kкр=roots(Pk) % вычисление Kкр;
```

Рис.3.5. Код программы для вычисления $K_{кр}$.

Результаты расчета представлены ниже.

$$MM =$$

$$[33/20, k/4 + 60, \quad 0]$$

$[9/400, \quad 19, \quad k]$
 $[\quad 0, \quad 33/20, k/4 + 60]$
 $P = - (9*k^2)/6400 + (111*k)/25 + 1800$
 $Pk = 1.0e+003 *$
 $\quad -0.0000 \quad 0.0044 \quad 1.8000$
 $Kkr = 1.0e+003 *(3.5209 \quad -0.3635)$
 $K_{кр}=3520,9.$

Построим область устойчивости в плоскости параметров K_1 и T_1
 Запишем ПФ разомкнутой системы без определения параметров K_1 и T_1

$$H = \frac{15K_1(T_1s + 1)}{0.0225s^4 + 1.65s^3 + 19s^2 + 60s}$$

Получим следующее характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$0.0225s^4 + 1.65s^3 + 19s^2 + s(60 + 15K_1T_1) + 15K_1=0$$

Обозначим коэффициенты характеристического уравнения a_0 ;

a_1 ; a_2 ; a_3 ; a_4 :

$a_0=0.0225 > 0$; $a_1=1.65 > 0$; $a_2=19 > 0$; $a_3 =60+15K_1T_1 > 0$; $a_4=15K_1 > 0$.

Для определения границы устойчивости приравняем определитель к нулю.

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1,65 & 60 + 15K_1T_1 & 0 \\ 0,0225 & 19 & 15K_1 \\ 0 & 1,65 & 60 + 15K_1T_1 \end{vmatrix} = 0$$

Решим уравнением с помощью системы Matlab. Код программы представлен на рис3.5.

```

syms K1 T1;
Mn1=[1.65 60+15*K1*T1 0; 0.0225 19 15*K1; 0 1.65 60+15*K1*T1]
D=det(Mn1)
K=solve(D,'K1')
pretty(K)

```

Рис.3.6. Код программы для вычисления.

Результаты вычисления:

```

Mn1 =
[ 33/20, 15*K1*T1 + 60,      0]
[ 9/400,      19,      15*K1]

```

$$[\quad 0, \quad 33/20, 15*K1*T1 + 60]$$

$$D = - (81*K1^2*T1^2)/16 + (1719*K1*T1)/4 - (3267*K1)/80 + 1800$$

$$K =$$

$$-(80*((43681*T1^2)/16 - (69333*T1)/160 + 131769/6400))^{(1/2)} -$$

$$3820*T1 + 363)/(90*T1^2)$$

$$(3820*T1 + 80*((43681*T1^2)/16 - (69333*T1)/160 +$$

$$131769/6400))^{(1/2)} - 363)/(90*T1^2)$$

$$\frac{-3820 T_1 + 80 \sqrt{\frac{43681 T_1^2}{16} - \frac{69333 T_1}{160} + \frac{131769}{6400}} + 363}{90 T_1^2}$$

$$\frac{3820 T_1 + 80 \sqrt{\frac{43681 T_1^2}{16} - \frac{69333 T_1}{160} + \frac{131769}{6400}} - 363}{90 T_1^2}$$

Выполним построение области устойчивости в плоскости параметров K1 и T1 в системе Matlab. Код программы для построения области устойчивости представлен на рис.3.7.

```
t=0.05:0.05:10;
k=subs((3820*T1 + 80*((43681*T1^2)/16 - (69333*T1)/160 +
131769/6400)^(1/2) - 363)/(90*T1^2),t);
area(t, k); xlabel('T1'); ylabel('K1'); grid on
```

Рис.3.7. Код программы для построения области устойчивости.

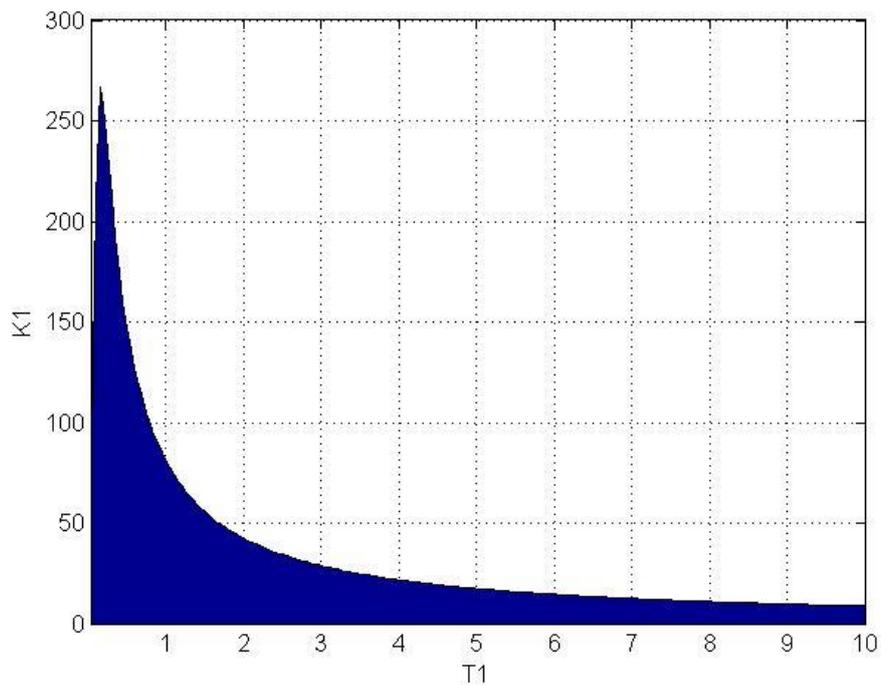


Рис. 3.8. Область устойчивости

Закрашенная область, есть область устойчивости в плоскости параметров K_1 и T_1 .

Таблица 3.2.

№	K_1	K_2	K_3	K_4	T_1 (сек)	T_4 (сек)
1	30	3	10	3	1	0.15
2	40	2	5	4	0.75	0.1
3	50	3	15	5	0.25	0.2
4	75	3	18	6	0.75	0.35
5	100	1	20	1	0.25	0.45
6	5	3	25	2	0.15	0.15
7	10	4	20	5	3	0.55
8	15	2	10	8	0.25	0.15
9	15	3	2	7	1.25	0.65
10	18	5	20	5	0.55	0.25

2. Содержание отчета.

1. Домашнее задание.
2. Модель (рис. 3.1.) САР. Вариант задается преподавателем (Таблица 3.2.).
3. Анализ устойчивости системы в замкнутом состоянии.
4. Вычисленный критический коэффициент усиления.
5. Область устойчивости в плоскости параметров K_1 и T_1 .
6. Выводы.

3. Контрольные вопросы

1. Понятие устойчивости автоматической системы.
2. Необходимое и достаточное условия устойчивости.
3. Критерий устойчивости Гурвица.
4. Определение запаса устойчивости автоматической системы.
5. Как определить критический коэффициент усиления?

Практическое занятие 4

Анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования с помощью частотных критериев устойчивости

Цель работы. Использование критериев устойчивости Найквиста и Михайлова. Исследование влияния параметров систем на их устойчивость.

Содержание работы.

1. Домашнее задание.

1.1. По передаточной функции разомкнутой системы записать ее характеристический полином $D(s)$, определить его коэффициенты, выделить мнимую и вещественную составляющие.

1.2. Без применения программных инструментов построить асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ для передаточных функций:

$$H(s) = 100 \frac{0,02s + 1}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,2s + 1)}; \quad H(s) = 10 \frac{4s + 1}{0.1s + s};$$

1.3. Для передаточных функций $H(s)$ вывести передаточные функции соответствующих замкнутых систем $H_{\text{зам}}(s)$.

2. Примеры использования критериев устойчивости Найквиста и Михайлова.

Рассмотрим анализ устойчивости системы с помощью критерия устойчивости Михайлова.

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$H(s) = \frac{12}{0,02s^4 + 0,25s^3 + s^2 + 5s + 12};$$

Код программы для расчета годографа Михайлова представлен на рис 4.1

```
%Расчет годографа Михайлова
k = 12;
a0 = 0.02;
a1 = 0.25;
a2 = 1;
a3 = 5;
for w=0.01:0.01:7
    Njw=a0*((w*i)^4) + a1*((w*i)^3) + a2*((w*i)^2) + a3*(w*i) + k; %
    диапазон изменения частоты;
    Re = real(Njw);
    Im = imag(Njw);
    plot(Re, Im, 'x')
    hold on
end
hold off
grid on
axis([-20 20 -20 20])
```

Рис 4.1.Код программы для расчета годографа Михайлова.

Годограф Михайлова представлен на рис.4.2.

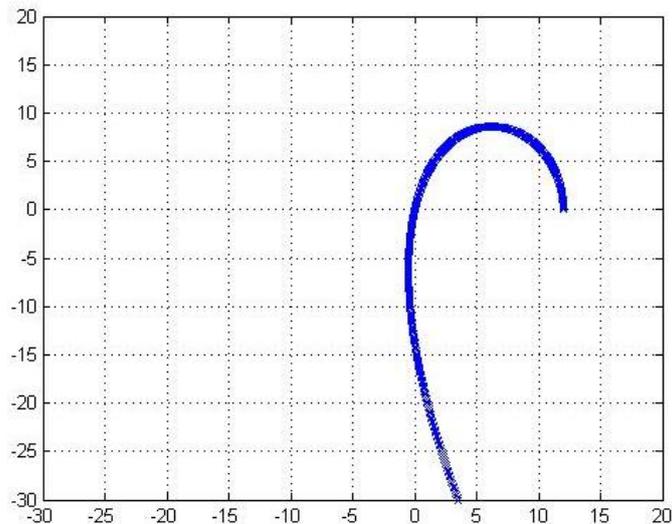


Рис. 4.2. Годограф Михайлова.

Для исследования влияния коэффициента усиления или постоянной времени системы на устойчивость (положение кривой Михайлова на комплексной плоскости) можно использовать программу, представленную на рис.4.3.

```
%Расчет годографа Михайлова
for k1=1:1:3
k = 6*k1; % изменение коэффициента усиления;
a0 = 0.02;
a1 = 0.25;
a2 = 1;
a3 = 5;
for w=0.01:0.01:10% диапазон изменения частоты;
    Njw=a0*((w*i)^4) + a1*((w*i)^3) + a2*((w*i)^2) + a3*(w*i) + k;
    Re = real(Njw);
    Im = imag(Njw);
    plot(Re, Im, 'x')
    hold on
end
end
hold off
grid on
axis([-20 20 -30 20])
```

Рис.4.3. Построение годографа Михайлова при изменении коэффициента усиления

Годограф Михайлова при изменении коэффициента усиления представлен на рис.4.4

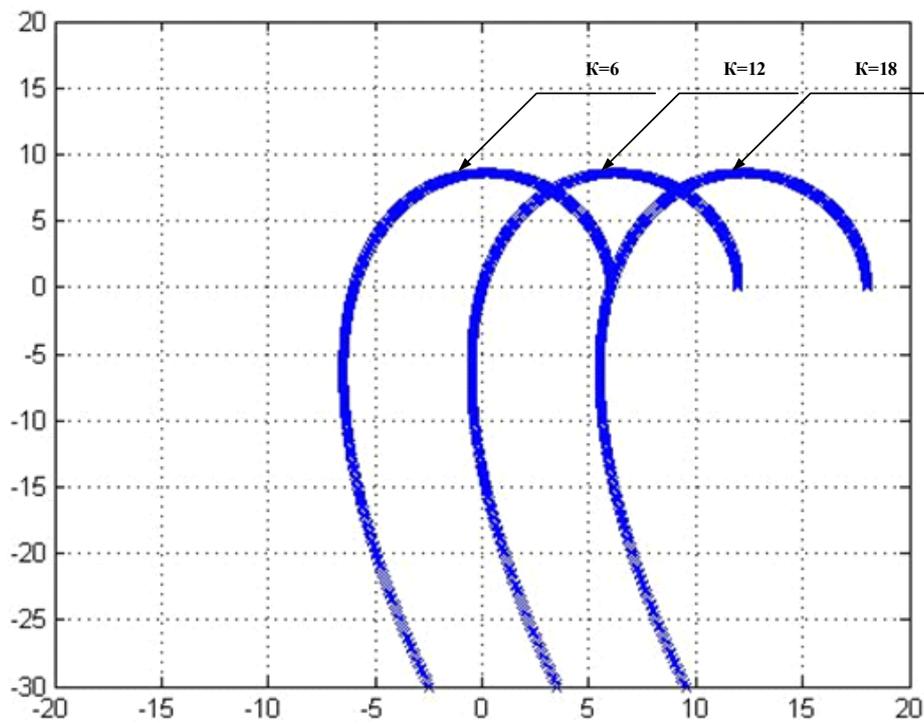
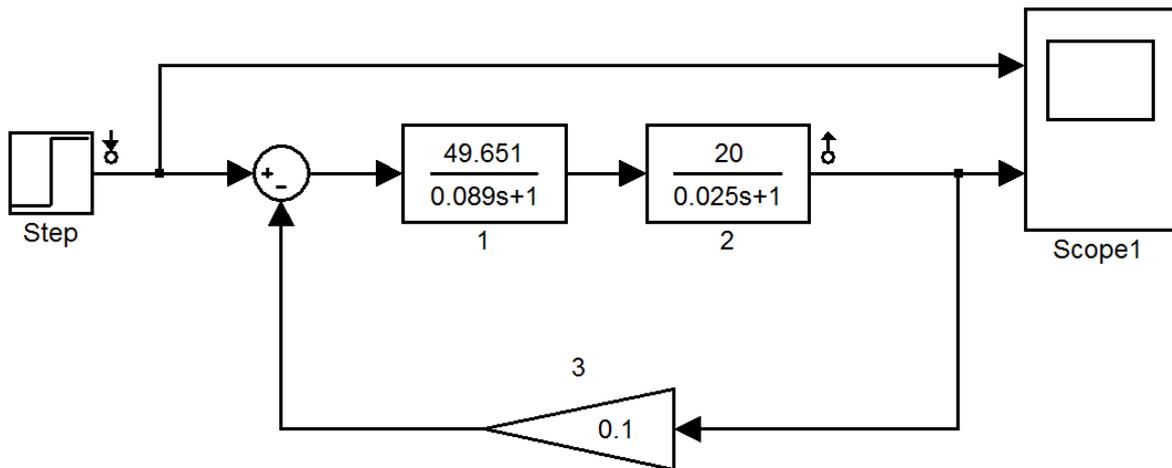


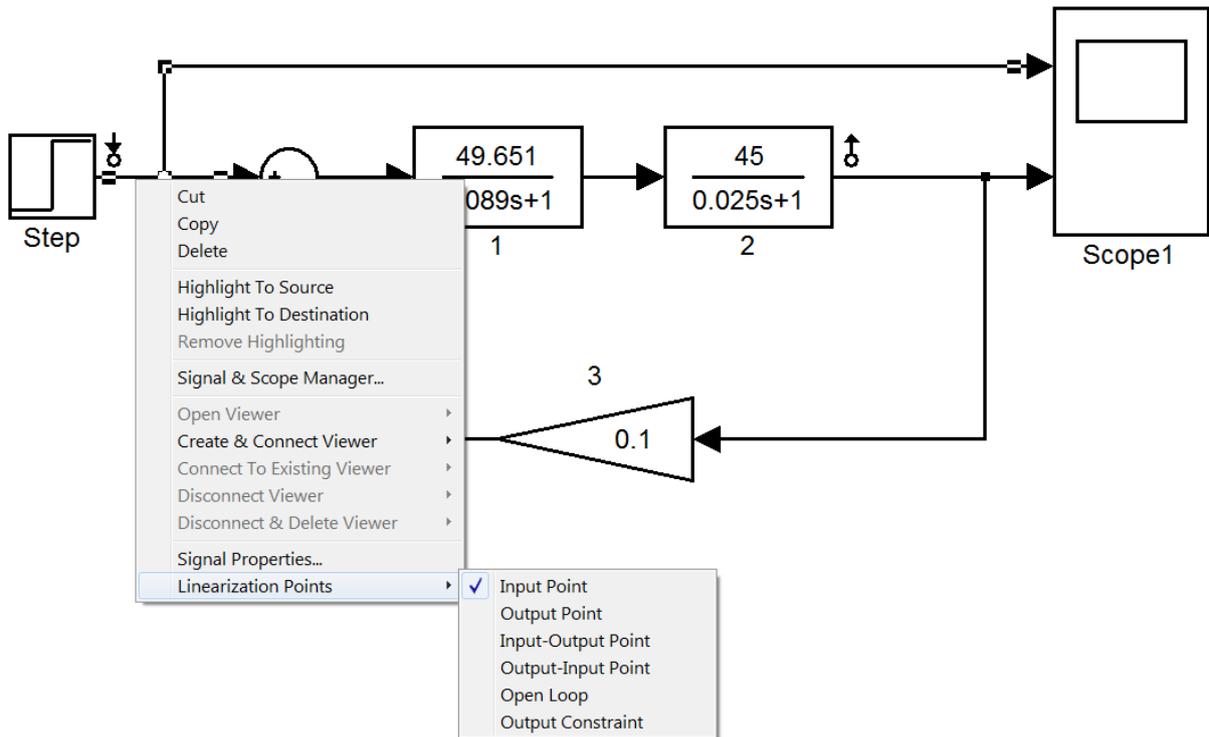
Рис.4.4. Годограф Михайлова при изменении коэффициента усиления

Рассмотрим анализ устойчивости системы с помощью критерия устойчивости Найквиста.

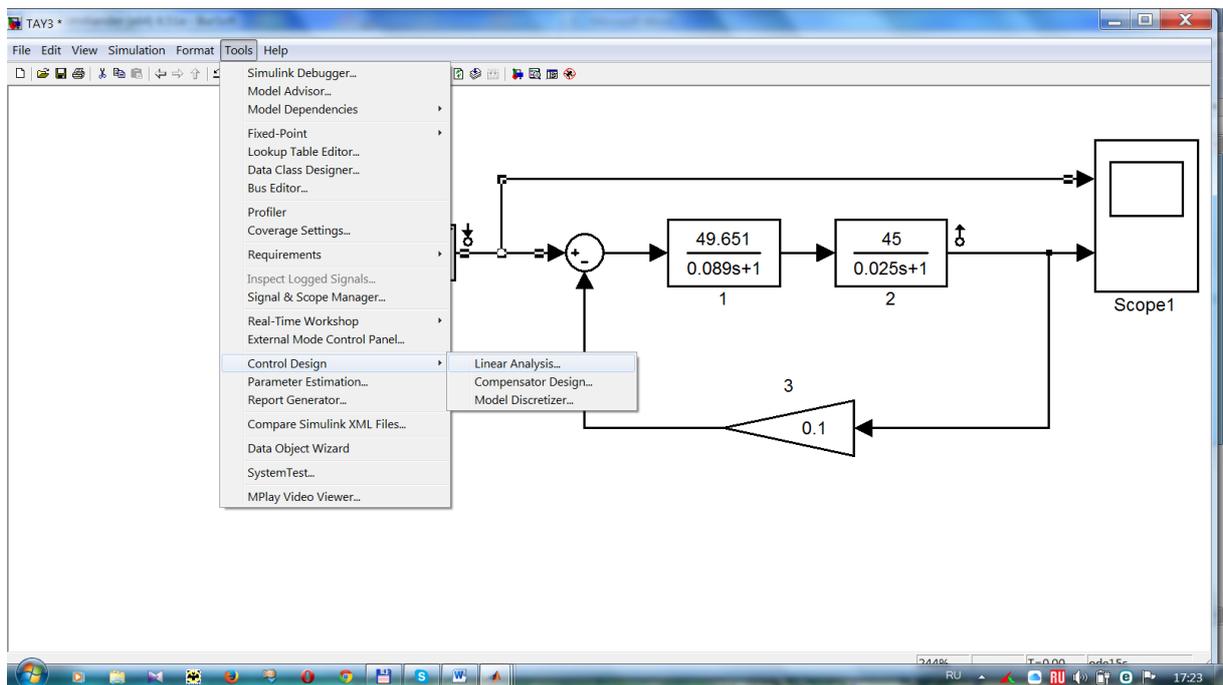
1. Набрать схему системы.



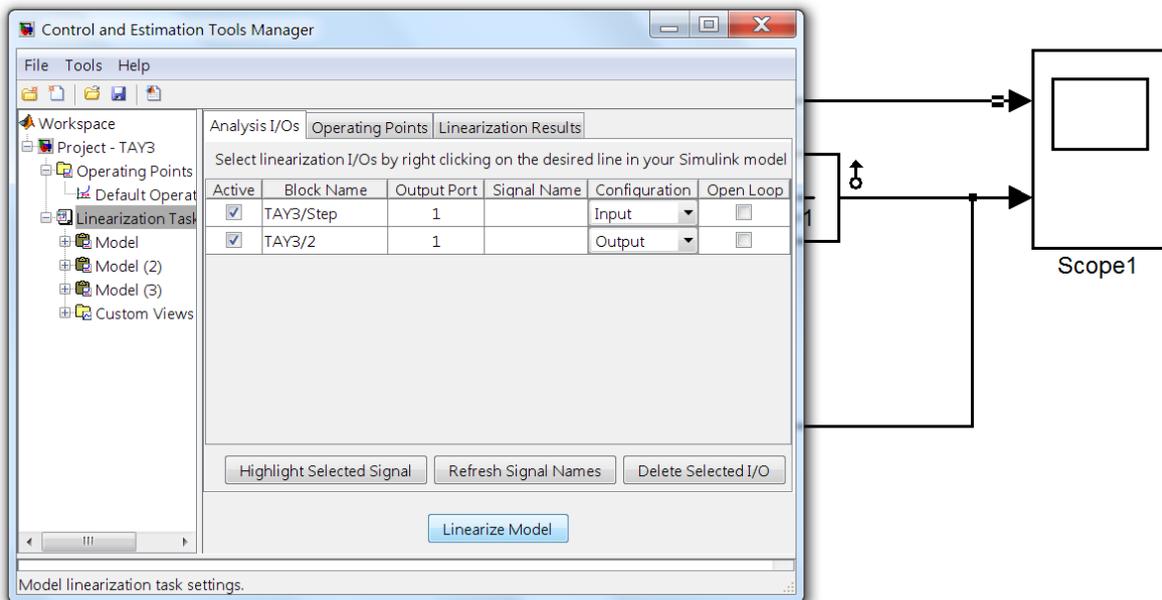
2. Указать на схеме входную и выходную величины.



3. Запустить линейный анализ.



4. Провести линейный анализ.



5. Полученные характеристики для разных коэффициентов усиления.

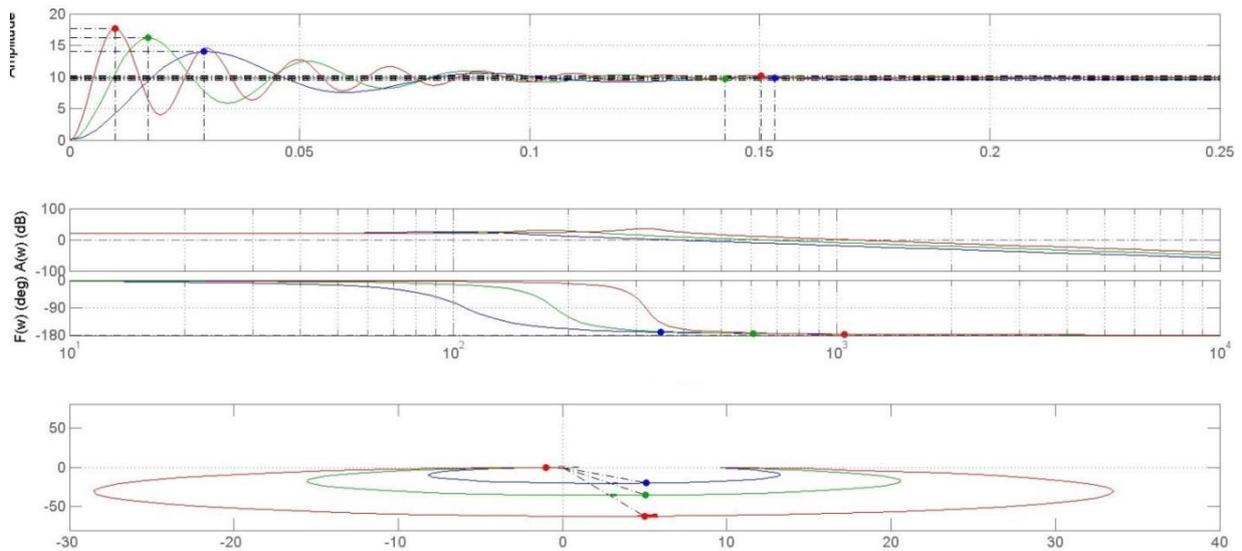


Рис.4.5. Характеристики системы при изменении коэффициента усиления

3. Задание

2.1. Исследовать на устойчивость замкнутую систему, охваченную единичной отрицательной обратной связью (таблица 4.1), применяя критерий устойчивости Михайлова.

2.2. Изучить влияние коэффициента усиления и постоянных времени на устойчивость системы и вид годографа Михайлова.

2.5. Исследовать на устойчивость замкнутую систему, охваченную единичной отрицательной обратной связью, применяя годограф Найквиста и логарифмические частотные характеристики.

Передаточные функции разомкнутой системы приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№	Передаточная функция разомкнутой системы
1	$H(s) = \frac{10(0,01s + 1)}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,2s + 1)};$
2	$H(s) = \frac{50(0,04s + 1)}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,3s + 1)};$
3	$H(s) = \frac{150}{s(s + 1)(0,2s + 1)^2};$
4	$H(s) = \frac{50(0,2s + 1)}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,9s + 1)};$
5	$H(s) = \frac{10}{s(0,5s + 1)(s + 1)^2};$
6	$H(s) = \frac{10(0,01s + 1)}{s(0,1s + 1)(s + 1)^2};$

4. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:

1. Домашнее задание.
2. Передаточную функцию, записанную в виде произведения типовых динамических звеньев (нулей и полюсов её числителя и знаменателя).
3. Анализ влияние коэффициента усиления и постоянных времени на устойчивость системы и вид годографа Михайлова.
4. Исследование на устойчивость с помощью критерия Найквиста.
5. Построенные логарифмические частотные характеристики с определёнными запасами устойчивости по амплитуде и фазе.
6. Выводы.

4. Контрольные вопросы

6. Понятие устойчивости автоматической системы. Необходимое и достаточное условия устойчивости.
7. Определение устойчивости автоматической системы по частотной передаточной функции. Алгебраические критерии устойчивости.
8. Критерий устойчивости Гурвица.
9. Критерий устойчивости Михайлова.
10. Формулировка и графическая иллюстрация критерия устойчивости Найквиста.
11. Показатель колебательности. Оценка запаса устойчивости по частотным передаточным функциям.
12. Определение запаса устойчивости автоматической системы по амплитудно-фазовой характеристике. Запас устойчивости по амплитуде и по фазе.

Практическое занятие 5

Синтез систем автоматического регулирования

Цель работы. Изучение метода логарифмических частотных характеристик и программных методов для синтеза САР.

1. Содержание работы.

Структура автоматической системы, для которой выполняется синтез корректирующего устройства, показана на рис.5.1. Для каждого варианта (табл.5.1) задана передаточная функция объекта управления $H_0(s)$.

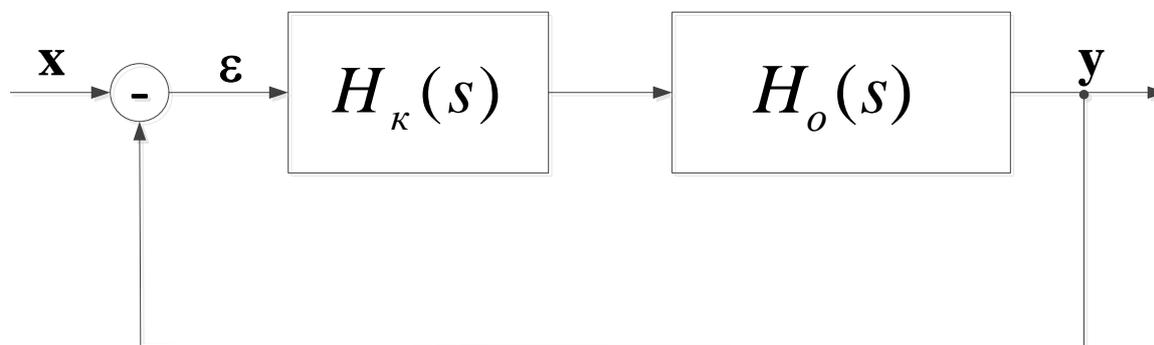


Рис.5.1. Структурная схема системы с последовательным корректирующим устройством.

Желаемыми показателями качества системы для всех вариантов являются первый порядок астатизма и перерегулирование не более 5%. Желаемое время максимума t_m различно для каждого варианта (см. табл.5.1). Необходимо найти такую передаточную функцию корректирующего устройства $H_k(s)$, при которой обеспечивались бы заданные показатели качества.

Таблица 5.1

Исходные данные к работе

Вариант	$H_o(s)$	t_m, c
1	$\frac{0.5}{(0.5s+1)(0.01s+1)}$	0.1
2	$\frac{0.1}{(s+1)s}$	0.5
3	$\frac{2}{(1.5s+1)s}$	0.3
4	$\frac{5}{(2s+1)(0.5s+1)}$	0.4
5	$\frac{0.02}{(0.8s+1)^2}$	0.2

Желаемая асимптотическая ЛАЧХ разомкнутой системы $L_{ж}(\omega)$, которая обеспечивает выполнение предъявляемых к системе требований, представлена на рис.5.2.

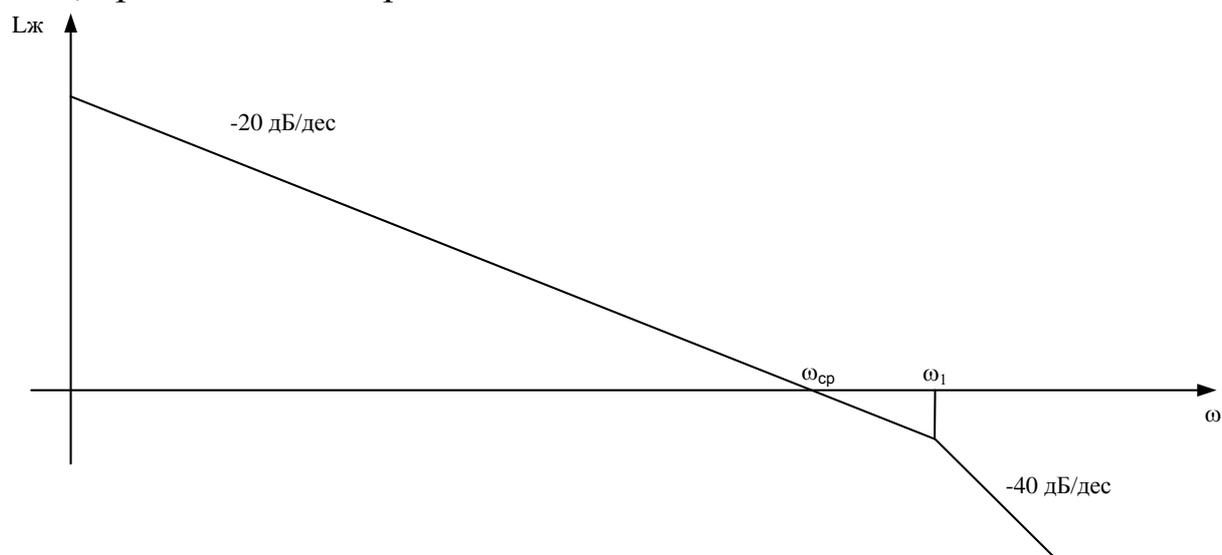


Рис.5.2. Желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы

Наклон низкочастотного участка ЛАЧХ «-20 дБ/дек» обеспечивает первый порядок астатизма. Небольшое перерегулирование (не

более 5%) обеспечивается определенным удалением сопрягающей частоты ω_1 от частоты среза ω_{cp} . Рекомендуется принять $\omega_1 = 2\omega_{cp}$ (т.е. настройка на модульный оптимум). Выбор частоты среза определяет время максимума переходной функции в соответствии с формулой

$$\omega_{cp} = \frac{\pi}{t_m}.$$

Пример расчета.

Располагаемая передаточная функция объекта:

$$H_{зад}(s) = \frac{300}{s \cdot (T_2s + 1)(T_3s + 1)} \quad T_2 > T_3 \quad T_2 = 0.1c \quad T_3 = 0.001c$$

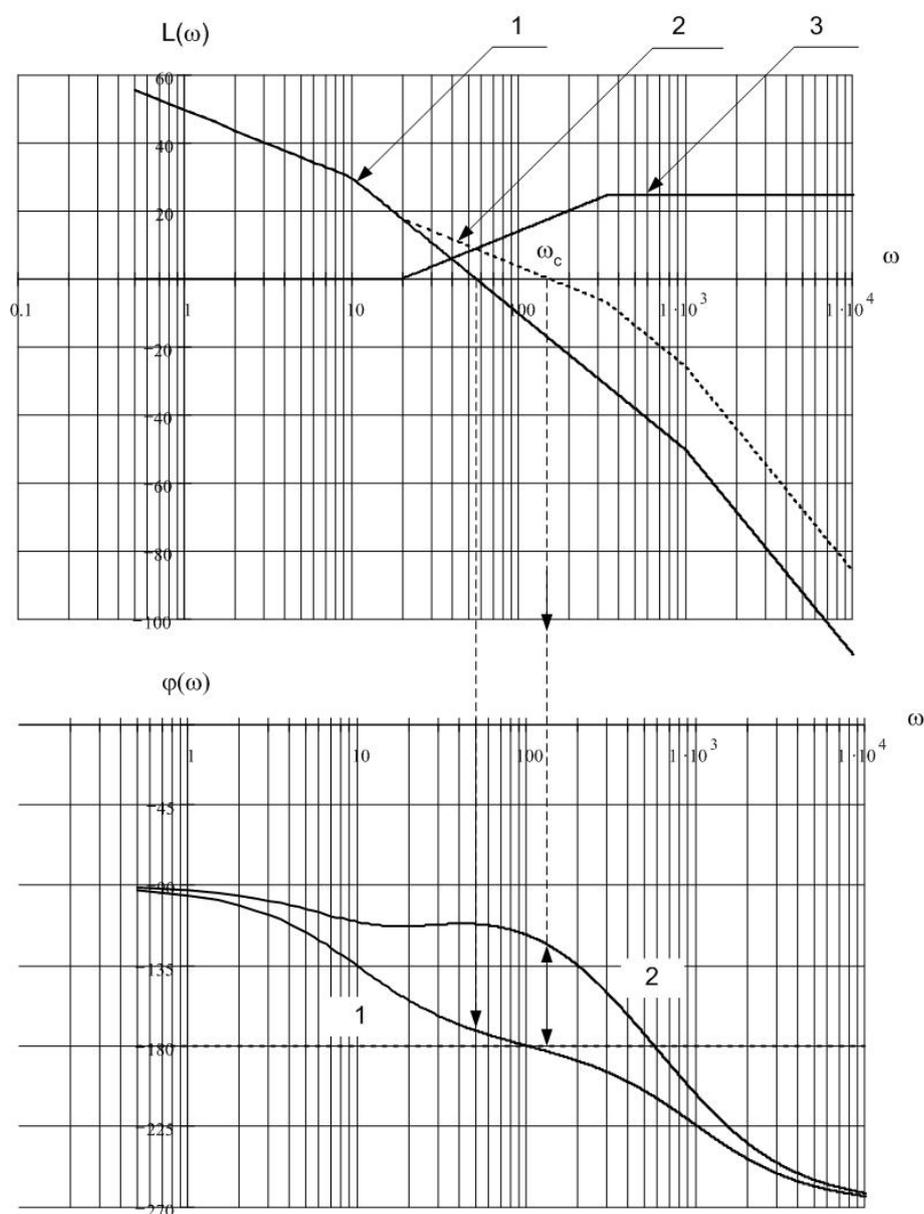


Рис.5.3. ЛЧХ: желаемая, объекта и корректирующего звена разомкнутой системы.

На рис 5.3 представлены следующие кривые:

1-ЛАЧХ и ЛФЧХ объекта;

2-желаемые ЛАЧХ и ЛФЧХ;

3-ЛАЧХ корректирующего звена ($L_{\text{жел.}} - L_{\text{об.}}$)

На рис 5.4 представлены переходные характеристики для скорректированной системы (1) и объекта (2):

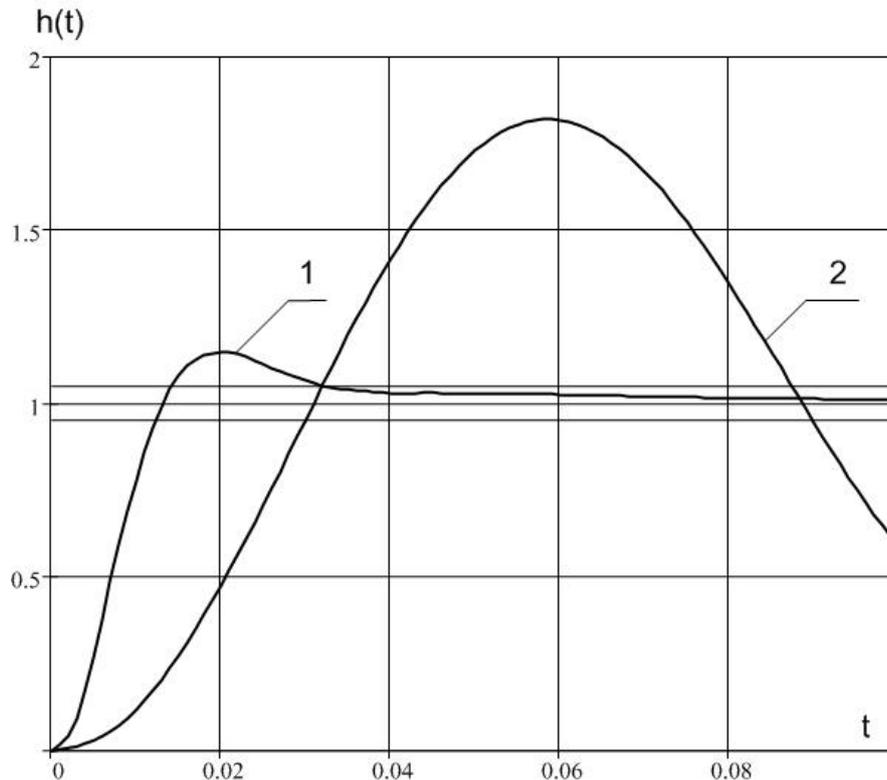
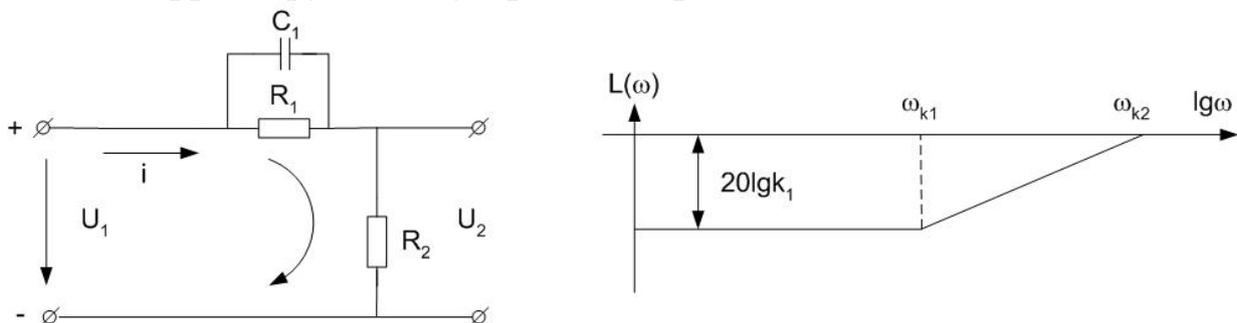


Рис 5.4. Переходные характеристики для скорректированной системы (1) и объекта (2)

Расчет корректирующего устройства представлен ниже:



По таблице выбираем корректирующее устройство и рассчитываем его параметры.

$$H(s) = \frac{k_1(T_1s + 1)}{T_2s + 1} \quad T_1 = R_1C_1 \quad T_2 = k_1T_1$$

$$20\lg k_1 = 20\lg \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad T_1 = \frac{1}{\omega_{k1}} = R_1 C_1 \quad T_2 = k_1 T_1 = \frac{1}{\omega_{k2}}$$

2. Задание

В расчетной части выполняется синтез корректирующего устройства ручным способом (без использования компьютера).

- 1) Постройте желаемую ЛАЧХ разомкнутой системы $L_{ж}(\omega)$.
- 2) Постройте ЛАЧХ объекта управления $L_o(\omega)$ на одной координатной плоскости с $L_{ж}(\omega)$.
- 3) Путем вычитания графиков определите ЛАЧХ корректирующего устройства:

$$L_k(\omega) = L_{ж}(\omega) - L_o(\omega).$$

- 4) По полученной ЛАЧХ корректирующего устройства определите его передаточную функцию $H_k(s)$. Она должна получиться физически реализуемой (порядок числителя не превышает порядка знаменателя).

После определения ЛАЧХ корректирующего устройства необходимо выполнить проверку, путем моделирования. В Matlab набираем схему модели системы (рис.5.1) с найденной передаточной функцией корректирующего устройства. Результаты моделирования системы, должны соответствовать заданию. Если это не так, необходимо проверить правильность выполнения предыдущих этапов.

3. Содержание отчета.

Отчет по работе должен содержать

1. название и цель работы;
2. постановку задачи синтеза и исходные данные;
3. графики ЛАЧХ (процесс синтеза) выполненные на миллиметровой бумаге;
4. найденную передаточную функцию корректирующего устройства (результат синтеза) и элемент, с помощью которого его можно реализовать;
5. схему модели системы;
6. график переходной функции, полученной путем моделирования;
7. выводы.

4. Контрольные вопросы

1. Какие вам известны способы включения корректирующих устройств в САУ?
2. Как влияет регулирование по производным от ошибки на динамические показатели САУ в различных режимах регулирования?
3. Какие существуют виды обратных связей?
4. Как влияют обратные связи на показатели качества САУ?
5. Как выполнить расчет эквивалентной обратной связи?
6. Что такое комбинированное управление в САУ?

Практическое занятие 6 Исследование П-, И-, ПИ- регуляторов

Цель работы. Изучение использования П-, И-, ПИ- регуляторов.

1. Содержание работы

В качестве объекта управления выберем колебательное звено с передаточной функцией.

$$H_o = \frac{K}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1}$$

Структурная схема системы с регулятором в общем виде показана на рис. 6.1.

Основной целью использования регуляторов является уменьшение статической погрешности. Кроме того, подбирая параметры регуляторов, можно улучшить показатели переходного процесса: время регулирования и перерегулирование.

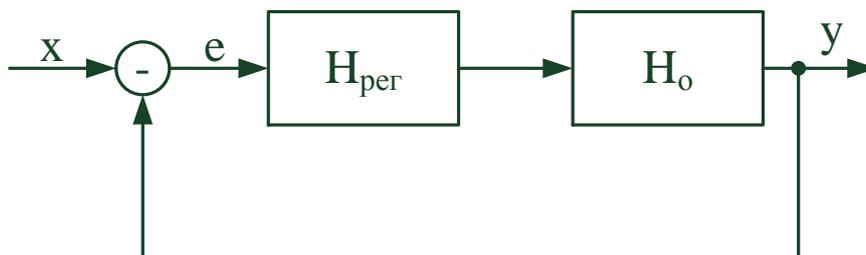


Рис.6.1. Структурная схема системы с регулятором

Статическая погрешность $\epsilon_{ст}$ представляет собой разность между сигналом, подаваемым на вход системы, и сигналом, установившемся на ее выходе после окончания переходного процесса.

Время регулирования t_p – это время, в течение которого кривая переходного процесса входит в пределы, определяющие точность регулирования. Эти пределы устанавливаются разработчиком системы. В данной работе точность регулирования, т.е. максимально допустимое отклонение кривой переходного процесса следует задавать не менее $\pm 5\%$ от установившегося значения. Таким образом, можно считать, что переходной процесс закончился после того, как кривая перестала выходить из заданного диапазона [2].

Перерегулированием (σ) называется максимальное отклонение переходной характеристики от установившегося значения:

$$\sigma = \frac{\Delta Y_{\text{вых}}}{Y_{\text{вых.уст.}}} 100 \%$$

Модель системы для исследования в MATLAB показана на рис 6.2.

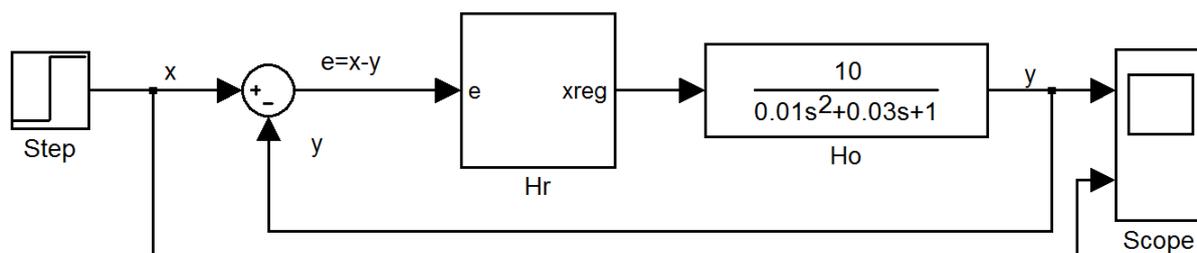


Рис 6.2. Модель системы для исследования в MATLAB

Сначала исследуется система без регулятора, структурная схема которой представлена на рис.6.1. Необходимо определить параметры переходной характеристики и занести данные в табл.1. Для исследования системы с П-регулятором строится модель по схеме, показанной на рис.6.3.

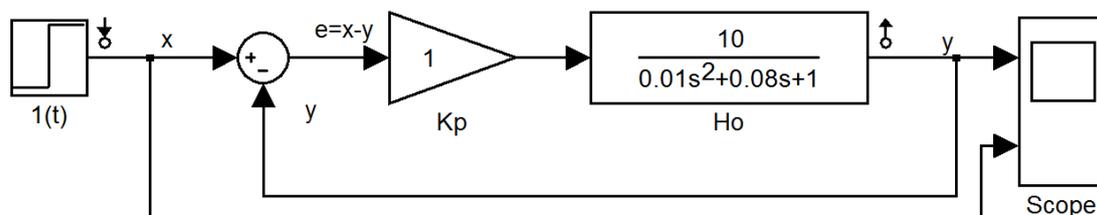


Рис.6.3 Модель системы для исследования с П-регулятором

П-регулятор – это безинерционное звено с передаточной функцией $H_p=K_p$. Для нескольких значений коэффициента K_p определим параметры переходного процесса спомощью линейного анализа и занесем результаты в таблицу.

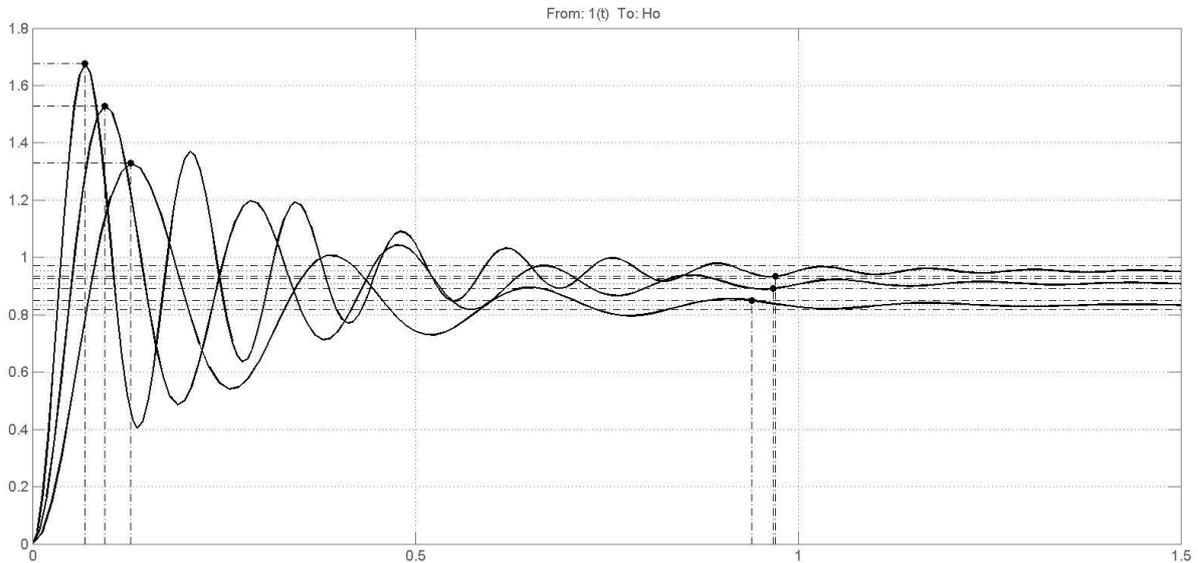


Рис. 6.4. Переходные характеристики системы с П-регулятором для разных K_p .
 Схема модели системы с И-регулятором показана на рис. 6.5.

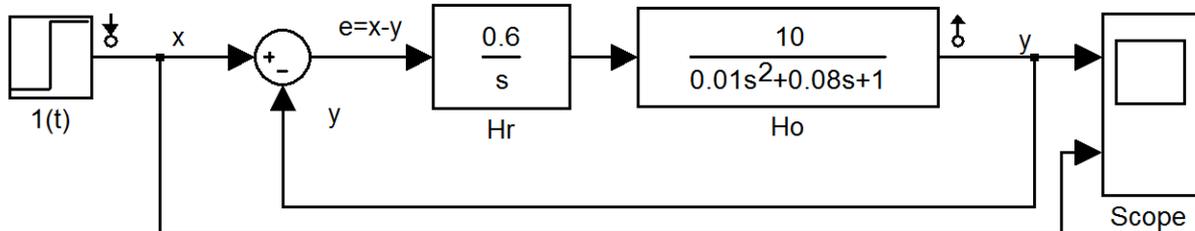


Рис. 6.5. Модель системы для исследования с И-регулятором

И-регулятор это интегратор с передаточной функцией

$$H_{II}(s) = \frac{K_{II}}{s}.$$

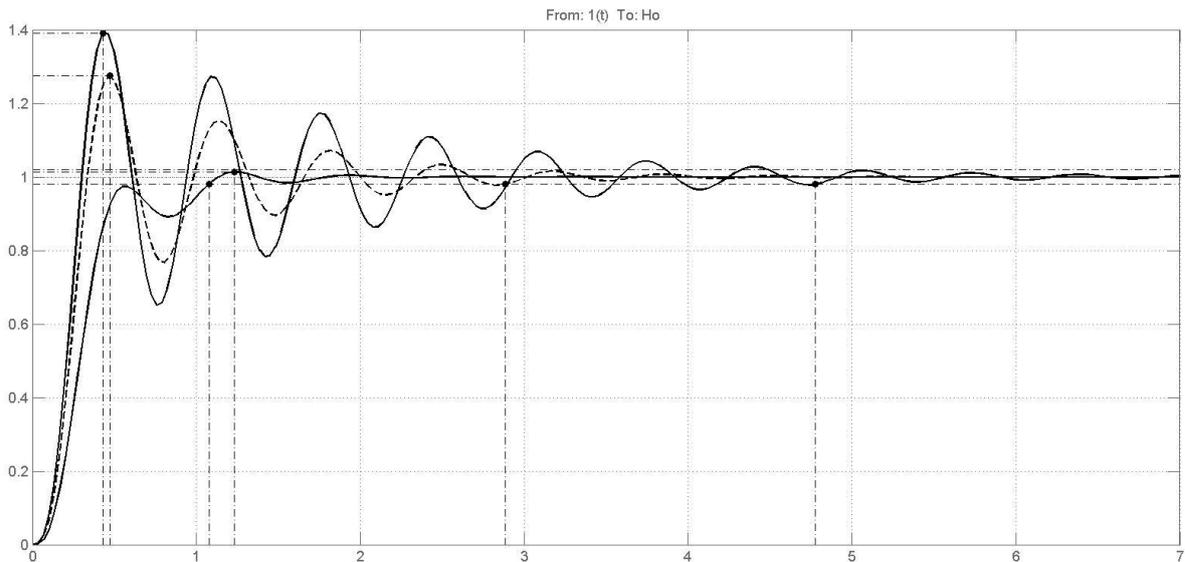


Рис. 6.6. Переходные характеристики системы с И-регулятором для разных $K_i=0,3$; $K_i=0,4$; $K_i=0,6$

Вычислить параметры переходных процессов для нескольких значений K_i и занести данные в таблицу.

Схема модели системы с ПИ-регулятором приведена на рис. 6.7.

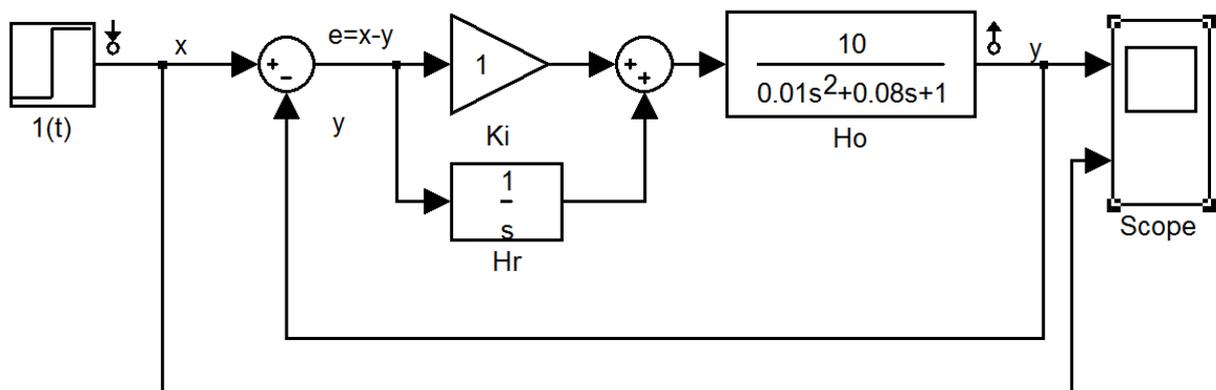


Рис. 6.7. Модель системы с ПИ-регулятором

ПИ-регулятор представляет собой параллельное соединение интегратора и усилителя. Его передаточная функция: $H_{ПИ}(s) = K_{II} + \frac{K_I}{s}$.

Вычислить параметры переходного процесса для нескольких значений K_i и K_{II} и занести результаты в табл.

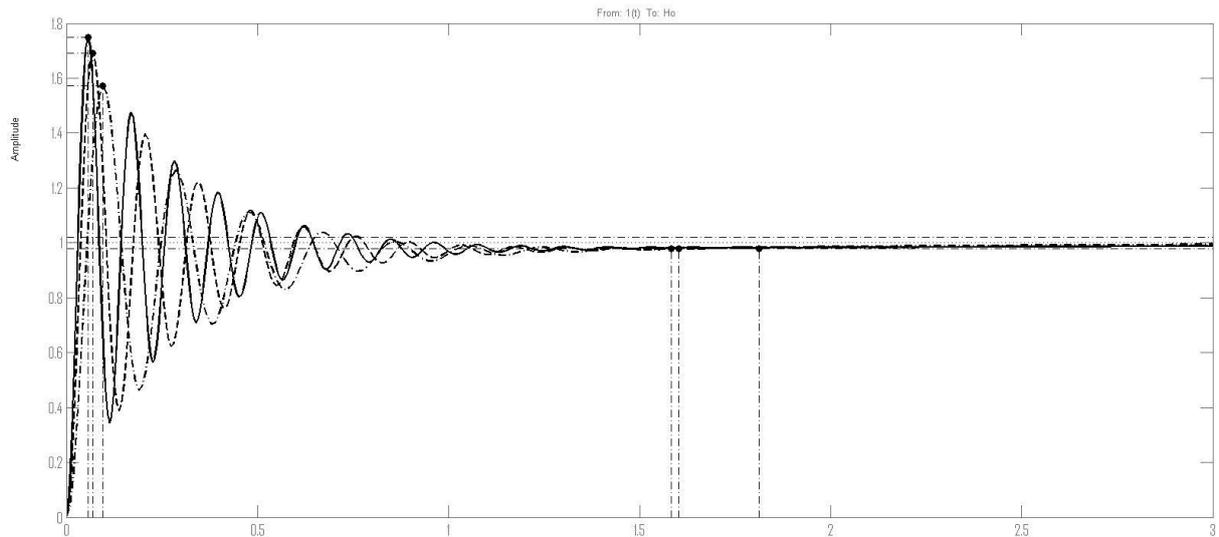


Рис. 6.8. Переходные характеристики системы с ПИ-регулятором для разных $K_p=1$; $K_p=2$; $K_p=3$.

Таблица.6.1

Тип регулятора	Значение параметров регулирования	$X_{вх},$ В	$X_{уст},$ В	$\Delta X,$ В	$\epsilon_{ст},$ В	$T_k,$ мс	$t_p,$ мс	$\sigma, \%$	Характер переходного процесса
Без регулятора	—								
П	$K_p=$								
	$K_p=$								
	$K_p=$								
И	$K_i=$								
	$K_i=$								
	$K_i=$								
ПИ	$K_p=$	$K_i=$							
		$K_i=$							
		$K_i=$							
	$K_p=$	$K_i=$							
		$K_i=$							
		$K_i=$							

Рассмотрим использование инструментального пакет (ИП) **Signal Constraint** [2] для настройки параметров динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов. В качестве средства для достижения указанной цели принимается опти-

мизационный подход, обеспечивающий минимизацию функции штрафа за нарушение динамических ограничений. При помощи данного инструмента можно настраивать параметры нелинейной Simulink-модели, в качестве которых может быть заявлено любое количество переменных, включая скаляры, векторы и матрицы. Особую значимость имеет то обстоятельство, что в процессе настройки могут учитываться неопределенности параметрического типа математической модели, что позволяет синтезировать робастные законы управления.

Задание динамических ограничений осуществляется в визуальном режиме. На базе этих ограничений Signal Constraint автоматически генерирует задачу конечномерной оптимизации так, чтобы точка экстремума в пространстве настраиваемых параметров соответствовала выполнению всех требований, предъявляемых к качеству процесса. Эта задача решается с привлечением специализированной процедуры квадратичного программирования из пакета Simulink Design Optimization. Ход оптимизации контролируется на экране с помощью отображения графика контролируемого процесса и текущих значений минимизируемой функции. По завершении процесса его результат фиксируется в рабочем пространстве.

Рассмотрим простой пример, иллюстрирующий начальные основы использования ИП Signal Constraint. Пусть требуется построить управление с обратной связью (регулятор температуры) для объекта, имеющего передаточную функцию

$$H(s) = \frac{1}{(s + 1)^2}$$

так, чтобы замкнутая система имела перерегулирование менее 5% и время переходного процесса (входа в 5% зону установившегося значения) менее 2 секунд. В качестве регулятора будем использовать ПИД-регулятор с передаточной функцией вида

$$H_{pid}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$$

Задача состоит в том, чтобы выбрать такие его коэффициенты, которые обеспечивают указанные требования к качеству переходного процесса.

Построим Simulink-модель объекта управления в соответствии со схемой, представленной на рис.6.9.

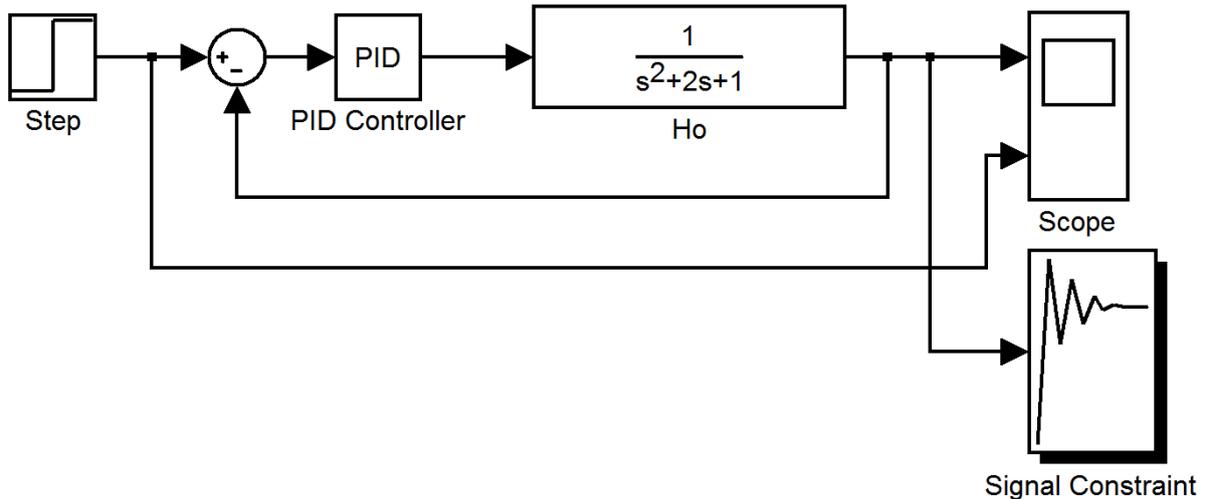


Рис. 6.9. Модель для настройки ПИД регулятора.

Инициализируем в командном окне Matlab переменные $K_p=1$; $K_i=1$; $K_d=0$; и настроим параметры блока PID Controller (см. рис.6.10), вводя в поле параметра Proportional переменную K_p , в поле Integral - K_i , а в поле Derivative - K_d .

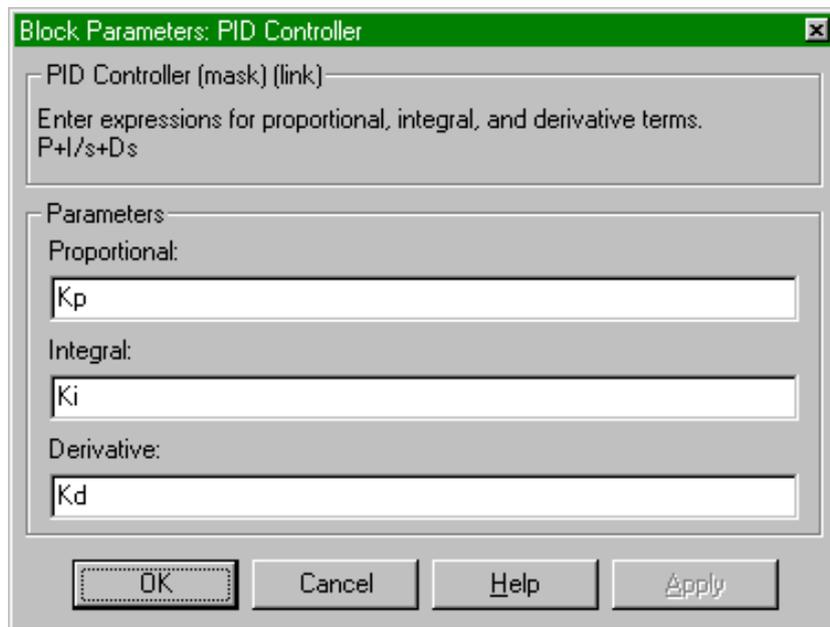


Рис.6.10. Настройка параметров блока PID Controller.

Таким образом, мы сформировали Simulink-модель объекта управления и теперь можем приступить к заданию ограничений, налагаемых на выход системы (блока H_0).

Дважды щелкнув по блоку Signal Constraint, получим окно, представленное на рис. 6.11.

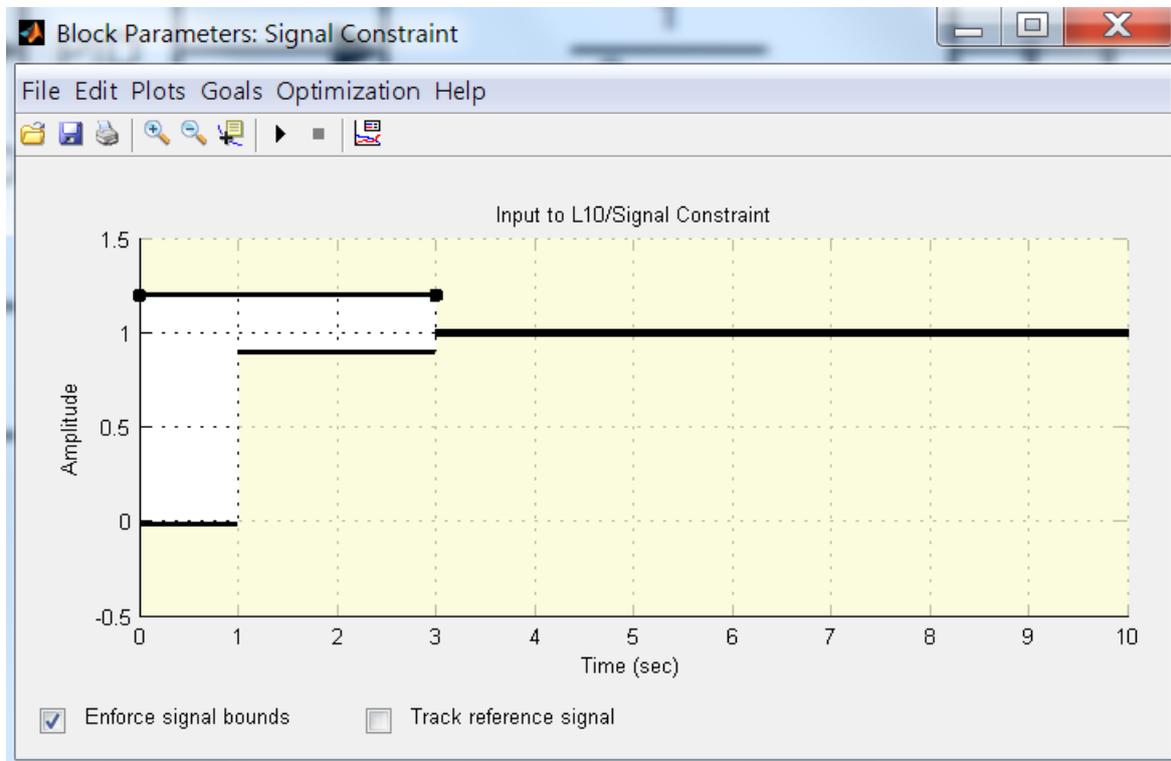


Рис. 6.11. Настройка блока Signal Constraint.

Установим коридор, в пределах которого, должен находиться входной сигнал блока NCD Output в соответствии с требованиями задачи. Это можно сделать, передвигая линии, являющиеся границами коридора, при помощи мыши. Местоположение этих линий можно установить точно (не в визуальном режиме) при помощи диалоговой панели Constraint Editor, возникающей при щелчке правой кнопкой мыши по линии (рис.6.12).

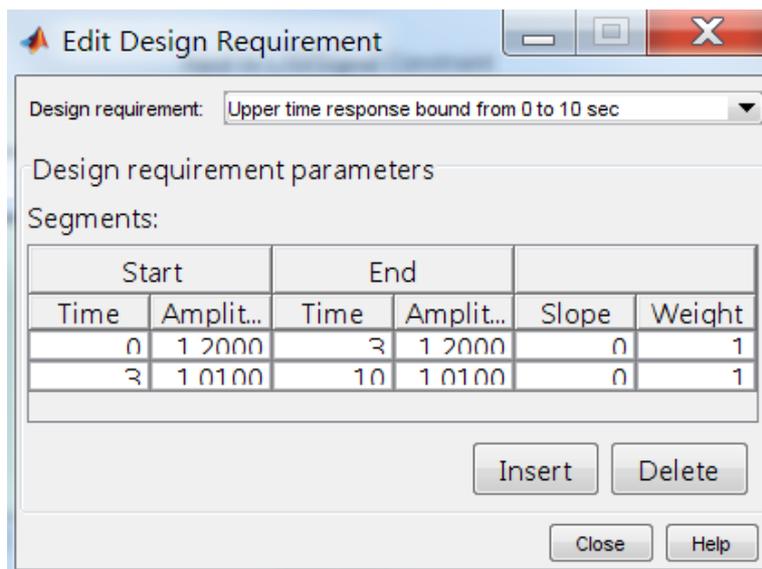


Рис.6.12. Настройка диалоговой панели Constraint Editor.

Теперь все готово для начала процесса оптимизации. Нажмем на кнопку Start и понаблюдаем за развитием процесса. Для каждого этапа оптимизации в окне отображаются графики сигнала, соответствующие начальным (белый цвет) и текущим (зеленый цвет) значениям настраиваемых параметров (рис. 6.13). В командном окне MATLAB отображается информация о ходе оптимизации.

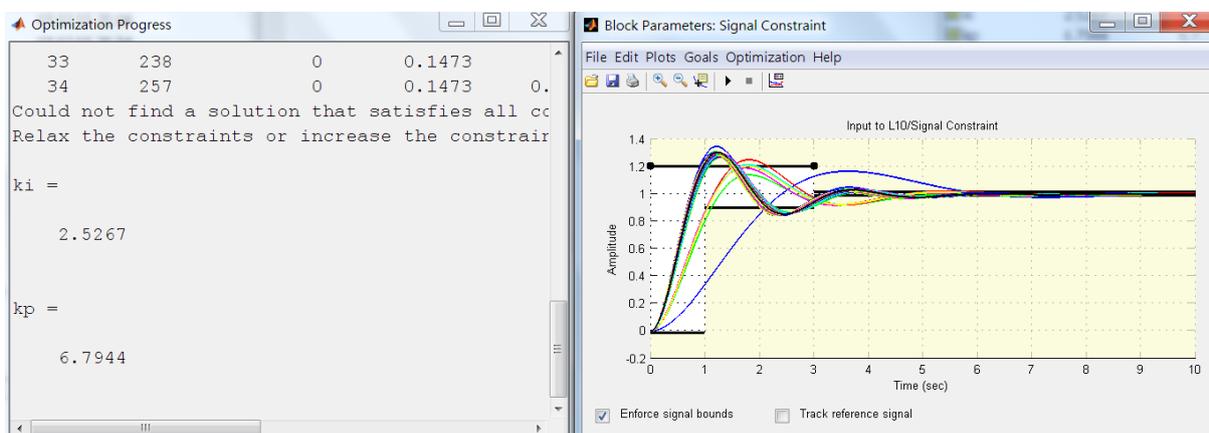


Рис.6 13. Процесс оптимизации.

По окончании процесса оптимизации, оптимальные значения настраиваемых переменных, соответствующие кривой зеленого цвета, сохраняются в рабочем пространстве MATLAB. В данном случае $K_p = 6.7944$; $K_d = 0$; $K_i = 2.5267$.

Для сравнения кривых переходных процессов построим схему, представленную на рис 6.14.

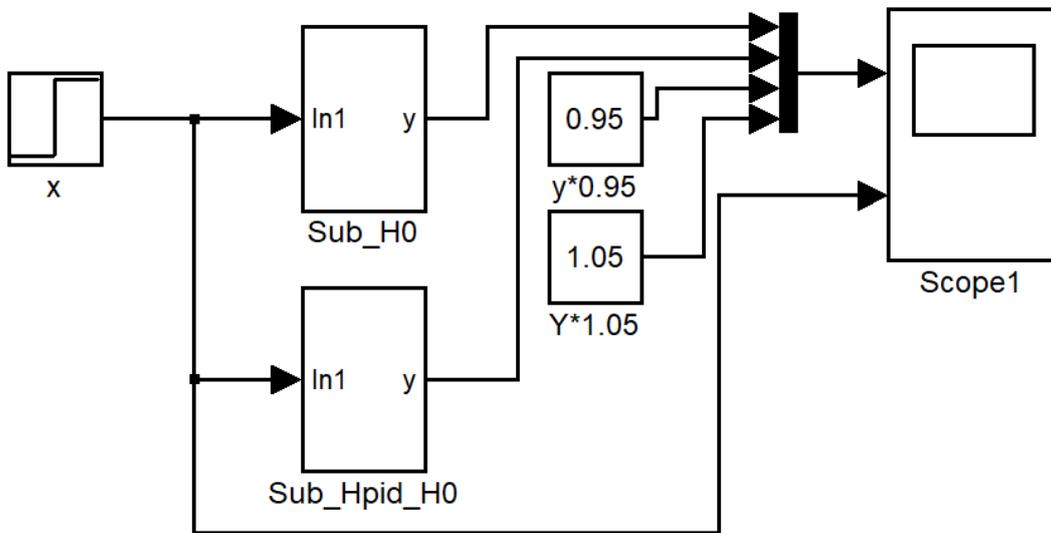


Рис.6 14. Модель для сравнения кривых переходных процессов.

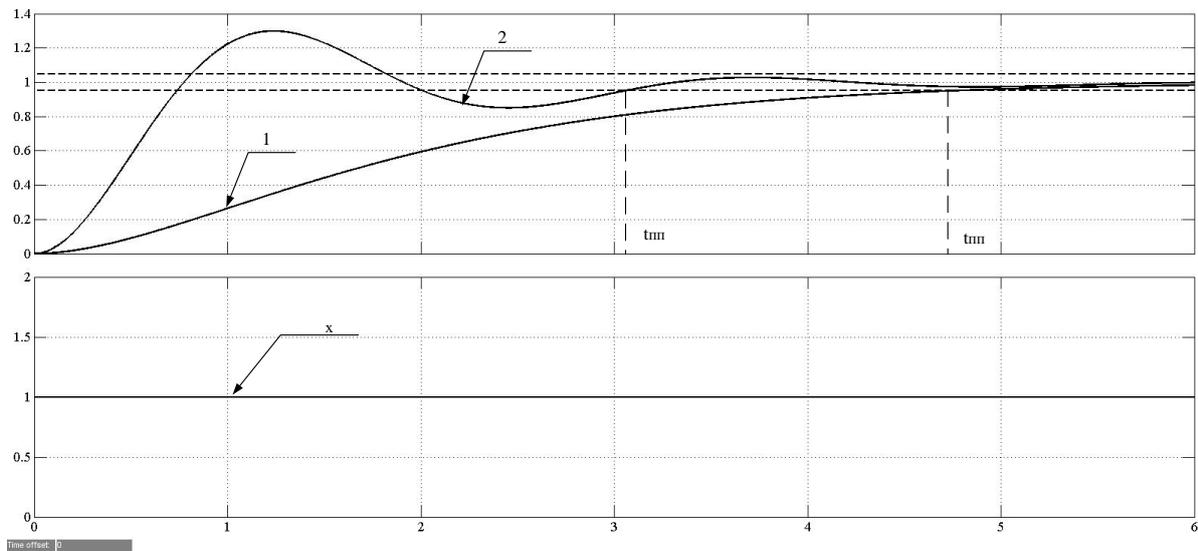


Рис.6 15. Переходные характеристики для объекта (1) и объекта с ПИ регулятором (2).

Рассчитаем статическую ошибку для схемы, представленной на рис 6.16 с ПИ-регулятором.

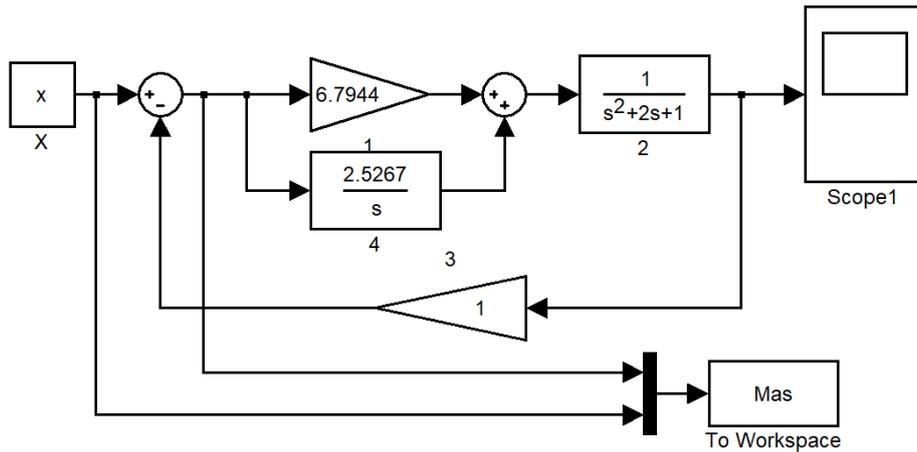


Рис.6 16. Модель для расчета статической ошибки с ПИ регулятором.

Код программы для расчета статической ошибки с ПИ регулятором представлен на рис 6.17.

```

for k=1:1:20;
x=1*k; ;%изменение входной величина x;
sim('TAY7') % команда обращения к модели;
A(k,1)=Mas(1);% ошибка e;
A(k,2)=Mas(2);%входная величина x;
end
plot(A(1:k,2),A(1:k,1),'k');
hold on;
grid on;

```

Рис.6 17. Код программы для расчета статической ошибки с ПИ регулятором.

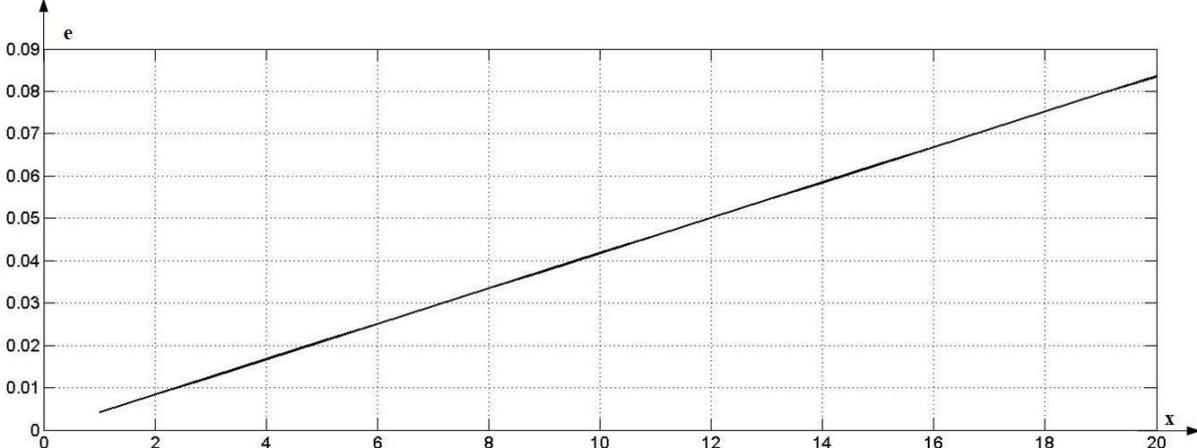


Рис.6 18. Статическая ошибка.

Зависимость статической ошибки (e) от величины входного сигнала (x) линейная (рис.6.18).

2. Задание

1. Снять переходные характеристики для различных параметров регуляторов.
2. Вычислить значения статических погрешностей и показателей качества переходного процесса.
3. Сравнить полученные результаты и сделать выводы.
4. Собрать схему (рис.6.9). В качестве H_0 взять передаточную функцию из схемы рис.6.5. Провести расчет параметров ПИ и ПИД регуляторов с помощью блока Signal Constraint и сделать выводы.

3. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:

1. Модели системы с параметрами.
2. Переходные характеристики для различных параметров регуляторов.
3. Построенные характеристики системы.
4. Заполненную таблицу 1.
5. Переходные характеристики и значения параметров регуляторов, найденных в пункте 4 задания.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какова цель использования регуляторов в САУ?
2. Каковы основные параметры переходного процесса?
3. Как изменится время регулирования t_p , если увеличить точность регулирования до $\pm 1\%$?
4. Что называется, статической погрешностью?
5. На основе проведенного анализа работы трех регуляторов выберите оптимальный.

Практическое занятие 7

Исследование качества переходных процессов линейной автоматической системы

1. Цель работы:

Определение показателей качества системы по переходной характеристике; исследование влияния параметров системы на показатели качества.

2. Содержание работы

Рассмотрим пример. Соберем в MATLAB схему исследуемой системы (рис.7.1). Набранная модель представлена на рис.7.2.

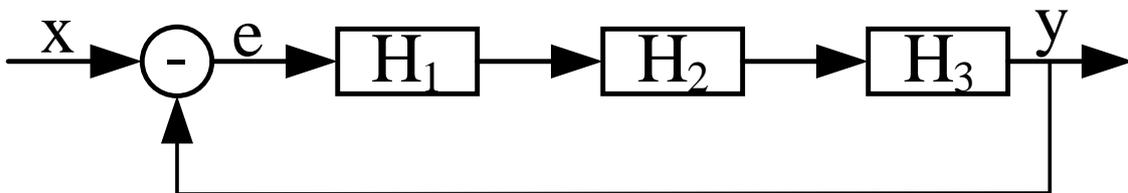


Рис.7.1. Структурная схема исследуемой системы.

Передаточные функции исследуемой системы:

$$H_1 = \frac{0.1s + 1}{0.8s}; \quad H_2 = \frac{1}{0.2s + 1}; \quad H_3 = \frac{5}{0.01s^2 + 0.2s + 1};$$

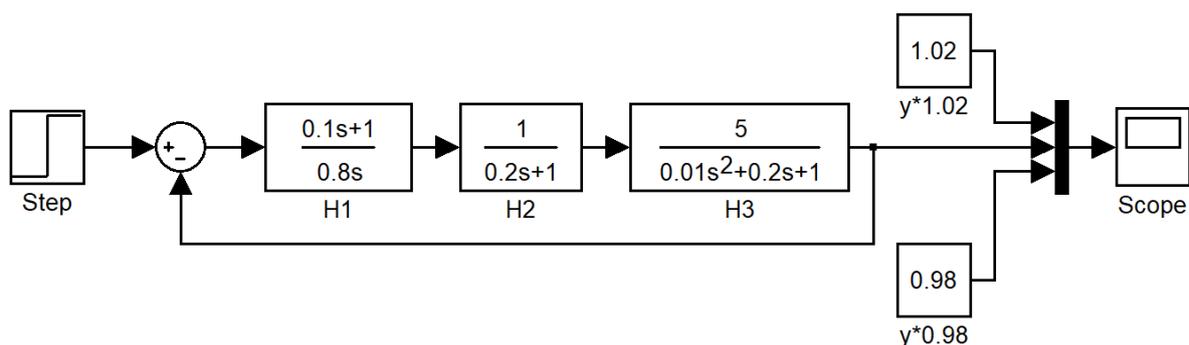


Рис.7.2. Модель исследуемой системы.

Переходная характеристика исследуемой системы представлена на рис.7.3.

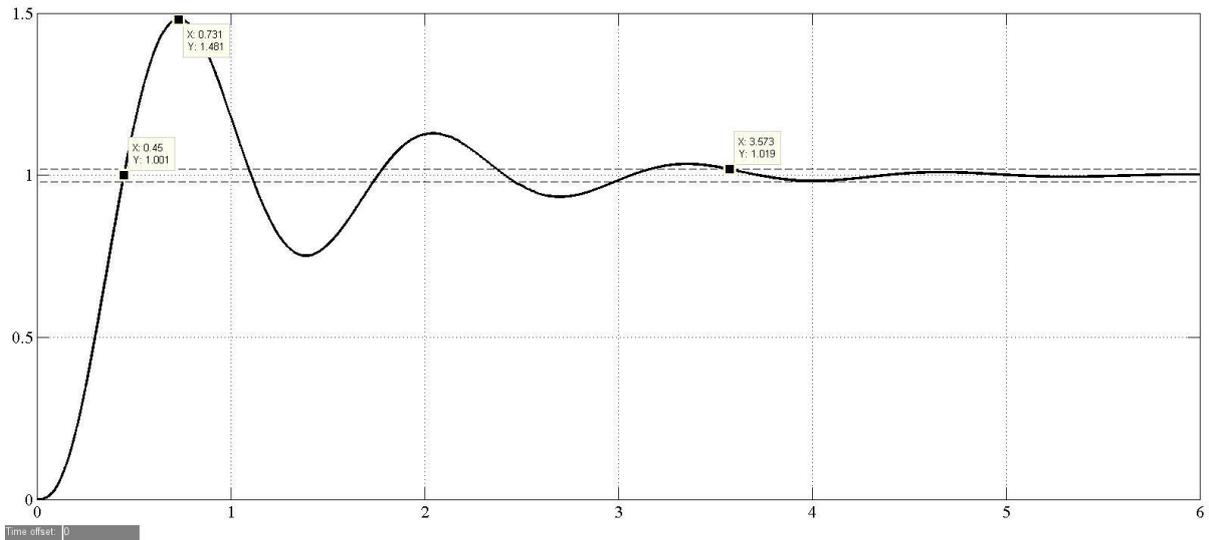


Рис.7.3. Переходная характеристика исследуемой системы.

Проведем линейный анализ. Модель системы для проведения линейного анализа представлена на рис.7.4.

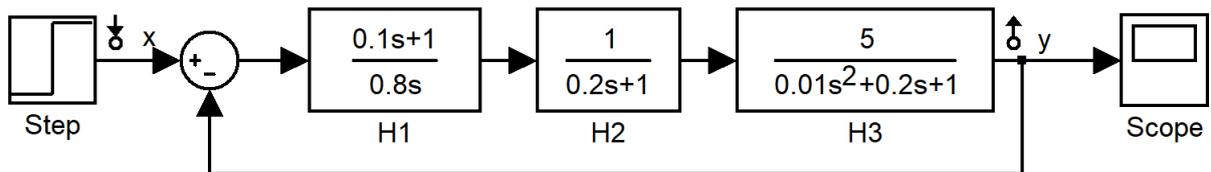


Рис.7.4. Модель системы для проведения линейного анализа.

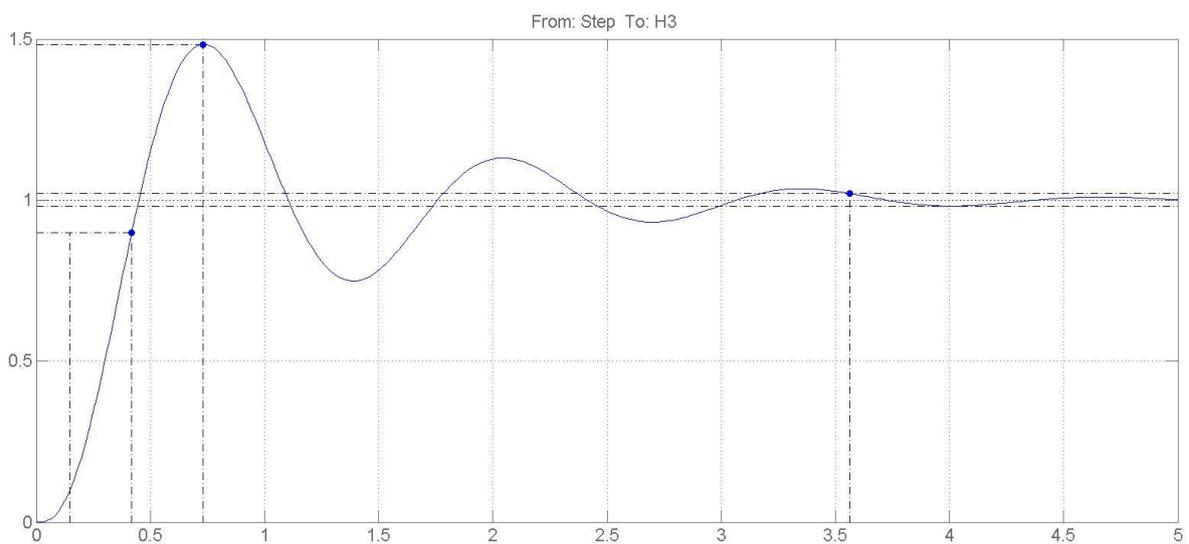


Рис.7.5. Переходная характеристика исследуемой системы для $K_3=5$.

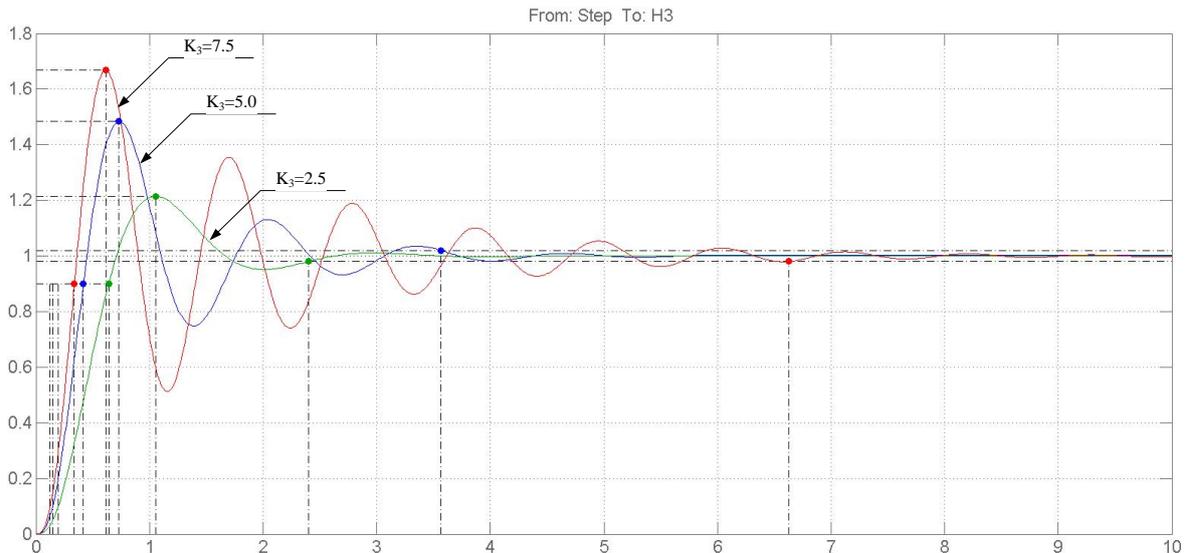


Рис.7.6. Переходная характеристика исследуемой системы для $K_3= 2.5, 5.0$ и 7.5 .

K_3 - коэффициент передачи передаточной функции H_3 .

Задания

1. Определите следующие показатели качества системы по ее переходной функции:

- время первого согласования t_1 ;
- время достижения максимума t_m ;
- время переходного процесса $t_{\text{пн}}$ (по входу переходной функции в зону $\pm 2\%$ от ее установившегося значения);
- перерегулирование σ ;

2. Проведите линейный анализ системы. Определите показатели качества и сравните с показателями качества, определенные в пункте 1 задания. Сделайте выводы.

3. Исследуйте, как изменятся показатели качества при увеличении и при уменьшении в 2 раза одного из параметров системы. Эксперимент проводится для следующих параметров:

- постоянная времени H_3 ;
- постоянная времени интегрального звена в H_1
- постоянная времени форсирующего звена в H_1 ;

При каждом изменении параметров определите показатели качества (см. п.1 задания) и сделайте вывод о том, как изменилось быстродей-

ствие системы и ее колебательность. Результаты исследования запишите в таблицу (табл.1).

4. Задайте исходные значения параметров системы. Найдите параметр системы, изменяя который (при исходных значениях других параметров) можно добиться монотонного переходного процесса (перерегулирование равно нулю). Сохраните график полученной переходной функции (без перерегулирования) для отчета.

3. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы;
2. Структурную схему исследуемой системы;
3. Переходную функцию системы при исходных значениях параметров с отмеченными на ней значениями показателей качества;
4. Переходную функцию системы при отсутствии перерегулирования и значение параметра, при котором она получена.

4. Контрольные вопросы

1. Определение показателей качества переходных процессов САУ?
2. Как вычисляются показатели качества по расположению нулей и полюсов передаточной функции САУ?
3. Каковы частотные критерии качества переходных процессов?
4. Какова связь частотных характеристик САУ с качеством ее переходной характеристики?
5. Как влияют параметры САУ на показатели качества?

Практическое занятие 8

Проектирование регулятора для линейной системы с помощью приложения SISOtool

Цели работы

Освоение методов проектирования регулятора для одномерной линейной непрерывной системы с помощью среды Matlab

1. Содержание работы.

SISO Design Tool представляет собой графический интерфейс пользователя, который позволяет анализировать и настраивать SISO системы управления с обратной связью. С помощью SISO Design Tool можно графически настраивать коэффициенты усиления и динамические свойства (dynamics) компенсатора (C) и предфильтра (F), используя комбинацию метода расположения корней и метода формирования контура [5].

Рассмотрим пример. Пусть необходимо исследовать САУ (рис. 8.1). где: $K_1=3$; $K_2=3$; $K_3=20$; $K_4=5$; $T_1=0,25$; $T_4=0,15$.

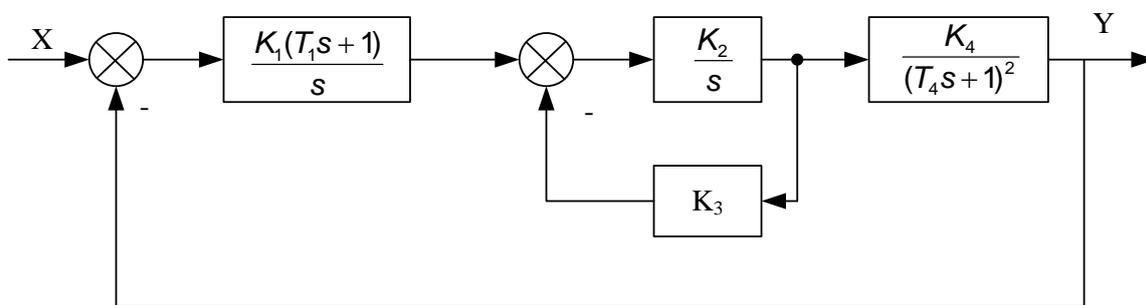


Рис. 8.1 – Структурная схема САУ

Определим передаточную функцию разомкнутой системы:

$$11.25 s + 45$$

$$H = \frac{11.25 s + 45}{0.0225 s^4 + 1.65 s^3 + 19 s^2 + 60 s};$$

Создадим ZPK-объект, найдем полюса и нули разомкнутой системы:

```
>> s=zpk('s');
H=(11.25*s+45)/(0.0225*s^4+1.65*s^3+19*s^2+60*s)

Zero/pole/gain:
    500 (s+4)
-----
s (s+60) (s+6.667)^2

>> pole(H)
ans =
-60.0000
-6.6667 + 0.0000i
-6.6667 - 0.0000i
-0.0000
>> zero(H)
ans =
-4.0000
fx >> |
```

Запустим SISO-Design Tool (в командной строке набираем команду `sisotool`) рис. 8.2.

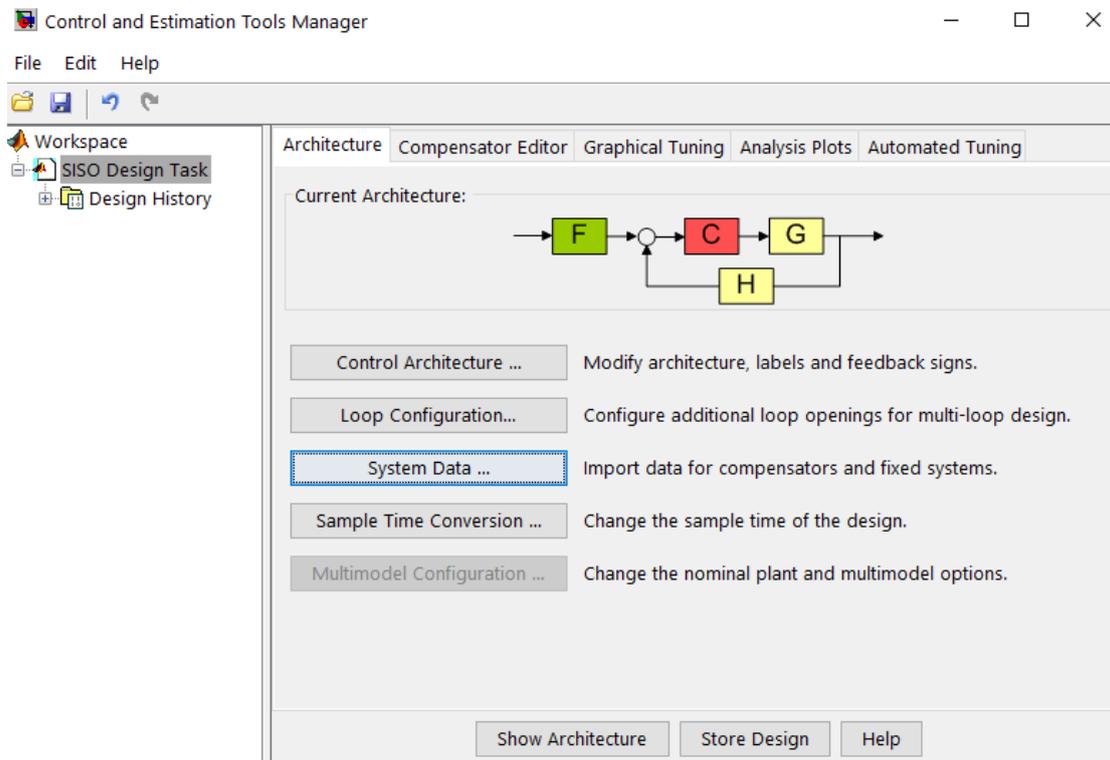


Рис. 8.2. Основное окно SISO Tool.

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

G – объект управления;

H – обратная связь;

F – фильтр;

C – компенсатор.

Структуру обратной связи можно изменить, нажав кнопку «Control Architecture», которая показывает различные конфигурации системы рис.8.3.

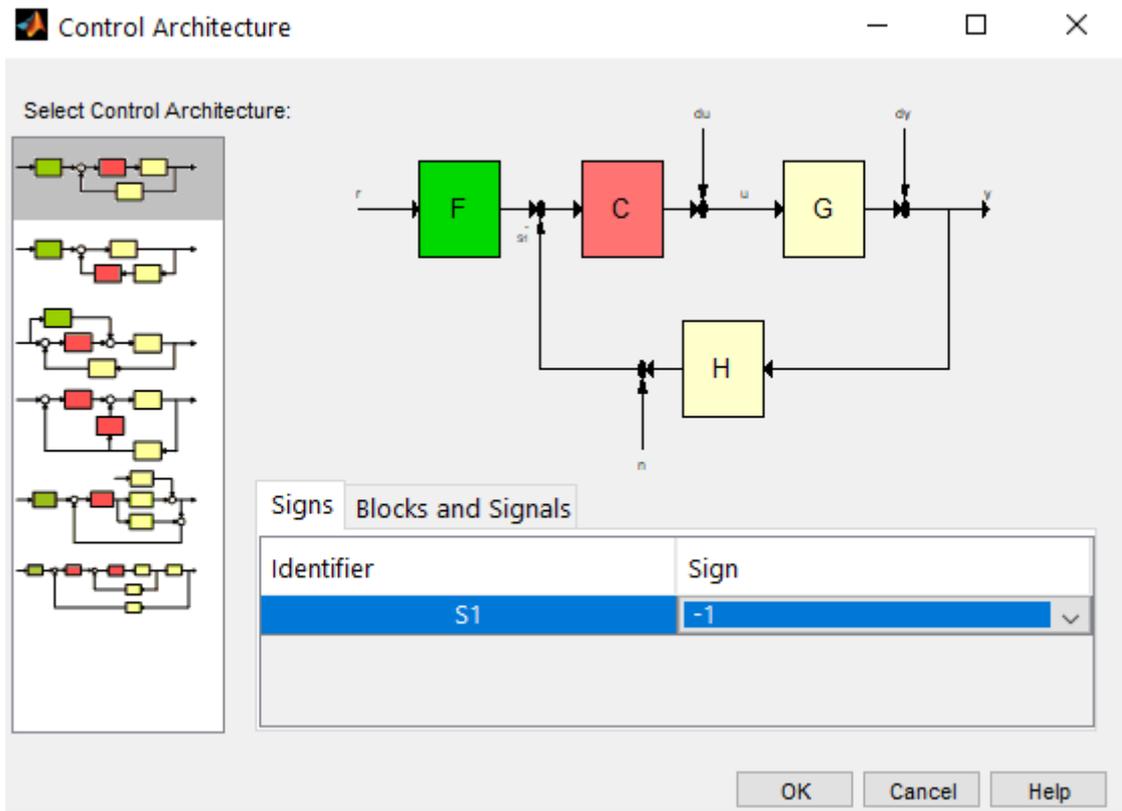


Рис.8.3. Различные конфигурации системы.

Настроим параметры и импортируем ZPK-объект из рабочего пространства MATLAB (рис.8.4).

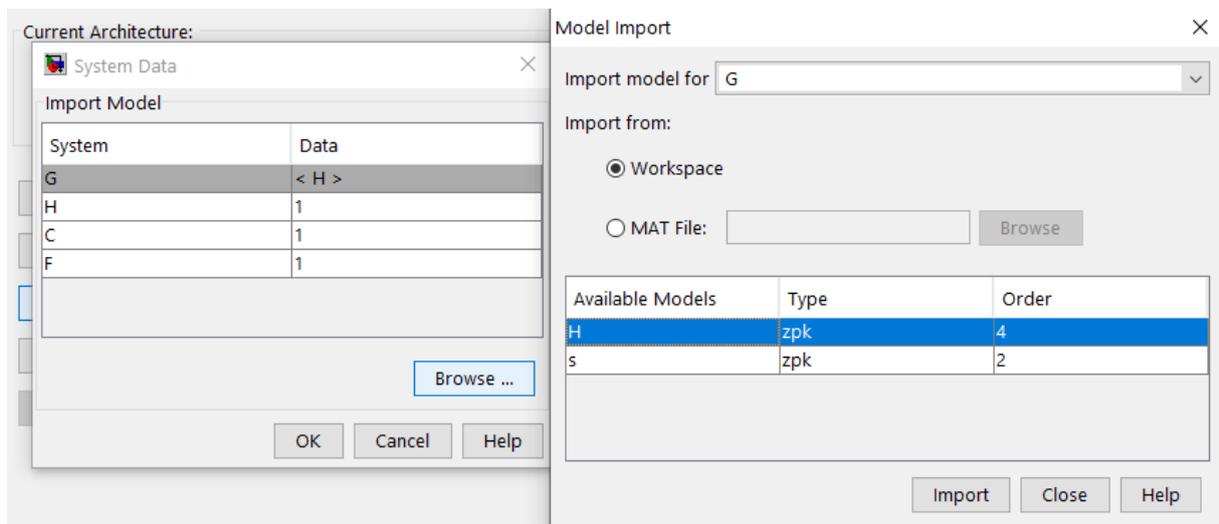


Рис.8.4. Настройка параметров и импорт ZPK-объект из рабочего пространства.

По умолчанию все значения для блоков F, H и C равны 1. В качестве объекта управления (G) задана передаточная функция разомкнутой системы модели, изображенная на рис. 8.1

В окне Root Locus Editor интерфейса SISO-Design Tool построится корневой годограф (рис.8.5).

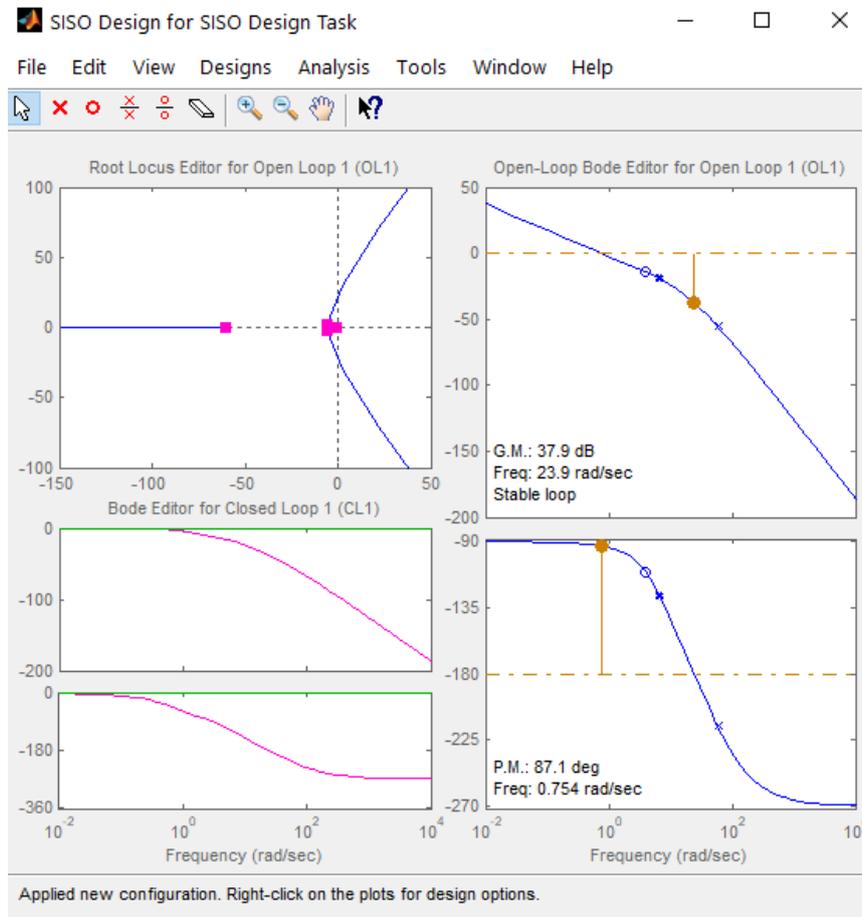


Рис.8.5. Корневой годограф системы.

Рассмотрим экспорт моделей. Чтобы открыть окно «SISO Tool Export» необходимо выбрать в меню «File» пункт «Export». Окно «SISO Tool Export» содержит список не только всех блоков текущей модели, но и различные передаточные функции, связанные со стандартными методами анализа систем управления. Они включают передаточные функции разомкнутого и замкнутого контуров, входную и выходную функции чувствительности и модель пространства состояний всего контура обратной связи. Чтобы выбрать модель для экспорта, щелкните правой кнопкой мыши по строке, содержащей имя ком-

нять масштаб, добавлять ограничения или настраивать свойства графика).

Окно редактора компенсатора (Edit Compensator) представляет GUI с областями для ввода с клавиатуры коэффициента усиления и расположения нулей/полюсов.

В SISO Design Tool можно использовать любой из этих способов на графике расположения корней, диаграммах Боде разомкнутого контура и предфильтра или графиках Никольса. После добавления нулей и полюсов в компенсатор можно изменять их местоположение, перетягивая их курсором мыши. SISO Design Tool разработан так, что изменения любого из графиков автоматически приводит к изменению остальных. В частности, панель Current Compensator всегда отражает текущую схему компенсатора. Рассмотрим порядок автоматической настройки регулятора (Compensator).

1. Активируем иконку «Automated Tuning» рис 8.7.

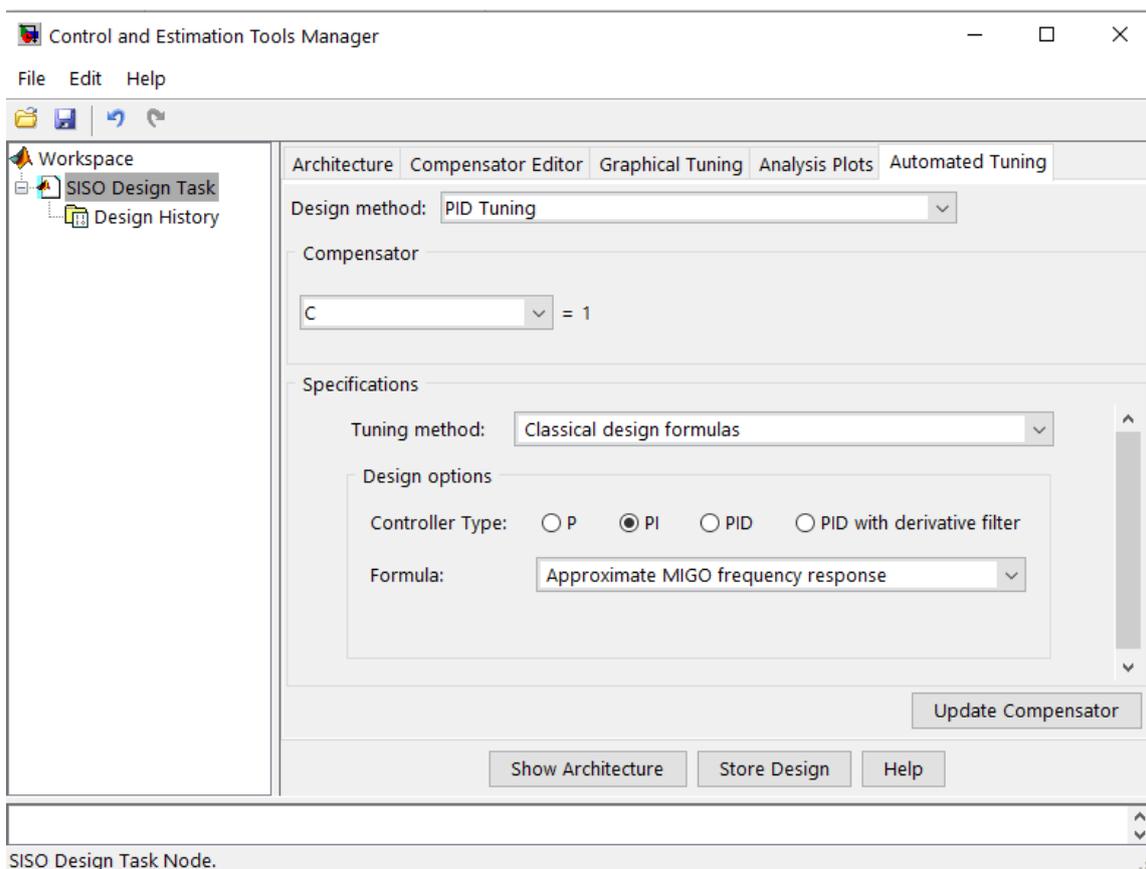


Рис.8.7. Окно настройки параметров регулятора.

2. Выбираем метод настройки «Tuning method» (рис 8.7) и тип регулятора.

3. Нажимаем на иконку «Update Compensator» (рис 8.8). Программа вычисляет передаточную функцию регулятора. В нашем примере:

$$C = H_p(s) = \frac{12.52(s + 3.8)}{s}$$

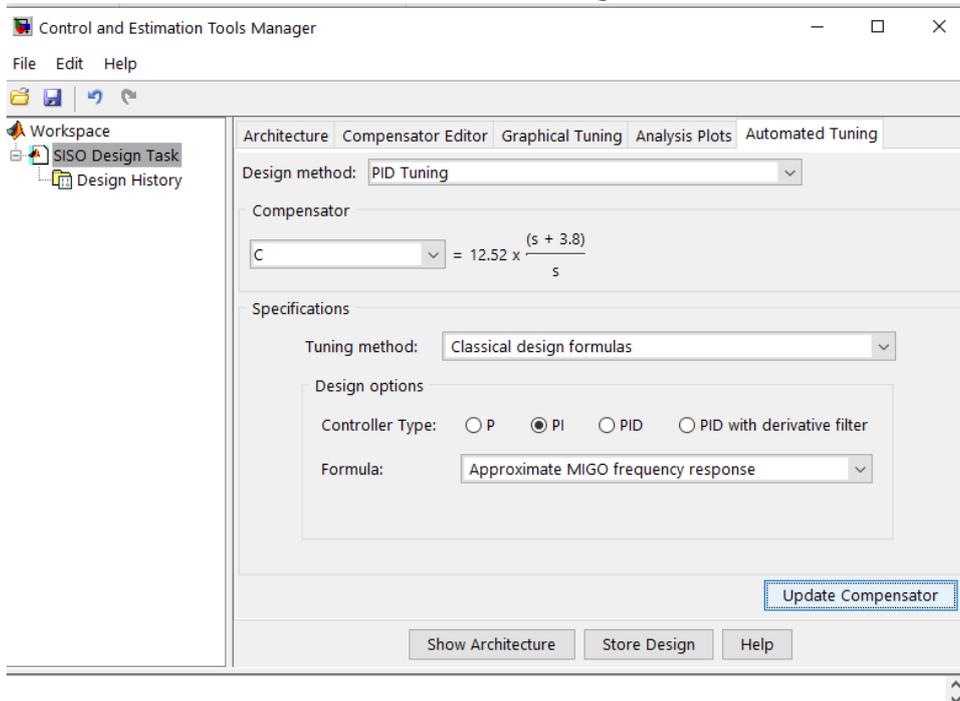


Рис.8.8. Окно настройки вычисления параметров регулятора.

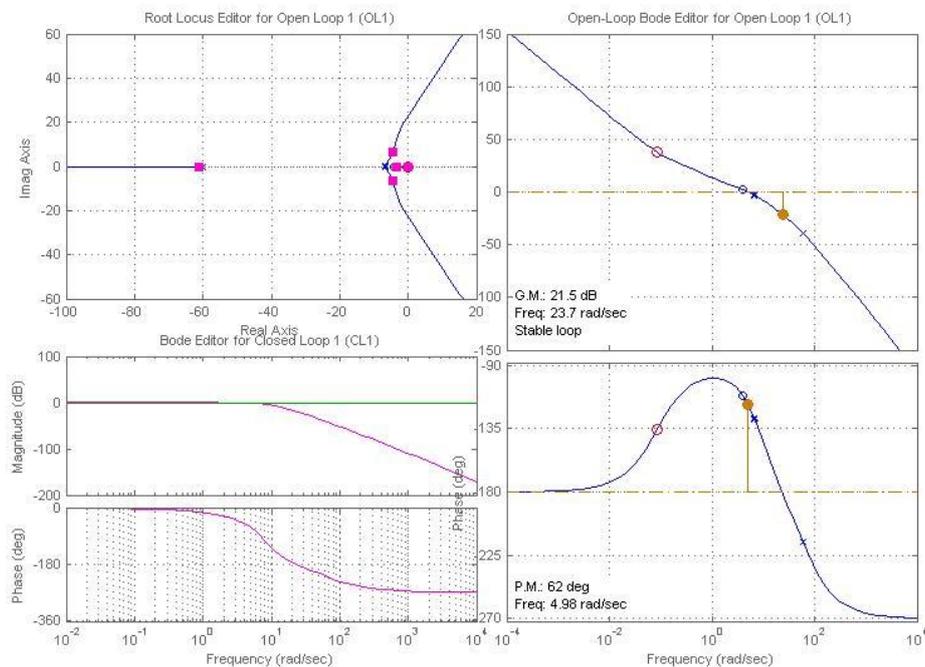


Рис.8.9. Характеристики системы с регулятором.

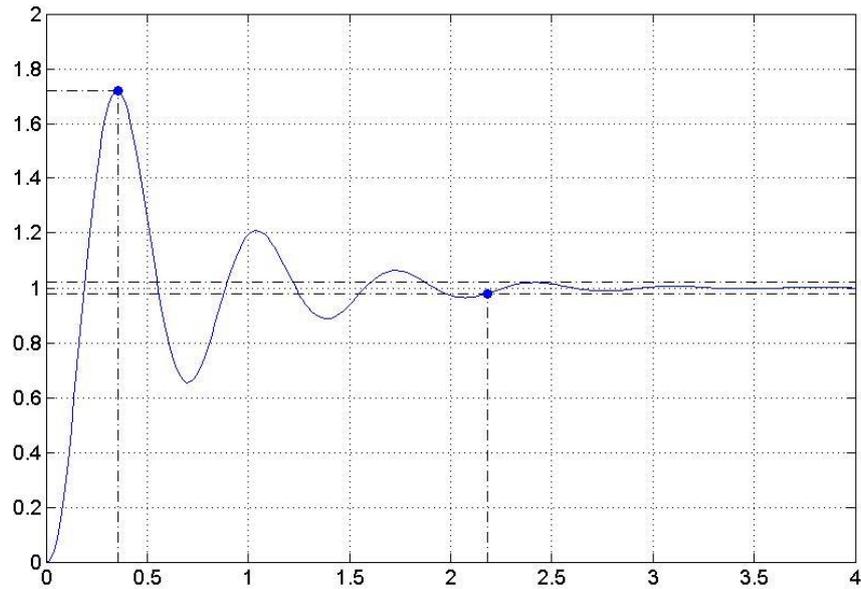


Рис.8.10. Переходный процесс системы с регулятором.

Рассмотрим расчет параметров регулятора по методу «Robust response time» (рис.8.11).

Проведем операции, описанные выше. Получим передаточную функцию регулятора и переходной процесс представленный на рис..8.13.

$$C = H_p(s) = \frac{6.4974(s + 0.0871)}{s}$$

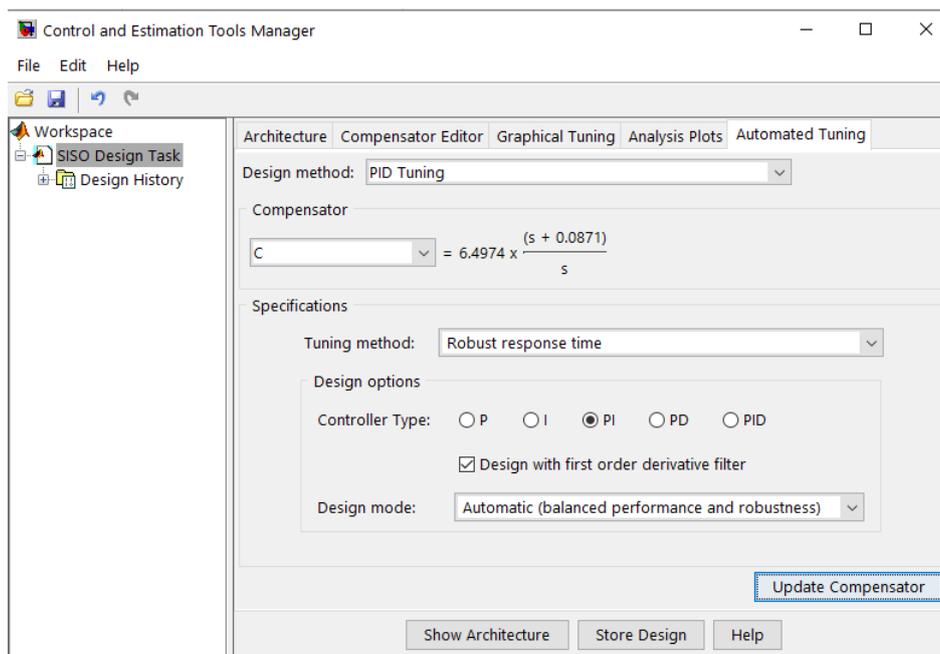


Рис.8.11. Расчет параметров регулятора по методу «Robust response time»

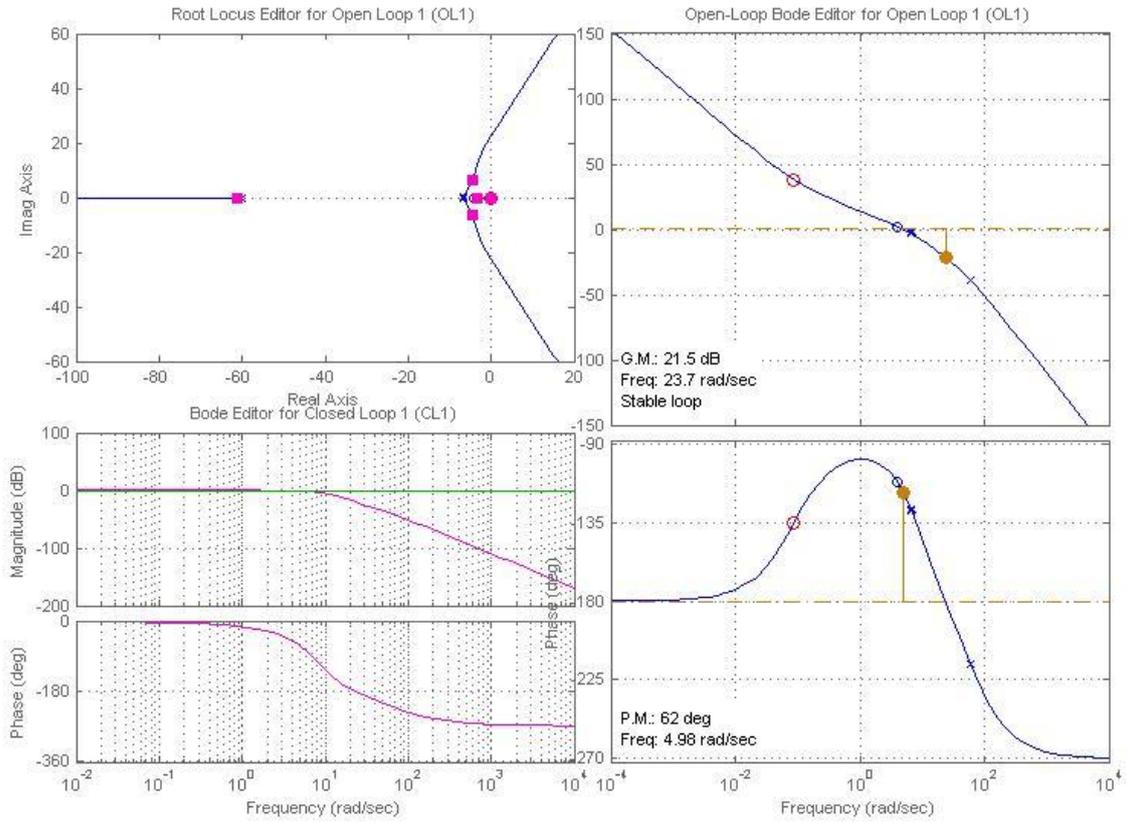


Рис.8.12. Характеристики системы с регулятором, рассчитанным по методу «Robust response time».

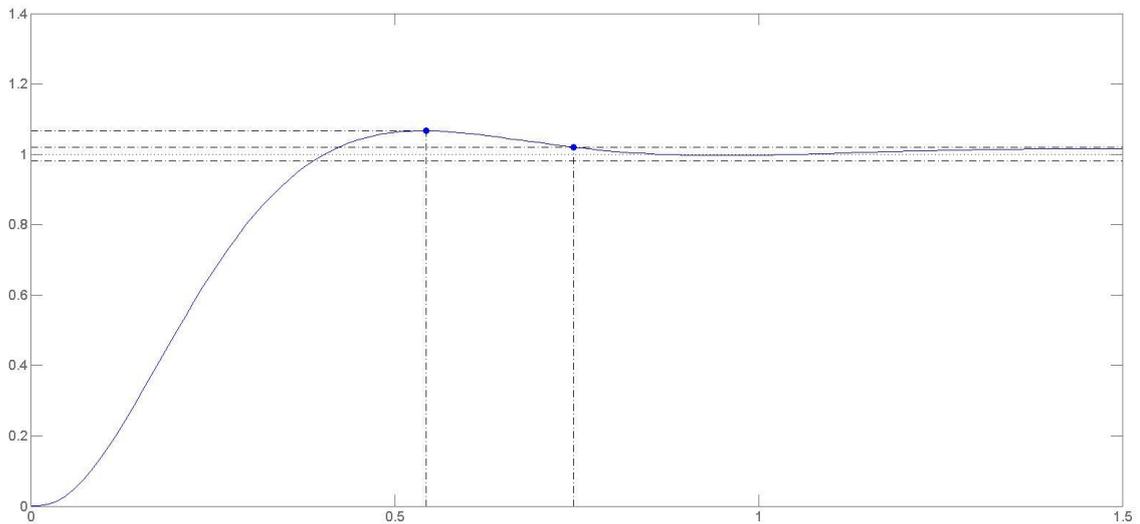


Рис.8.13. Переходный процесс системы с регулятором, рассчитанным по методу «Robust response time».

2. Задание

1. По заданной передаточной функции разомкнутой системы, охваченной единичной ООС (таблица 8.1) провести синтез регулятора двумя методами описанными выше.
2. Сравнить полученные результаты и сделать выводы.

Таблица 8.1

№	Передаточные функции разомкнутой системы, охваченной единичной ООС
1.	$H(s) = \frac{100 \cdot s(1 \cdot s + 1)}{(0.02 \cdot s + 1)(0.01 \cdot s^2 + 0.05 \cdot s + 1)}$
2.	$H(s) = \frac{100(0.02 \cdot s + 1)}{s \cdot (0.05 \cdot s + 1)(0.01 \cdot s^2 + 0.2 \cdot s + 1)}$
3.	$H(s) = \frac{100 \cdot (0.005 \cdot s + 1)}{s^2 \cdot (0.01 \cdot s^2 + 0.2 \cdot s + 1)}$
4.	$H(s) = \frac{100 \cdot (0.05 \cdot s + 1)}{s^2 \cdot (0.01 \cdot s + 1)(0.005 \cdot s + 1)}$
5.	$H(s) = \frac{100 \cdot s^2 \cdot (0.05 \cdot s + 1)}{(0.01 \cdot s + 1)(s + 1)}$
6.	$H(s) = \frac{100 \cdot s^2 \cdot (s + 1)}{(0.01 \cdot s + 1)(0.05s + 1)}$
7.	$H(s) = \frac{100 \cdot s^2 \cdot (s + 1)}{(0.01 \cdot s + 1)(0.05s + 1)(0.001 \cdot s + 1)}$
8.	$H(s) = \frac{50 \cdot (0.001 \cdot s + 1)(0.002 \cdot s + 1)}{s \cdot (0.01 \cdot s + 1)(0.04 \cdot s + 1)}$
9.	$H(s) = \frac{150 \cdot s^2}{(0.01 \cdot s + 1)^2(0.004 \cdot s + 1)}$

3. Содержание отчета.

Отчет должен содержать:

1. Модели системы с параметрами.
2. Переходные характеристики для различных параметров регуляторов.
3. Выводы.

Контрольные вопросы к защите

1. Что означают сокращения SISO, LTI?
2. Как получить передаточную функцию по линейным дифференциальным уравнениям системы?
3. Как ввести передаточную функцию в окне Matlab?
4. Как определяются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе? Что означают эти величины? В каких единицах они измеряются?
5. Какие возможности предоставляет модуль **SISOTool**?
6. Что такое:
 - корневой годограф
 - перерегулирование
 - время переходного процесса
7. Как влияет увеличение коэффициента усиления контура на ЛАФЧХ?
8. Как влияет увеличение коэффициента усиления контура на перерегулирование и время переходного процесса?
9. Связана ли близость полюсов передаточной функции замкнутой системы к мнимой оси с малым запасом устойчивости?

Практическое занятие 9

Моделирование нелинейных систем управления

Цели работы.

Освоение методов моделирования нелинейных систем в пакете SIMULINK

В Simulink представлены следующие модели нелинейных звеньев (*Discontinuities*) [2]:



Saturation – насыщение, в параметрах задаются верхний и нижний пределы (Upper limit и Lower limit).



Dead zone – нечувствительность, «мертвая зона». В параметрах задаются пределы нечувствительности (Start of dead zone и End of dead zone).



Rate Limiter – ограничитель скорости изменения сигнала, в параметрах задаются пределы на скорость увеличения (Rising slew rate) и на скорость уменьшения (Falling slew rate).



Relay – реле, в параметрах задаются точки переключения (Switch on point и Switch off point), в также величины сигналов в режимах «включено» (Output when on) и «выключено» (Output when off).



Backlash – люфт, «мертвый ход». В параметрах задаются величина мертвого хода (Deadband width) и начальное значение выхода (Initial output).



Coulomb and Viscous Friction – кулоновское и вязкое трение.

В работе рассматривается система автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока [3].
Функциональная схема системы приведена на рисунке 9.1.

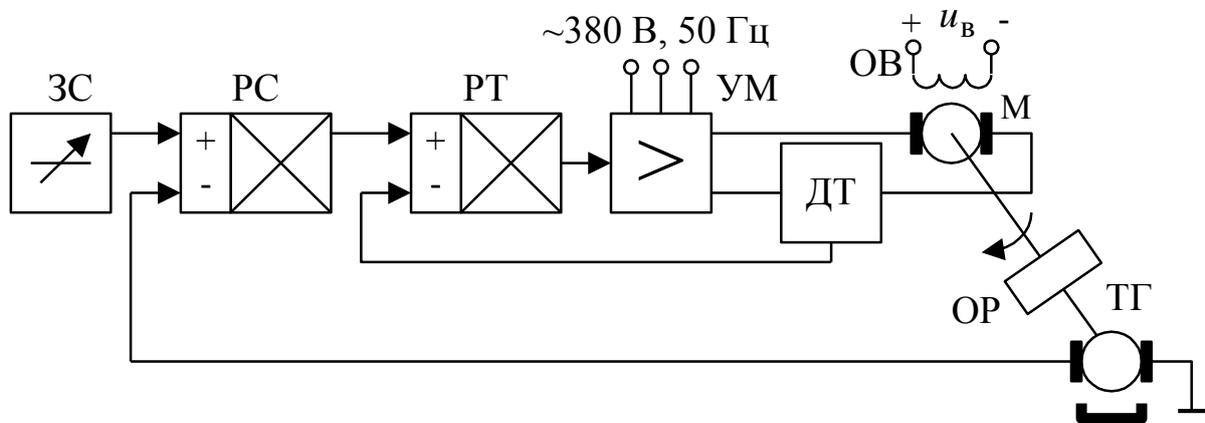


Рис.9.1. Функциональная схема исследуемой системы.

Система содержит: ЗС – задатчик скорости; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; УМ – усилитель мощности; ДТ – датчик тока; М – двигатель постоянного тока (ОВ – обмотка возбуждения, u_B – напряжение питания обмотки возбуждения); ОР – объект регулирования; ТГ – тахогенератор.

Структурная схема системы показана на рис. 9.2.

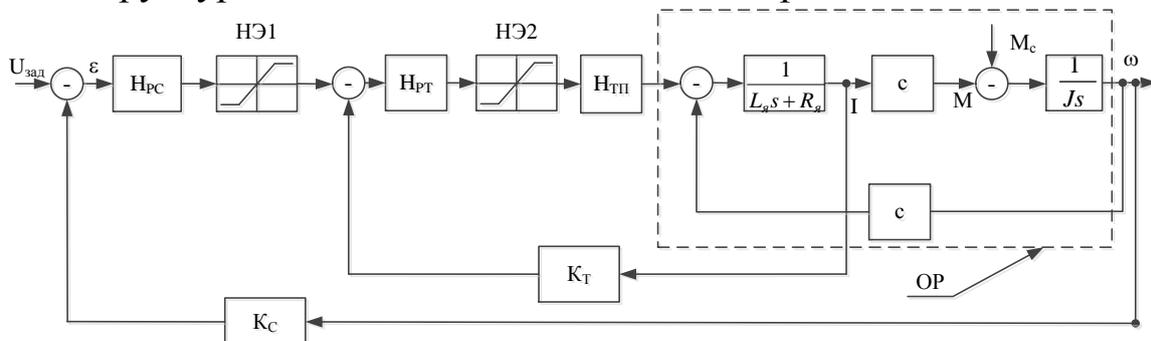


Рис. 9.2. Структурная схема

На схеме обозначено:

$U_{\text{зад}}$ – сигнал задания;

ε – ошибка регулирования;

$H_{\text{pc}}(s)$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора скорости;

$$H_{\text{pc}}(s) = \frac{k_{\text{pc}}(T_{\text{pc}}s + 1)}{T_{\text{pc}}s};$$

$k_{\text{pc}}, T_{\text{pc}}$ – коэффициент передачи и постоянная времени регулятора скорости;

$H_{\text{Э1}}$ – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора скорости;

$H_{\text{рт}}(s)$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока;

$$H_{\text{рт}}(s) = \frac{k_{\text{рт}}(T_{\text{рт}}s + 1)}{T_{\text{рт}}s};$$

$k_{\text{рт}}, T_{\text{рт}}$ – коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-интегрального регулятора тока;

$H_{\text{Э2}}$ – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора тока;

$$H_{\text{тп}}(s) = \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}}s + 1};$$

передаточная функция тиристорного преобразователя;

$k_{\text{тп}}, T_{\text{тп}}$ – коэффициент передачи и постоянная времени тиристорного преобразователя;

$R_{\text{я}}, L_{\text{я}}$ – активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки двигателя;

I – ток якорной обмотки;

c – конструктивная постоянная двигателя;

J – момент инерции механической нагрузки, приведенный к валу двигателя;

$K_{\text{т}}$ – коэффициент передачи датчика тока;

$K_{\text{с}}$ – коэффициент передачи датчика скорости;

$M_{\text{с}}$ – возмущающее воздействие (момента нагрузки);

M – электромагнитный момент двигателя;

Исходные данные для расчета системы приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Параметр	Варианты												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$u_{зад}, В$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
K_{pc}	5	10	15	15	8	8	5	9	10	12	15	5	8
$T_{pc}, с$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0,2	0
$K_{рт}$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$T_{рт}, с$	0,02	0,25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$k_{ТП}$	40	47	37	37	30	40	37	38	37	37	35	37	30
$R_{Я}, Ом$	2	1	0,8	2	0,5	1,5	1	2	0,5	1	2	0,45	0,5
$L_{Я}, мГн$	50	75	100	120	0,03	20	30	80	50	90	80	20	25
$c, В \cdot с / рад$	2	1,3	1,5	1	2	1	1,5	1	1,8	1	2	1	2
$J, кг \cdot м^2$	0,04	0,4	0,08	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
$k_t, В / А$	0,14	0,14	0,15	0,01	0,05	0,01	0,1	0,01	0,14	0,2	0,12	0,12	0,01
$k_c, В \cdot с / рад$	0,1	0,1	0,1	0,1	10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
$M_c, Н \cdot м$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	15	10

Модель системы в MATLAB представлена на рис 9.3 - рис.9.5.

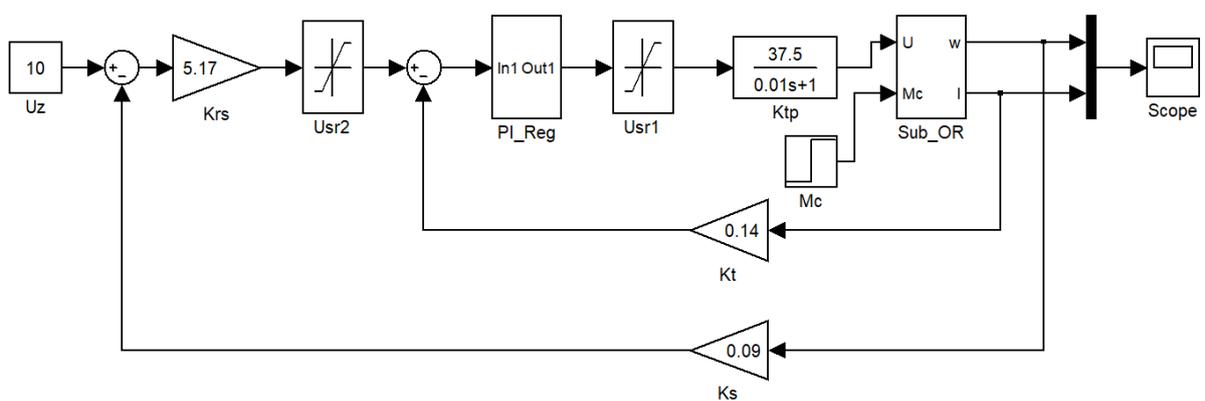


Рис.9.3. Модель системы.

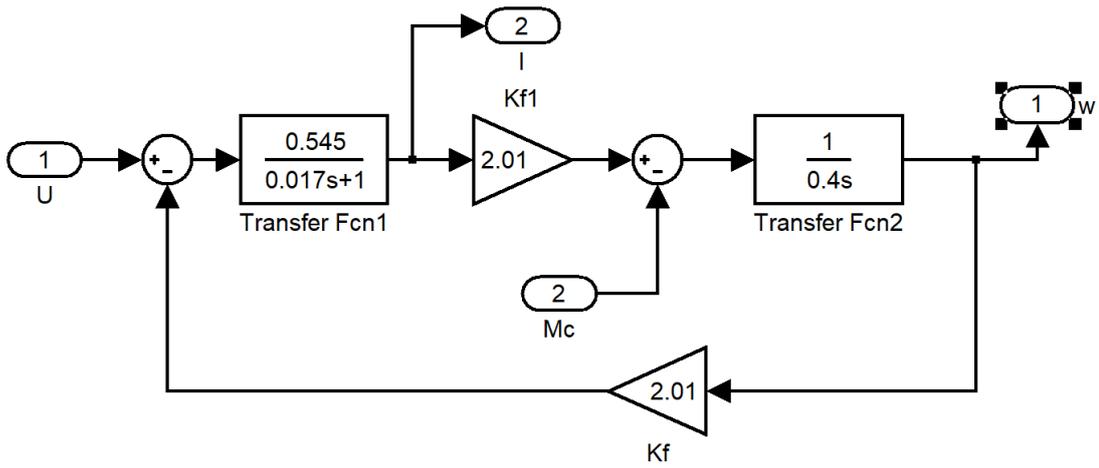


Рис.9.4. Модель объекта регулирования (SUB_OR).

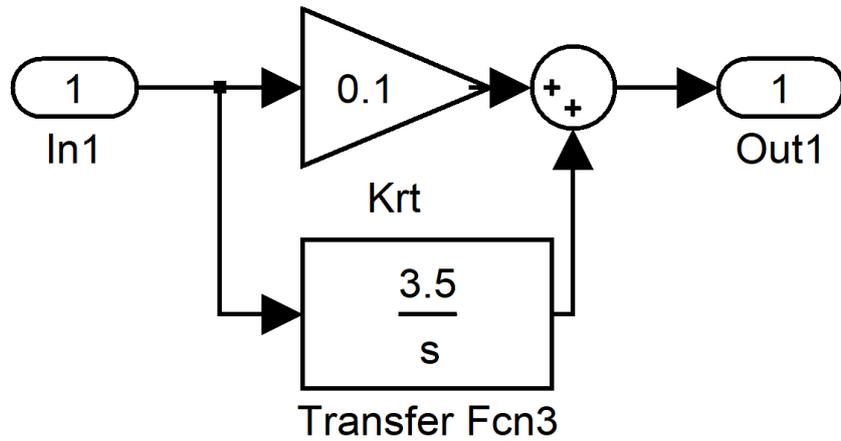


Рис.9.5. Модель PI регулятора (PI_Reg).

Результаты расчёта изображены на рис. 9.6.

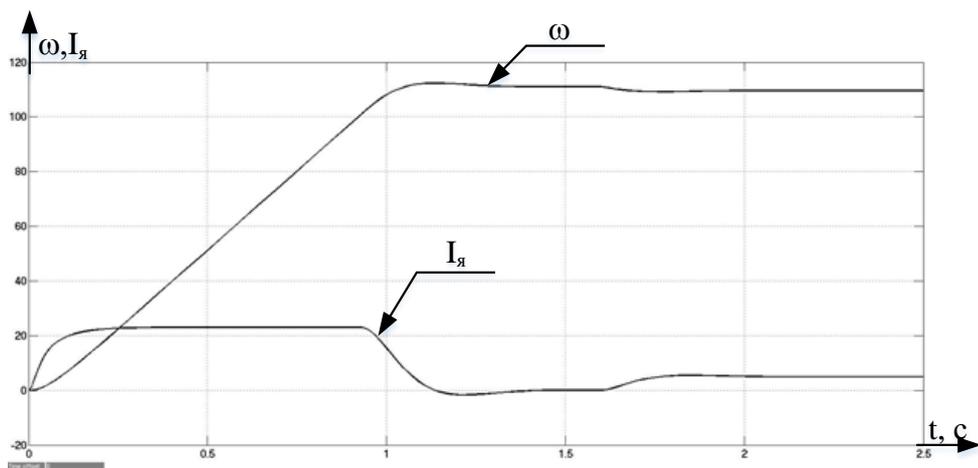


Рис. 9.6. Результаты расчёта

Для выявления влияния нелинейных элементов на пусковые характеристики системы составим модель, представленную на рис.9.7.

Subsyst_non lin – модель системы с нелинейными элементами (рис.9.3).

Subsyst_lin – модель системы без нелинейных элементов (рис.9.3).

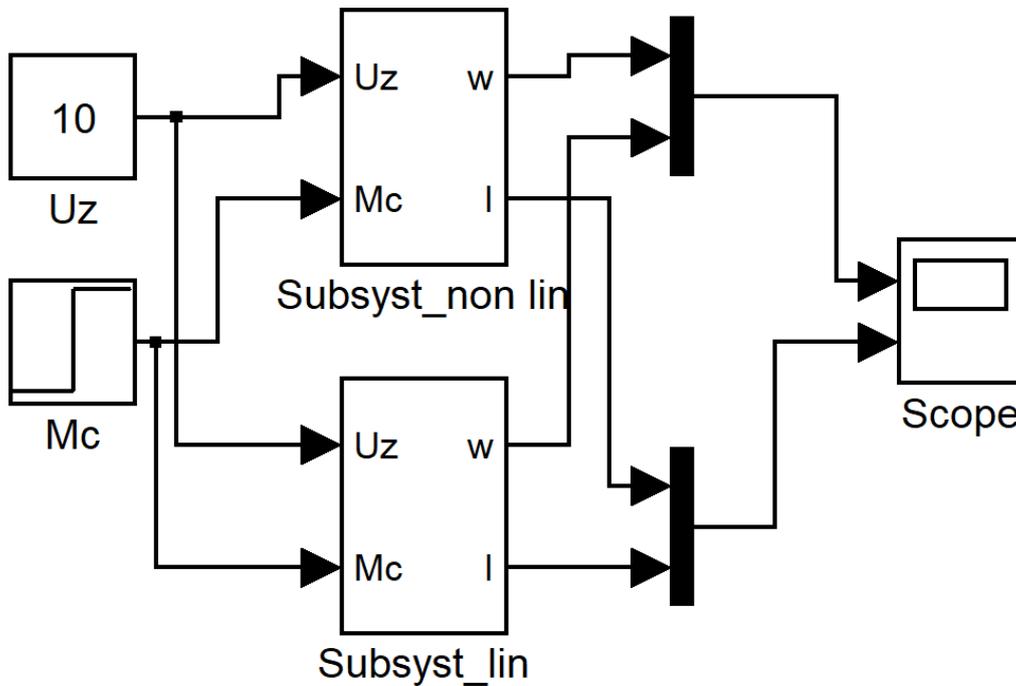


Рис.9.7. Модель для сравнения динамических характеристик линейной и нелинейной систем.

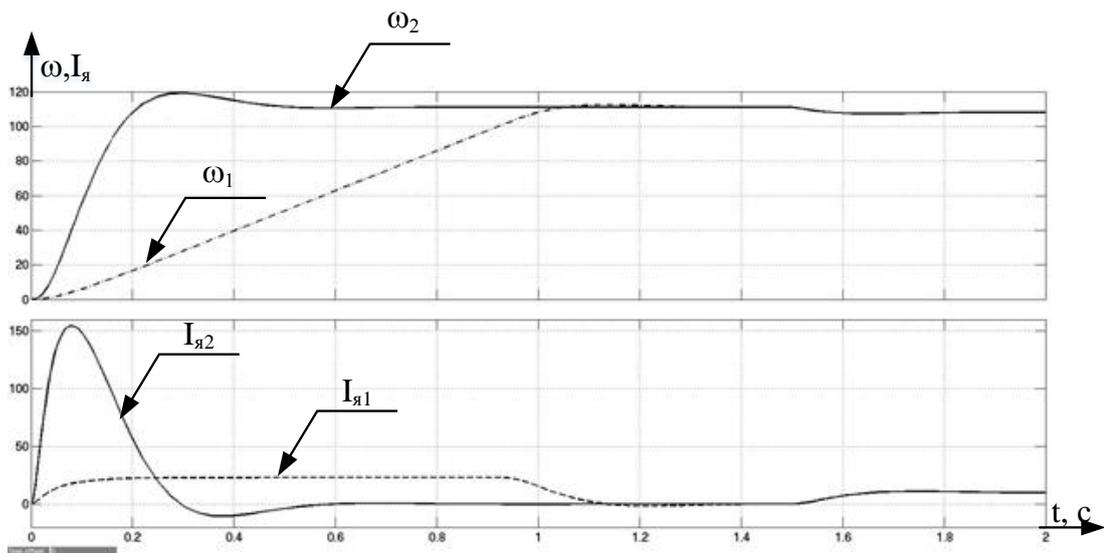


Рис.9.8. Пусковые характеристики нелинейной ($I_{я1}$, ω_1) и линейной систем ($I_{я2}$, ω_2).

Задание

1. Набрать модель исследуемой системы (Рис. 9.1).
2. Провести исследование динамических характеристик системы.
3. Исследовать влияния нелинейных элементов на пусковые характеристики системы.

Содержание отчета. Отчет должен содержать:

1. Заданные схемы и модели с параметрами.
2. Коды программ.
3. Рассчитанные характеристики, выполненные в MATLAB.
4. Выводы.

Контрольные вопросы.

1. Как нелинейности, используемые в системе, влияют на динамические характеристики системы?
2. Объясните влияния нелинейных элементов на пусковые характеристики системы.
3. Приведите нелинейные характеристики, наиболее часто встречающиеся на практике.
4. Какие существуют особенности нелинейных систем автоматического управления?

Практическое занятие 10

Исследование автоматической системы стабилизации постоянного напряжения

Возможно, ни одна электронная плата не может обойтись сегодня хотя бы без одного источника стабильного постоянного напряжения.

Нормальная работа электронных устройств возможна при поддержании напряжения питания в указанных допустимых пределах. Например, для питания измерительных устройств, работающих с точностью 0,1%, требуется стабильность напряжения питания 0,01%. Большинство выпрямителей не обеспечивают заданной стабильности напряжения. Изменение напряжения питания может произойти из-за изменения напряжения в сети переменного тока или из-за изменения постоянного тока в устройстве. При изменении сопротивления нагрузки изменяется ток и падение напряжения на внутреннем сопро-

тивлении выпрямительных устройств, что приводит к изменению питающего напряжения.

Для поддержания напряжения питания в допустимых пределах между фильтром и нагрузкой включается устройство, называемое стабилизатором напряжения

Принципиальная электрическая схема системы автоматической стабилизации постоянного напряжения показана на рис. 10.1. [3]

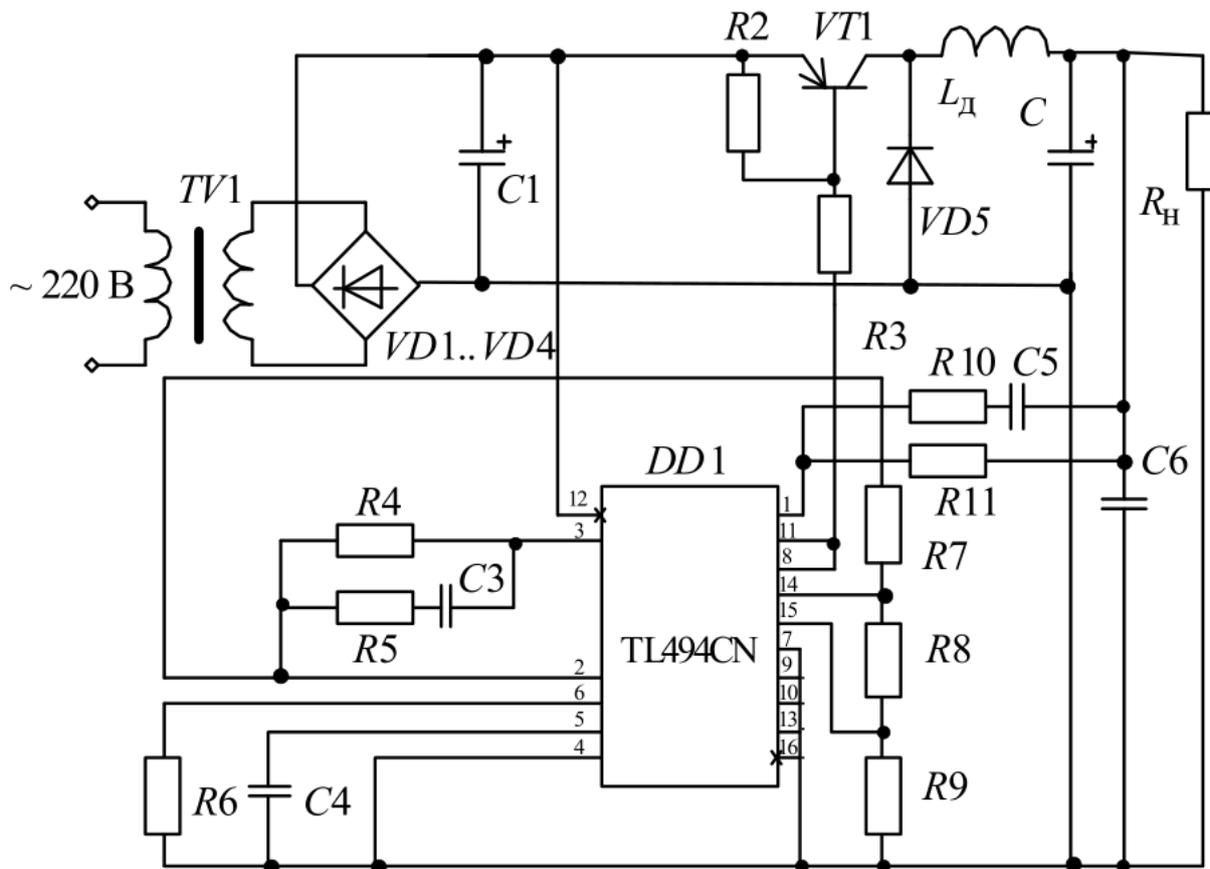


Рис.10.1. Принципиальная схема стабилизатора постоянного напряжения

Электропитание стабилизатора осуществляется от сети 220 В, 50 Гц через понижающий трансформатор TV1. На диодах VD1 –VD4 реализован выпрямитель переменного напряжения. Конденсатор C1 предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Силовой транзисторный ключ выполнен на транзисторе VT1. Дроссель напряжением задания и формирование широтно-модулированного сигнала управления силовым ключом VT1. Конденсатор C5 выполняет роль дифференцирующего элемента в цепи обратной связи.

Структурная схема непрерывной модели системы приведена на рис. 10.2 [3].

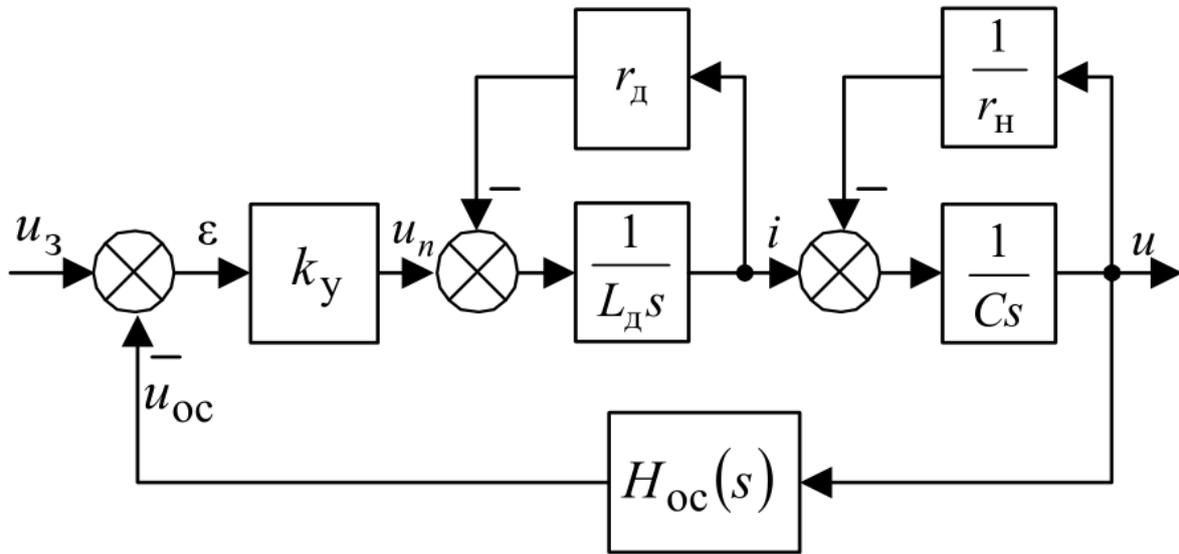


Рис. 10.2. Структурная схема автоматической системы стабилизации постоянного напряжения.

На схеме обозначено:

u_3 —сигнал задания;

ε —ошибка регулирования;

k_y —общий коэффициент передачи ШИМ преобразования;

u_n —среднее значение выходного напряжения ШИМ-преобразователя;

L_d, r_d —индуктивность и активное сопротивление дросселя;

i, u —ток и напряжение;

C —емкость конденсатора;

r_n — сопротивление нагрузки;

$H_{oc}(s)$ —передаточная функция цепи обратной связи;

$$H_{oc} = k_{oc} \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}$$

k_{oc} — коэффициент обратной связи;

T_1, T_2 — постоянные времени интегро-дифференцирующего корректирующего устройства в цепи обратной связи.

Модель автоматической системы стабилизации постоянного напряжения представлена на рис.10.3

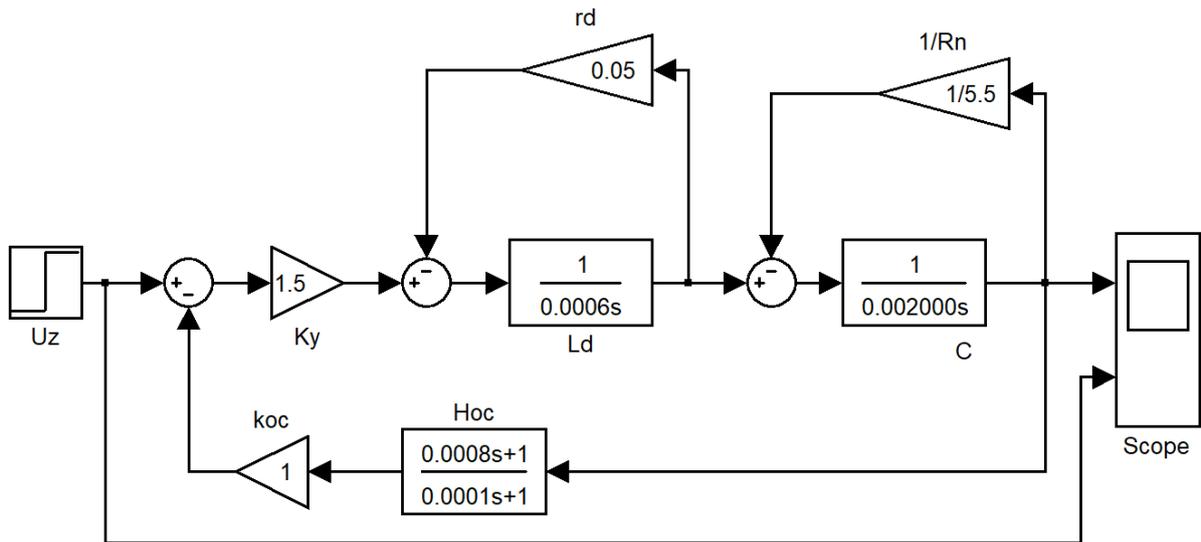


Рис. 10.3. Модель автоматической системы стабилизации постоянного напряжения.

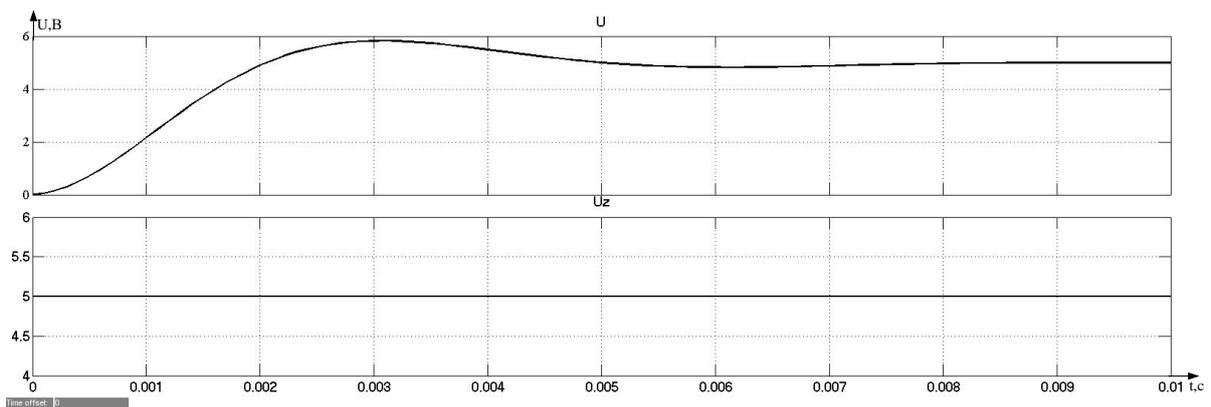


Рис. 10.4. Динамическая характеристика автоматической системы стабилизации постоянного напряжения

Проведем исследование модели при различных значениях задающего напряжения. Модель системы представлена на рис 10.5.

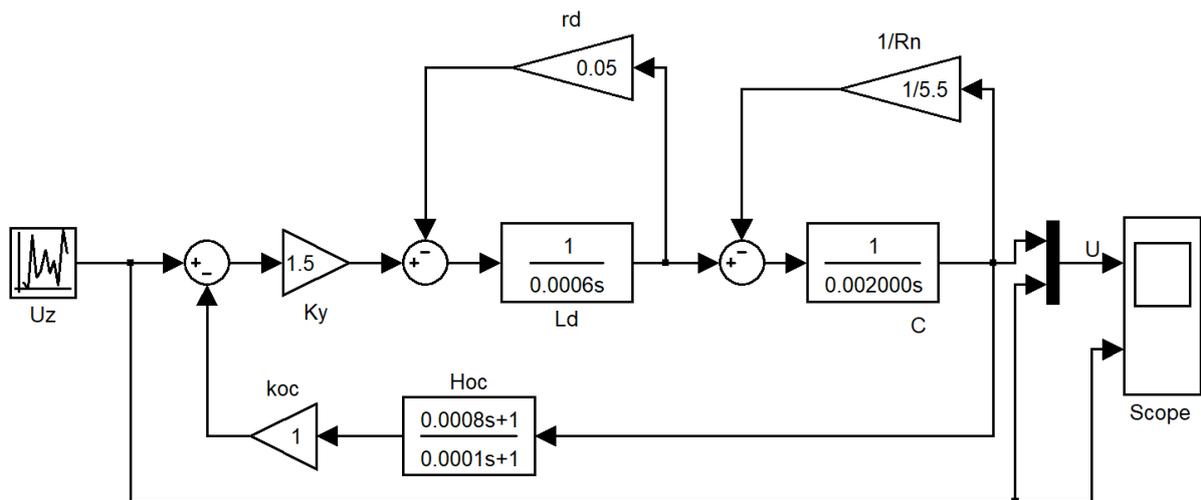


Рис. 10.5. Модель автоматической системы стабилизации постоянного напряжения.

Результаты расчета представлены на рис.10.6. Система работает стабильно при набросах и сбросах напряжения задания.

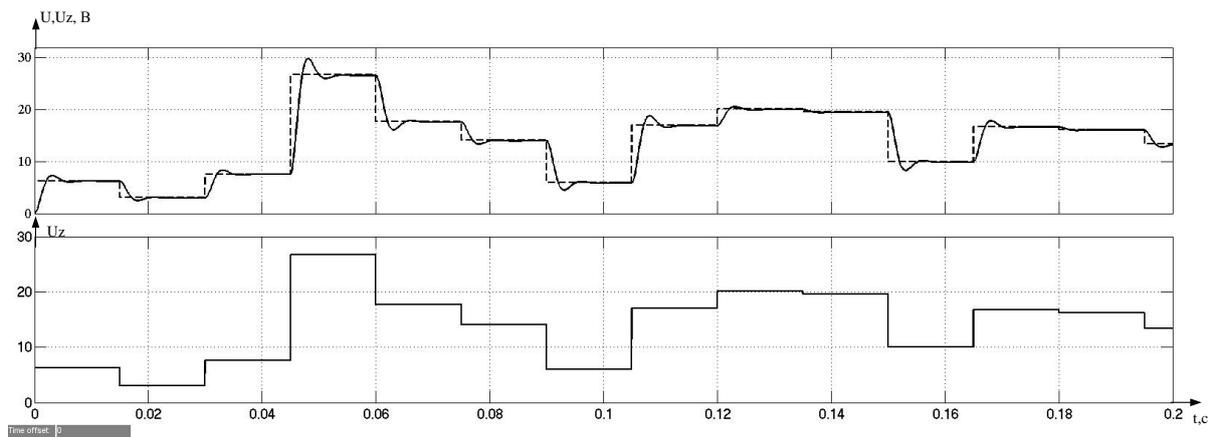


Рис. 10.6. Динамическая характеристика автоматической системы стабилизации постоянного напряжения при различных U_z .

Вычислим в системе MatLab передаточные функции САР разомкнутой H_p и замкнутой системы H_z и передаточную функцию по ошибке H_e . Код программы представлен на рис.10.7.

```

%Вычисление передаточной функции
Ky=1.5;T1=0.0008;T2=0.0001; % Ввод данных.
Ld=0.0006;Rn=5.5;C=0.02;rd=0.05;% Ввод данных.
H11=tf([1],[Ld 0]); % вычисление передаточной функции H11.
H1=feedback(H11,rd);% вычисление передаточной функции H1.
H21=tf([1],[C 0]);% вычисление передаточной функции H21.
H2=feedback(H21,1/Rn);% вычисление передаточной функции H2.
Hp=Ky*H1*H2;% вычисление передаточной функции разомкнутой си-
стемы Hp.
Hoc=tf([T1 1],[T2 0]);% вычисление передаточной функции H21.
Hz=feedback(H,Hoc)% вычисление передаточной функции разомкну-
той системы Hz.
He=feedback(1,Hp*Hoc)% вычисление передаточной функции систе-
мы по ошибке He.

```

Рис.10.7. Код программы для вычисления передаточных функций.

$$H_p(s) = \frac{1.5}{1.2e-005 s^2 + 0.001109 s + 0.009091}$$

$$H_z(s) = \frac{0.00015 s + 1.5}{1.2e-010 s^3 + 1.25e-006 s^2 + 0.001703 s + 1.533}$$

$$H_e(s) = \frac{1.2e-009 s^3 + 1.109e-007 s^2 + 9.091e-007 s}{1.2e-009 s^3 + 1.109e-007 s^2 + 0.001201 s + 1.5}$$

Определим устойчивость системы в замкнутом состоянии, критический коэффициент усиления, построим область устойчивости в плоскости параметров K_y и T_1

Характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид:
 $1.2 * 10^{-10} s^3 + 1.25 * 10^{-6} s^2 + 0.001703 s + 1.533 = 0$.

Определим устойчивость системы, используя алгебраический критерий Гурвица, для этого составим матрицу с коэффициентами характеристического уравнения.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1.25 * 10^{-6} & 1,533 & 0 \\ 1.2 * 10^{-10} & 0.001703 & 0 \\ 0 & 1.25 * 10^{-6} & 1,533 \end{vmatrix}$$

Необходимое условие: $a_0 = 1.2 * 10^{-10} > 0$; $a_1 = 1.25 * 10^{-6} > 0$; $a_2 = 0.001703 > 0$; $a_3 = 1,533 > 0$.

Для того чтобы проверить достаточное условие для уравнения третьего порядка необходимо провести вычисление минора второго порядка матрицы. Он должен быть больше нуля. Проведем вычисление с помощью Matlab. Код программы представлен на рис 10.8

```
%Вычисление миноров матрицы выполним с помощью Matlab
M=[1.25e-6 1.533 0;1.2e-10 0.0011703 0;0 1.25e-6 1.533]
M1=M(1,1)
M2=M(1:2,1:2)
M3=M(1:3,1:3)
D1=det(M1)
D2=det(M2)
D3=det(M3)
```

Рис. 10.8. Вычисление миноров матрицы.

Результаты вычислений представлены ниже:

$$D1 = 1.2500e-006$$

$$D2 = 1.2789e-009$$

$$D3 = 1.9606e-009$$

Достаточные условия выполняются, так как определитель ($D_2 > 0$). Из выше сказанного можно сделать вывод, что система устойчива.

Рассмотрим расчёт зависимости выходного напряжения U , тока I и ошибки регулирования ε в зависимости от напряжения задания U_z . Модель для расчёта выше указанных зависимостей изображена на рис.10.9.

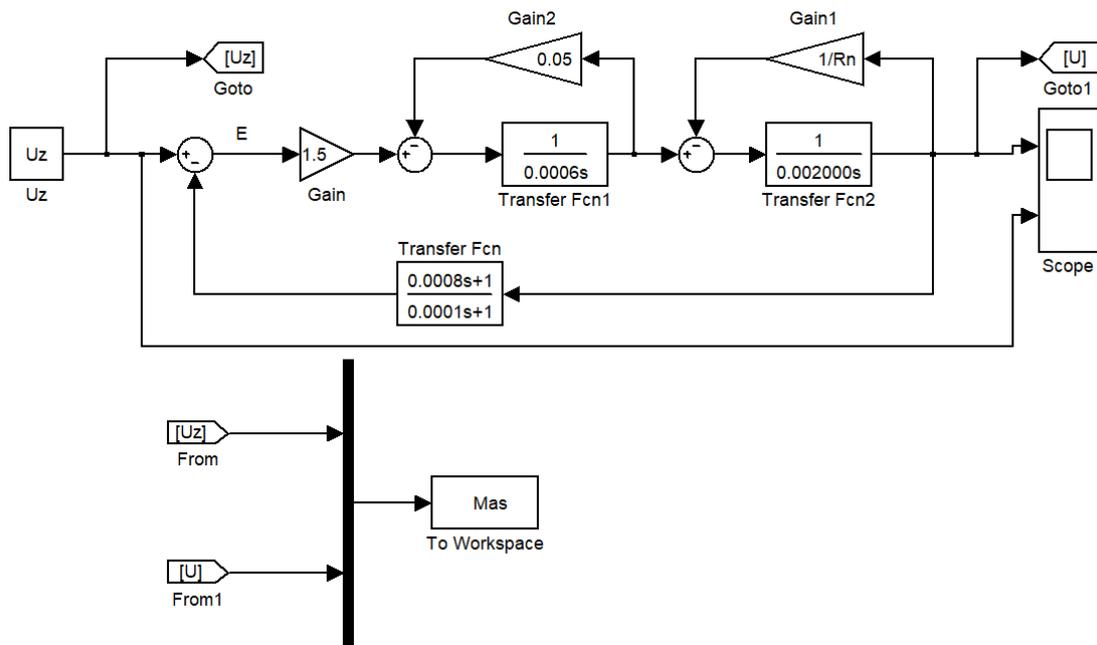


Рис. 10.9. Модель для расчета зависимости напряжения от тока нагрузки.

Код программы для расчета зависимости напряжения от тока нагрузки представлен на рис 10.10.

```

for k1=1:1:3;
    Uz=3*k1;% величина напряжения задания;
for k=1:1:59;
    Rn=120-2*k;% величина сопротивления нагрузки;
    sim('RT3') % команда обращения к модели;
    A(k,1)=Mas(1);% Uz;
    A(k,2)=Mas(2);% U;
    A(k,3)=Rn;% Rn;
    A(k,4)=Mas(2)/Rn;% I;
end
plot(A(1:k,4),A(1:k,2),'k');
hold on;
end
hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно;
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;

```

Рис.10.10. Код программы для вычисления зависимости напряжения от тока нагрузки.

Результаты расчета изображены на рис.10.11

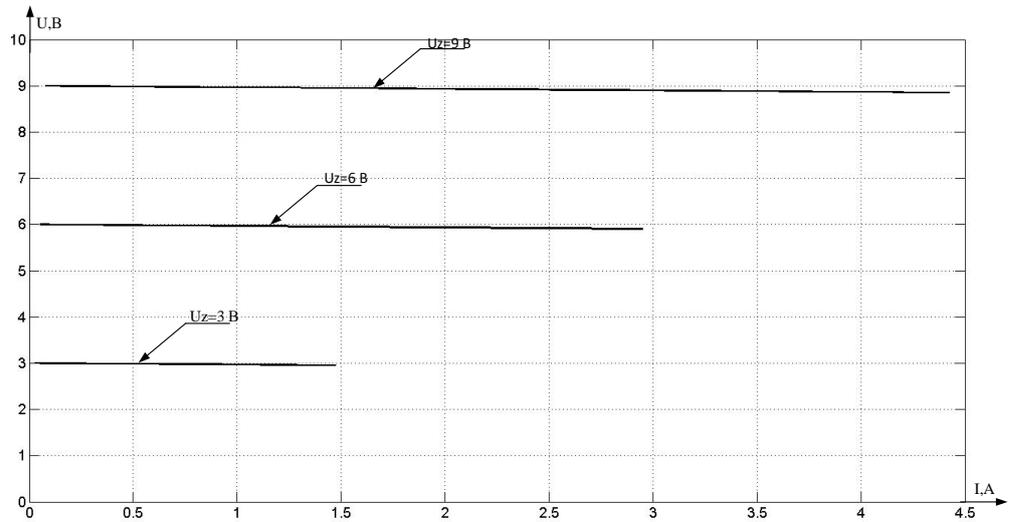


Рис.10.11. Зависимость напряжения от тока нагрузки при разных U_z

Рассчитаем зависимость ошибки регулирования ε от сопротивления нагрузки R_n . Модель представлена на рис.10.12.

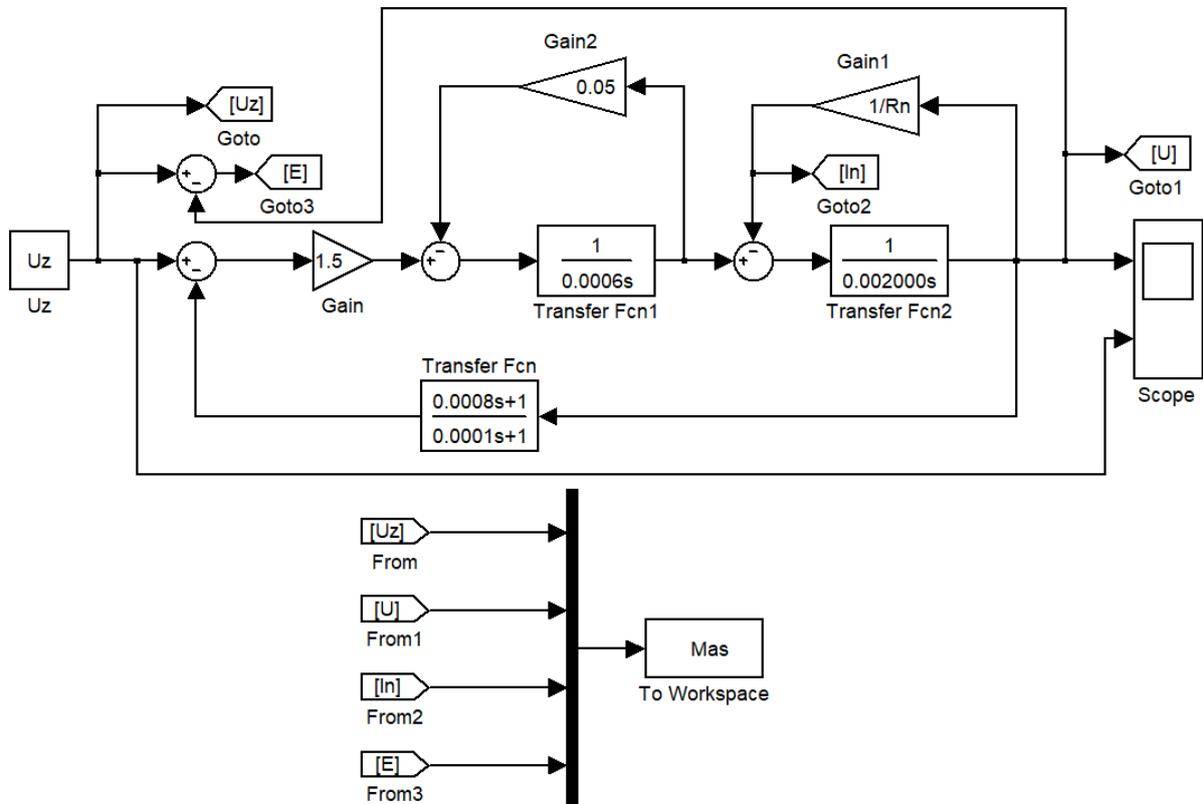


Рис. 10.12. Модель для расчета зависимости ошибки регулирования ε от сопротивления нагрузки R_n .

Код программы для расчета статической ошибки при разных напряжениях задания представлен на рис 10.13

```
%Код программы для расчета статической ошибки
for k1=1:1:3;
    Uz=3*k1;
for k=1:1:59;
    Rn=120-2*k;% величина сопротивления нагрузки;
    sim('RT4') % команда обращения к модели;
    A(k,1)=Mas(1);% Uz;
    A(k,2)=Mas(2);% U
    A(k,3)=Mas(3);% In
    A(k,4)=Mas(4);% E
    A(k,5)=Rn;% Rn
end
plot(A(1:k,5),A(1:k,4),'k');
hold on;
end
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;
```

Рис.10.13. Код программы для расчета статической ошибки.

Результаты расчёта показаны на рис.10.14.

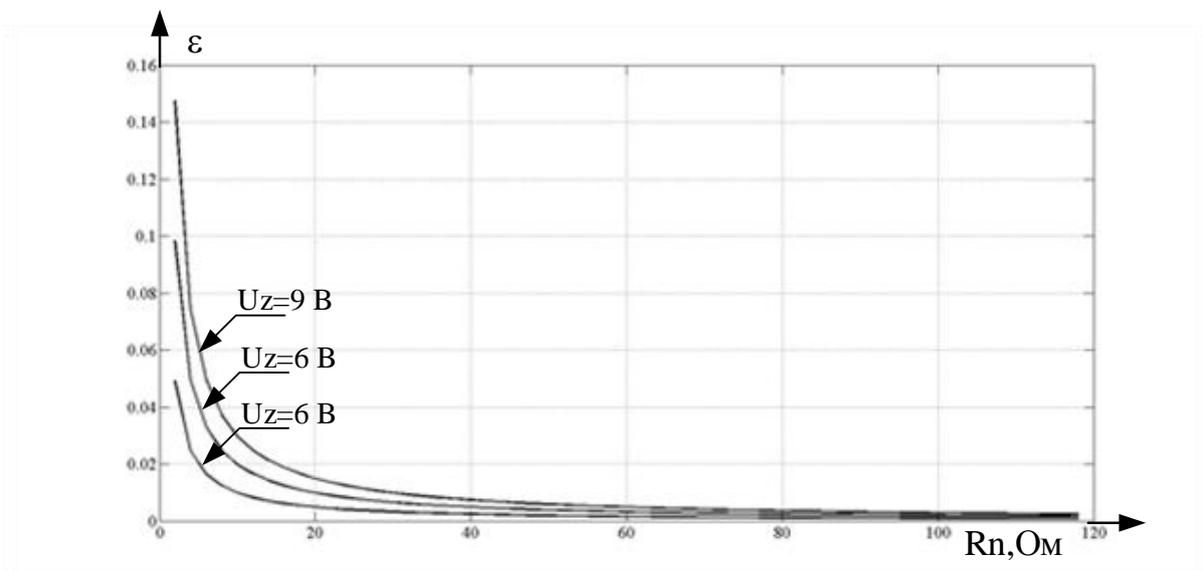


Рис. 10.14. Зависимости ошибки регулирования от сопротивления нагрузки R_n .

Рассмотрим, как ошибка регулирования зависит от величины постоянной времени T_1 . С этой целью составим модель, представленную на рис.10.15 и код программы на рис.10.16.

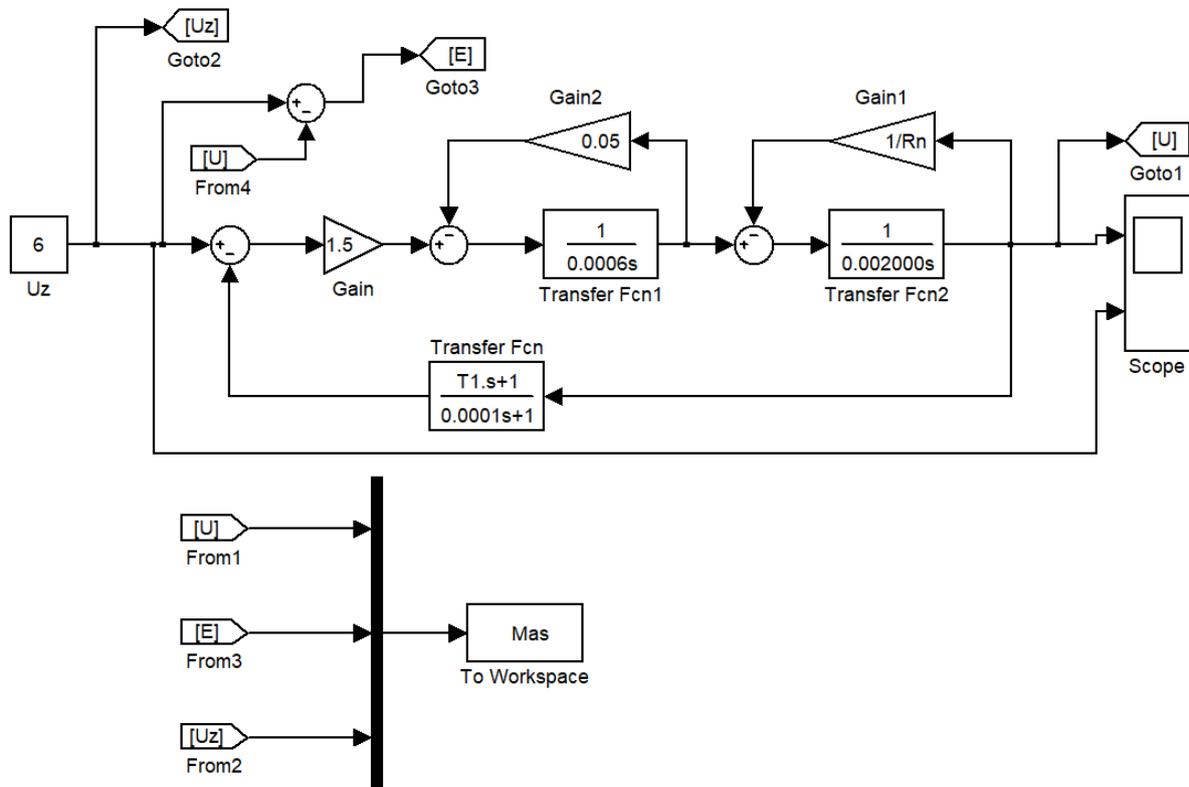


Рис. 10.15. Модель для расчета зависимости величины ошибки регулирования от величины постоянной времени T_1 .

```

%Код программы для расчета статической ошибки.
clear, clc
Uz=6;
for k1=1:15:32;
    T1=0.0008*k1;
for k=1:1:55;
Rn=120-2*k;% величина сопротивления нагрузки;
sim('RT3t1') % команда обращения к модели;
A(k,1)=Mas(1);% U
A(k,2)=Mas(2);% E
A(k,3)=Mas(3);% Uz
A(k,4)=Rn;% Rn
end
plot(A(1:k,4),A(1:k,2),'k');
hold on;
end
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;

```

Рис.10.16. Код программы для расчета зависимости величины ошибки регулирования от постоянной времени T_1 .

В результате моделирования были получены зависимости, представленные на рис 10.17.

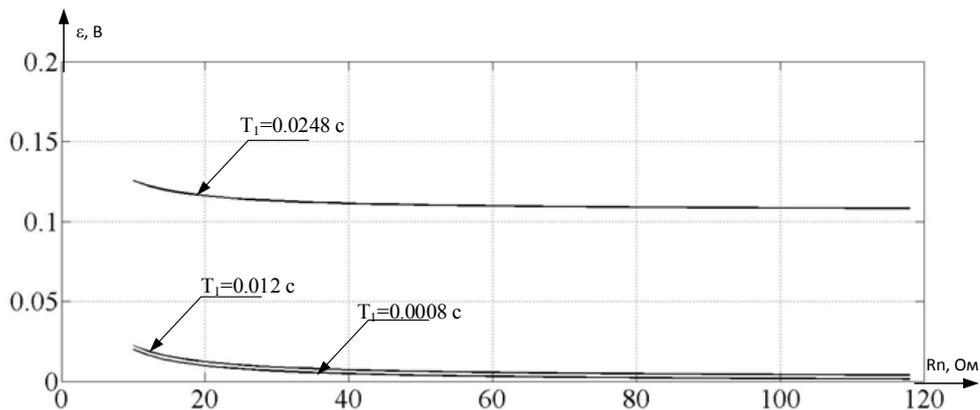


Рис.10.17. Зависимости величины ошибки регулирования от сопротивления нагрузки при $T_1 = \text{const}$.

```

%Код программы для расчета статической ошибки
clear, clc
Uz=6;
for k1=1:1:3;
    Rn=5.5*k1;
for k=1:1:30;
T1=0.0008*k;% величина сопротивления нагрузки;
sim('RT3t1') % команда обращения к модели;
A(k,1)=Mas(1);% U
A(k,2)=Mas(2);% E
A(k,3)=Mas(3);% Uz
A(k,4)=T1;% T1
end
plot(A(1:k,4),A(1:k,2),'k');
hold on;
end
grid on;%добавляет сетку к текущему графику;

```

Рис.10.18. Код программы для расчета зависимости величины ошибки регулирования от постоянной времени $T1$ при $Rn=const$.

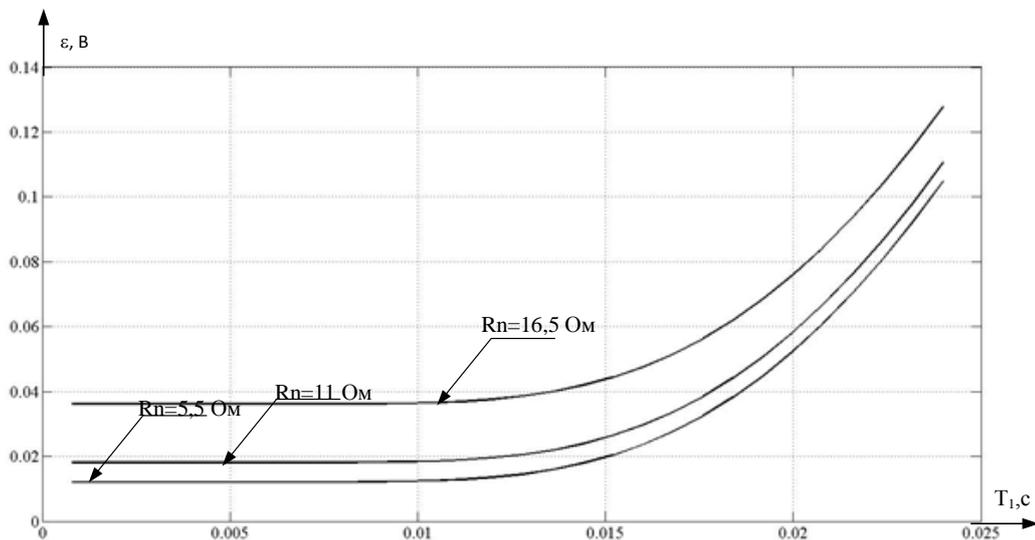


Рис.10.19. Зависимости величины ошибки регулирования от постоянной времени $T1$.

Задание

5. Набрать модель исследуемой системы (Рис. 10.3).
6. Провести исследование динамических характеристик системы.
7. Исследовать зависимость выходного напряжения U и ошибки регулирования в зависимости от напряжения задания $U_{\text{зад}}$ и сопротивления нагрузки R_n .
8. Построить область устойчивости системы в плоскости параметров k_u , T_1 .

Содержание отчета. Отчет должен содержать:

1. Заданные схемы и модели с параметрами.
2. Коды программ.
3. Рассчитанные характеристики, выполненные в MATLAB.
4. Выводы.

Контрольные вопросы.

1. Объясните роль дросселя L и конденсатора C в устройстве.
2. Как влияет величина постоянной времени T_1 на статические и динамические характеристики системы?
3. Проанализируйте возможность использования в системе релейного регулирующего устройства.
4. Какими способами можно уменьшить погрешность регулирования напряжения?

Практическое занятие 11

Моделирование устройств на базе операционных усилителей

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель напряжения, предназначенный для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами: их усиление или ослабление, сложение или вычитание, интегрирование или дифференцирование, логарифмирование или потенцирование, преобразование их формы и др. Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей положительной и отрицательной обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости и индуктивности, диоды, стабилитроны, транзисторы и некоторые другие электронные элементы [4]. Поскольку все операции, выполняемые при помощи ОУ, могут иметь нормированную погреш-

ность, то к его характеристикам предъявляются определенные требования.

Требования эти в основном сводятся к тому, чтобы ОУ как можно ближе соответствовал идеальному источнику напряжения, управляемому напряжением с бесконечно большим коэффициентом усиления. А это значит, что входное сопротивление ОУ должно быть равно бесконечности, а, следовательно, входной ток должен быть равен нулю. Выходное сопротивление должно быть равно нулю, а, следовательно, нагрузка не должна влиять на выходное напряжение. Частотный диапазон усиливаемых сигналов должен простирается от постоянного напряжения до очень высокой частоты. Поскольку коэффициент усиления ОУ очень велик, то при конечном значении выходного напряжения напряжение на его входе должно быть близким к нулю [4].

Рассмотрим основные параметры идеального ОУ.

1. Коэффициент усиления по напряжению стремится к бесконечности ($K_{U0} \rightarrow \infty$).
2. Входное сопротивление стремится к бесконечности ($R_{ВХ} \rightarrow \infty$).
3. Выходное сопротивление стремится к нулю ($R_{ВЫХ} \rightarrow 0$).
4. Бесконечная полоса усиливаемых частот ($f_B \rightarrow \infty$).
5. Отсутствует дрейф нуля (если $U_{ВХ} = 0$, то и $U_{ВЫХ} = 0$).

Рассмотрим моделирование устройств на базе операционных усилителей. В библиотеке SimPowerSystems нет специального блока для операционного усилителя, но пользователь имеет возможность создать свой собственный блок, собрав его схему замещения из блоков вольтметров, источника напряжения и блоков основной библиотеки Simulink. Схема такого операционного усилителя представлена на рис.11.1 [6]. Иконка ОУ и окно параметров ОУ представлена на рис 11.2.

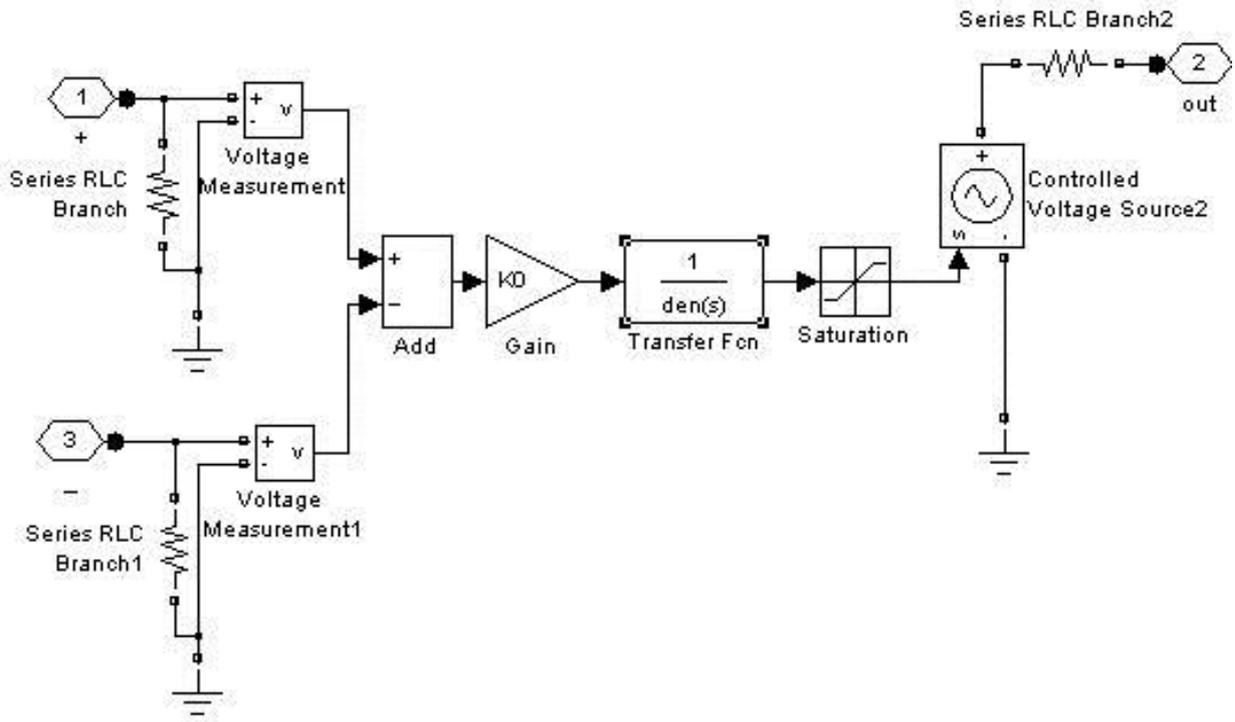
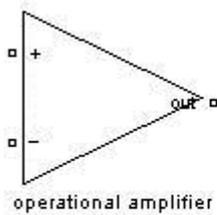


Рис.11.1. Модель ОУ.



operational amplifier

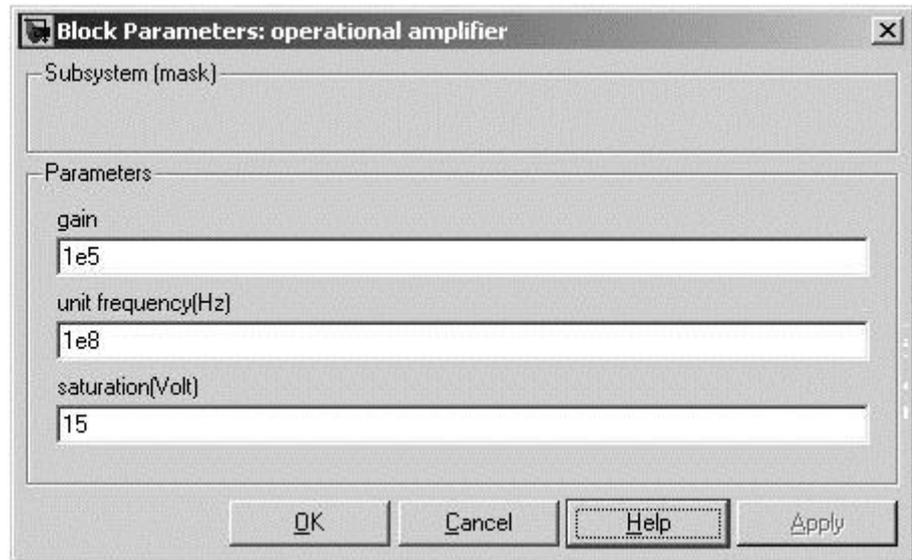


Рис. 11.2. Иконка ОУ и окно параметров ОУ.

Рассмотрим построение передаточной характеристики идеального ОУ в Matlab. Для этого составим две модели, которые приведены на рис 11.3 и рис.11.4

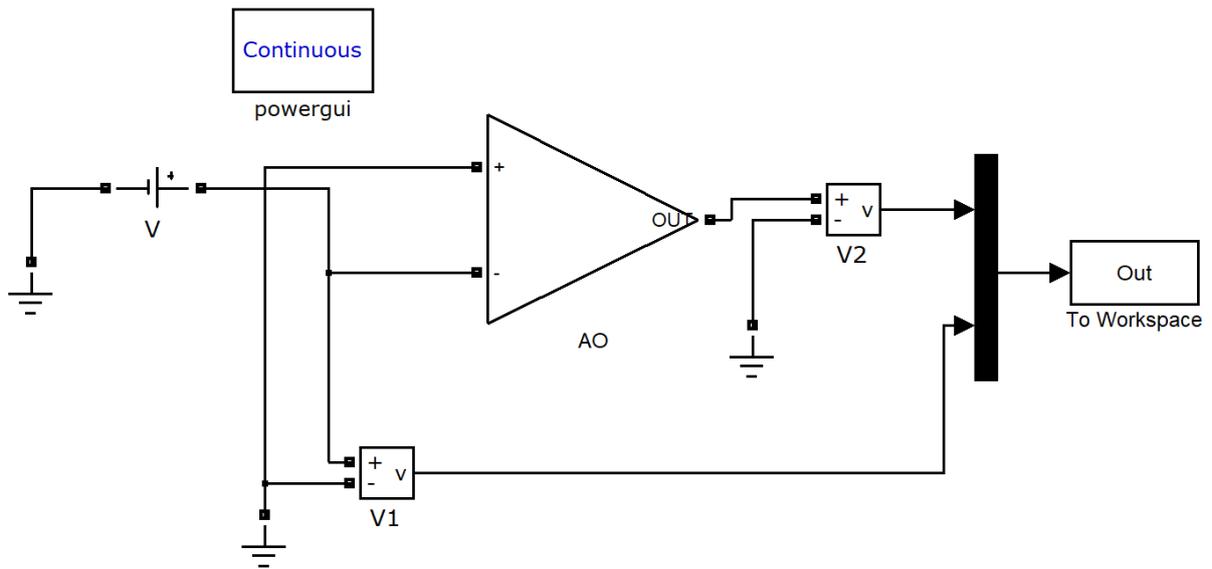


Рис. 11.3. Модель для расчета передаточной характеристики идеального ОУ для инвертирующего входа.

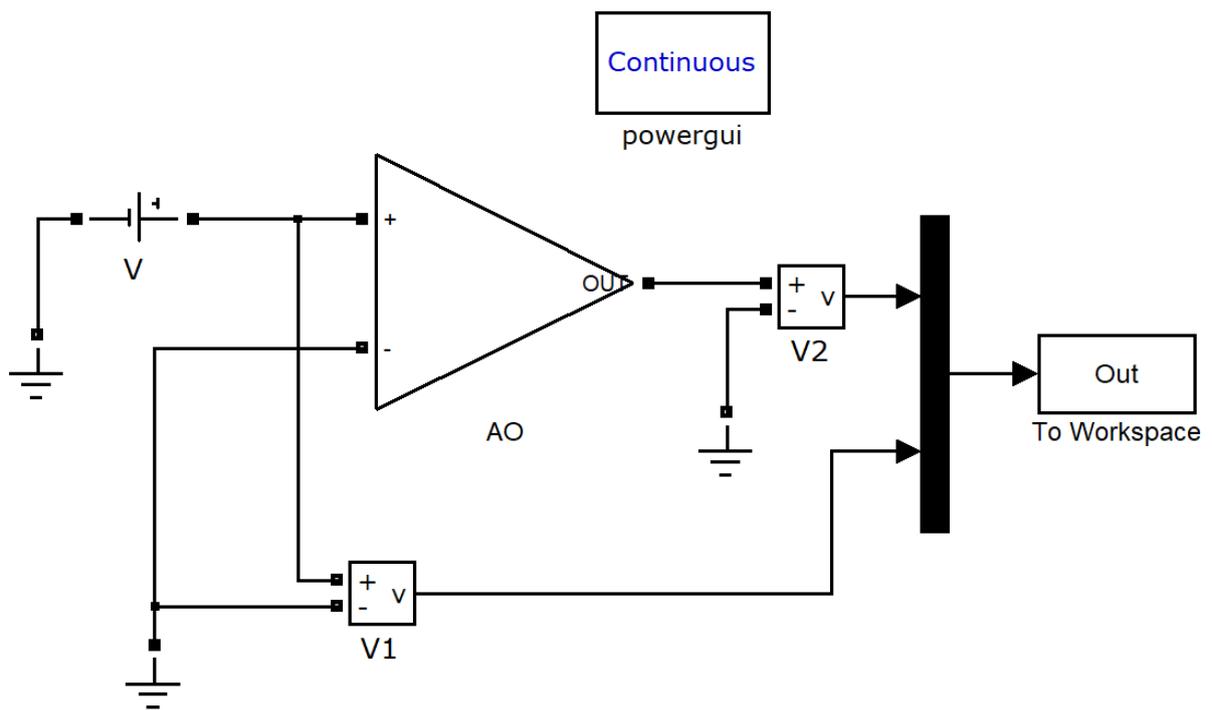


Рис. 11.4. Модель для расчета передаточной характеристики идеального ОУ для неинвертирующего входа.

Код программы для расчета передаточной характеристики идеального ОУ представлен на рисунке 11.5

```

for k=0:1:40;
    V=20e-5-1e-5*k;
    sim('VAXOY1_MDL')
    A(k+1,1)=Out(1);
    A(k+1,2)=Out(2);
    V=20e-5-1e-5*k;
    sim('VAXOY2_MDL')
    B(k+1,1)=Out(1);
    B(k+1,2)=Out(2);
end
plot(A(1:k,2),A(1:k,1), B(1:k,2), B(1:k,1), 'k')
hold on;
grid on;
axis([-20e-5 20e-5 -20 20])

```

Рис. 11.5. Код программы для расчета передаточной характеристики идеального ОУ

Результаты расчета передаточной характеристики идеального ОУ представлены на рис.11.6.

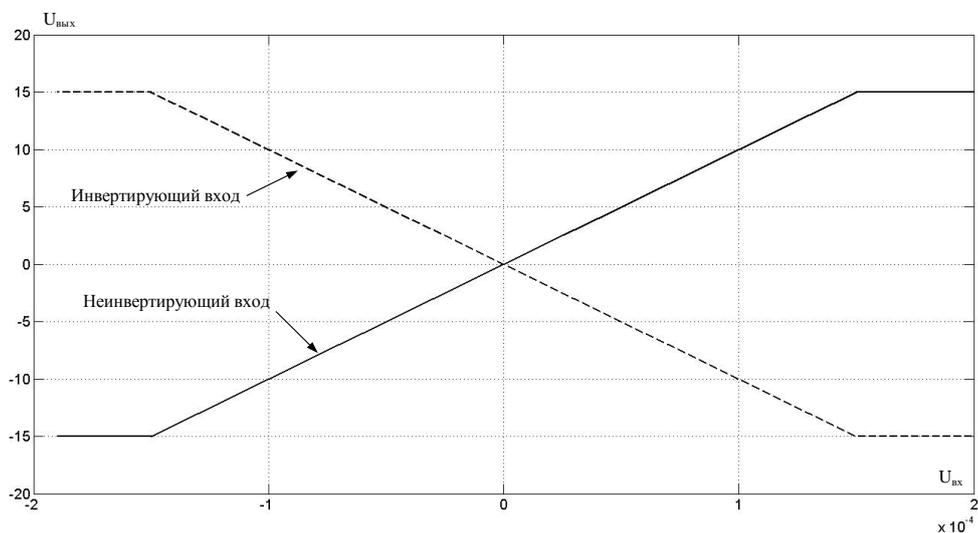


Рис.11.6 Рассчитанные передаточные характеристики идеального ОУ

Рассмотрим моделирование сумматора на базе идеального ОУ (рис.11.7).

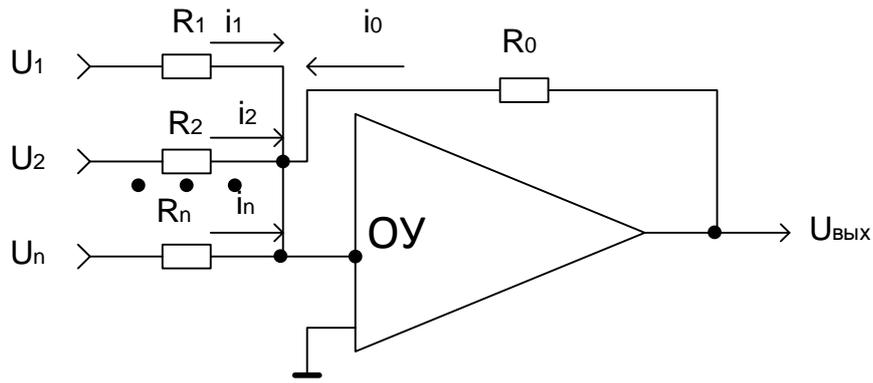


Рис.11.7. Схема сумматора.

В предположении, что операционный усилитель идеальный, можно получить следующие выражения:

$$i_0 + i_1 + \dots + i_n = 0$$

$$i_0 = i_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}/R_0; \quad i_1 = U_1/R_1 \quad \dots \quad i_n = U_n/R_n$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -((R_0/R_1)U_1 + \dots + (R_0/R_n)U_n)$$

Если $R_0 = R_1 = R_n$, то

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_0}{R_1} \sum_{i=1}^n U_{\text{ВХ}}$$

Модель сумматора на базе ОУ представлена на рисунке рис.11.8

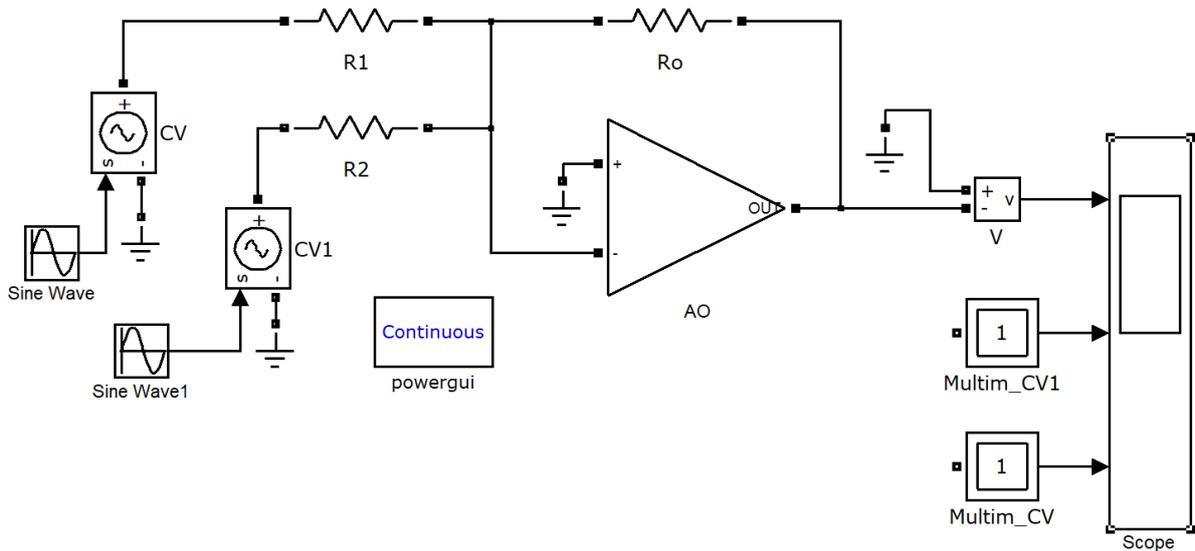


Рис.11.8. Модель сумматора на базе ОУ.

В модели реализовано сложение двух синусоидальных сигналов с амплитудами 3 и 4 вольта и частотой 50 герц.

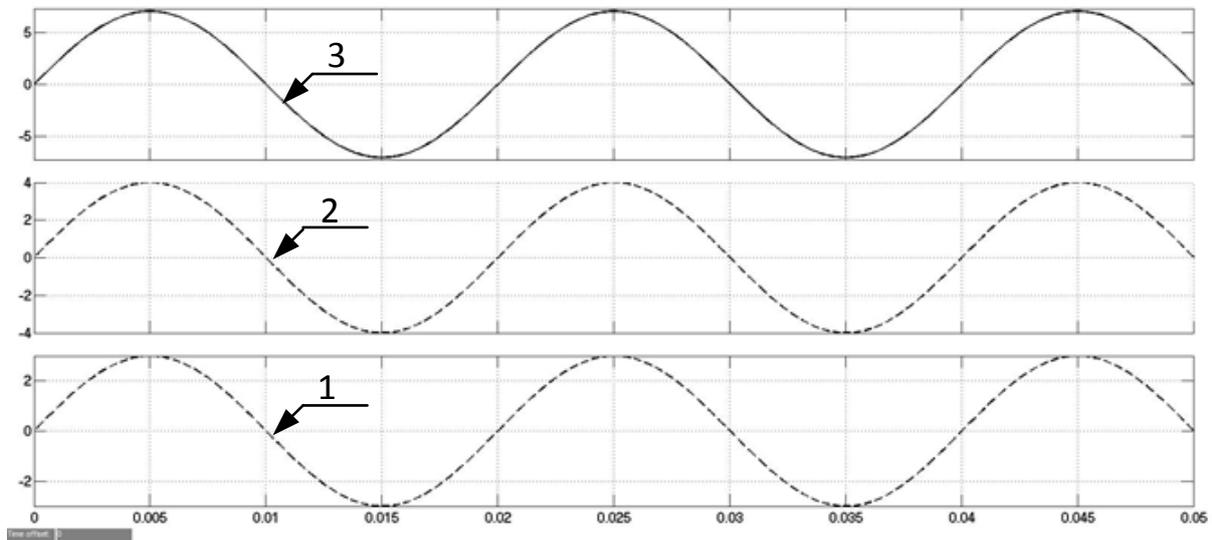


Рис.11.9. Результаты расчета.

На рис.11.9 представлены следующие кривые:

1. $u_1=3\sin(314t)$;
2. $u_2=4\sin(314t)$;
3. $u_3=7\sin(314t)$;

Рассмотрим схему интегрирования на базе ОУ. Она представлена на рис.11.10.

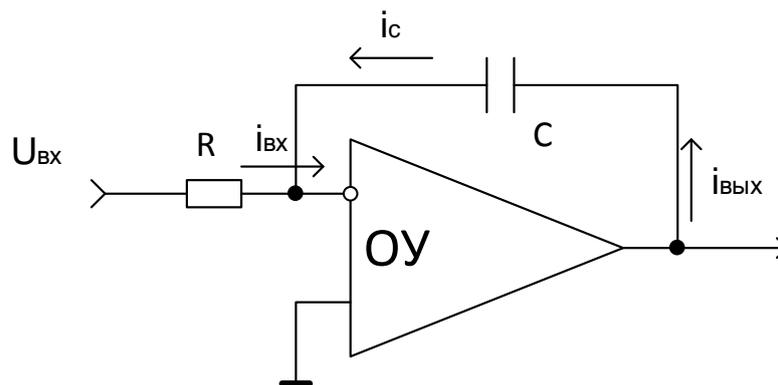


Рис.11.10. Схема интегрирования на ОУ.

В предположении, что усилитель идеальный, можно записать:
 $i_{ВХ} = -i_c$; $i_{ВХ} = U_{ВХ}(t)/R$; $i_c = d(CU_c)/dt$; $U_c = U_{ВЫХ}(t) \Rightarrow I_c = C(dU_{ВЫХ}(t)/dt)$;
 $U_{ВХ}(t)/R = -C(dU_{ВЫХ}(t)/dt)$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -1/RC \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt$$

Модель схемы интегрирования на ОУ представлена на рис. 11.11.
 $R=1000 \text{ Ом}$; $C=10 \text{ мкФ}$.

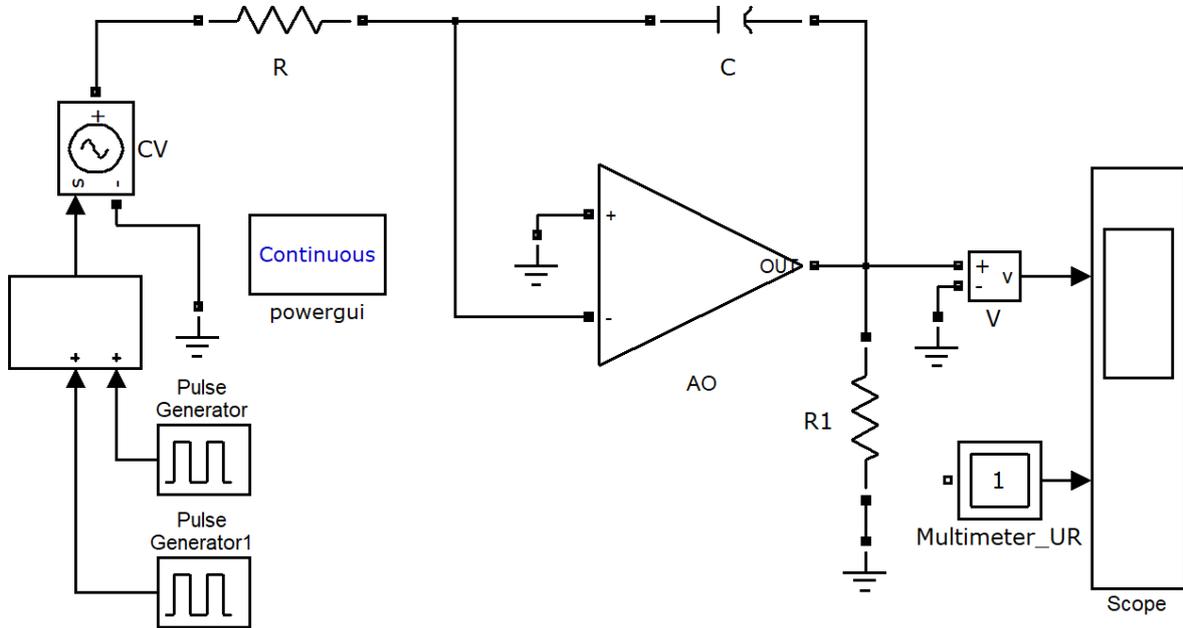


Рис.11.11. Модель схемы интегрирования на ОУ.

На вход модели подается напряжение прямоугольной формы (рис.11.12). Результаты моделирования представлены на рис 11.12.

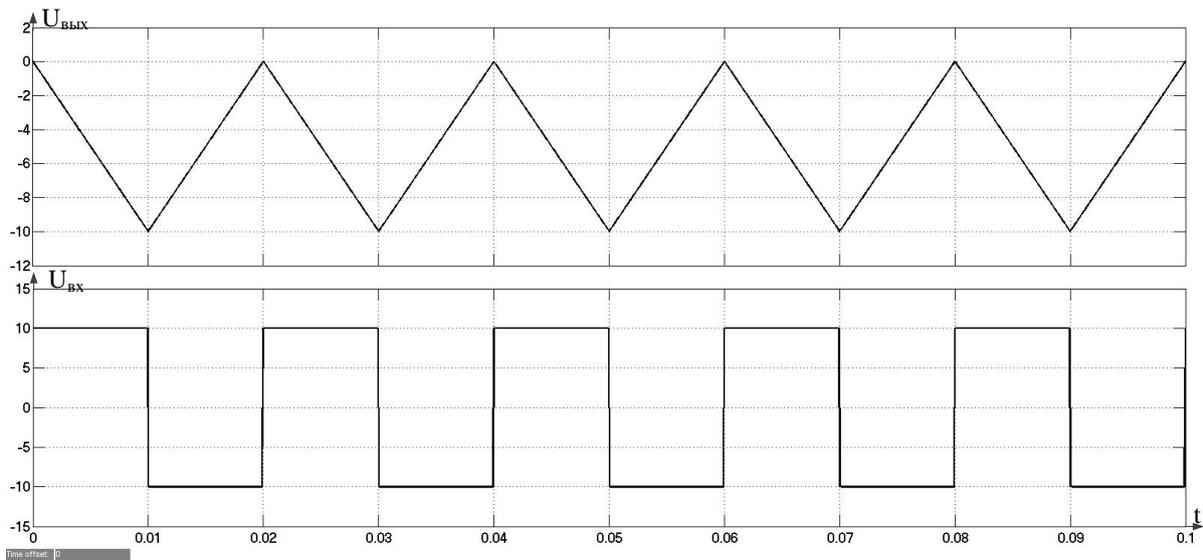


Рис.11.12. Результаты интегрирования сигнала прямоугольной формы.

Рассмотрим схему дифференцирования на базе ОУ. Она представлена на рис.11.13.

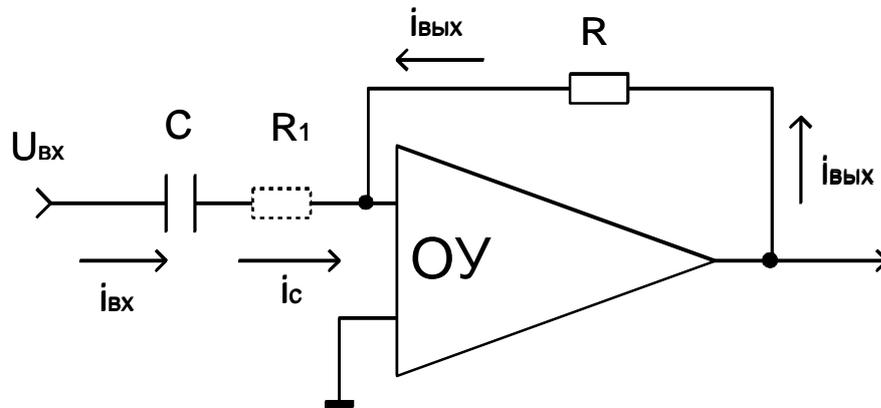


Рис.11.13. Схема дифференцирования на базе ОУ.

Для схемы (рис.11.13), можно получить следующие выражения:

$$i_c = -i_{\text{ввых}}$$

$$i_c = i_{\text{вх}} = C \cdot (dU_{\text{вх}}(t)/dt)$$

$$i_{\text{ввых}} = U_{\text{ввых}}(t)/R$$

$$U_{\text{ввых}}(t) = -RC(dU_{\text{вх}}(t)/dt)$$

$RC = T_d$ – постоянная времени дифференцирования.

Погрешности ОУ, в частности его конечное быстродействие, приводят к погрешностям дифференцирования.

В реальных дифференциаторах на входе последовательно с конденсатором обычно используется дополнительный резистор, который ограничивает входные токи при скачке напряжения $U_{\text{вх}}$ с целью устранения перегрузки ОУ.

Рассмотрим дифференцирование синусоидального напряжения. Модель дифференцирования на базе ОУ показана на рис.11.14. $R=300$ Ом; $C= 50$ мкФ. Результаты дифференцирования представлены на рис.11.15.

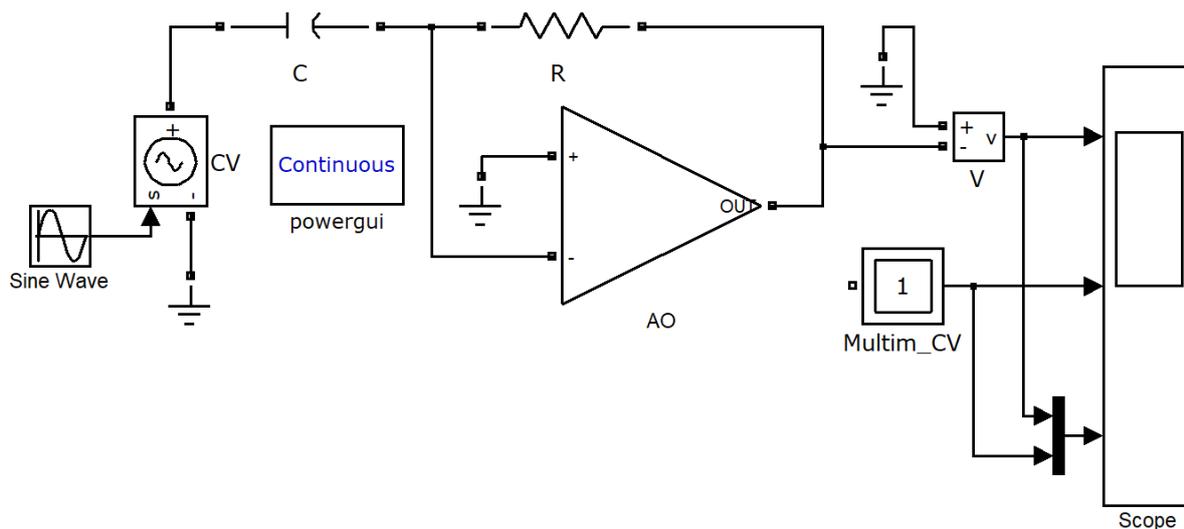


Рис.11.14. Модель дифференцирования на базе ОУ.

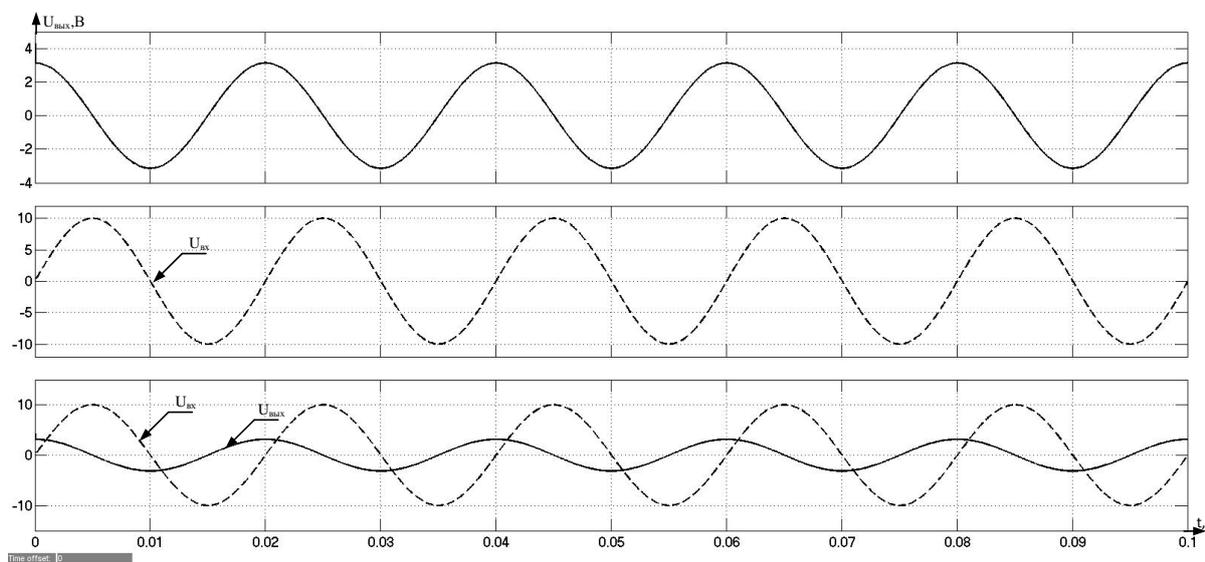


Рис.11.15. Дифференцирование синусоидального напряжения.

Рассмотрим схемы выделения модуля сигнала с помощью схем на базе ОУ.

$$U_{\text{ВЫХ}} = |U_{\text{ВХ}}|$$

Это может быть схемы одно - или двухполупериодного выпрямления напряжения.

Модель схемы однополупериодного выпрямления напряжения представлена на рис.11.16.

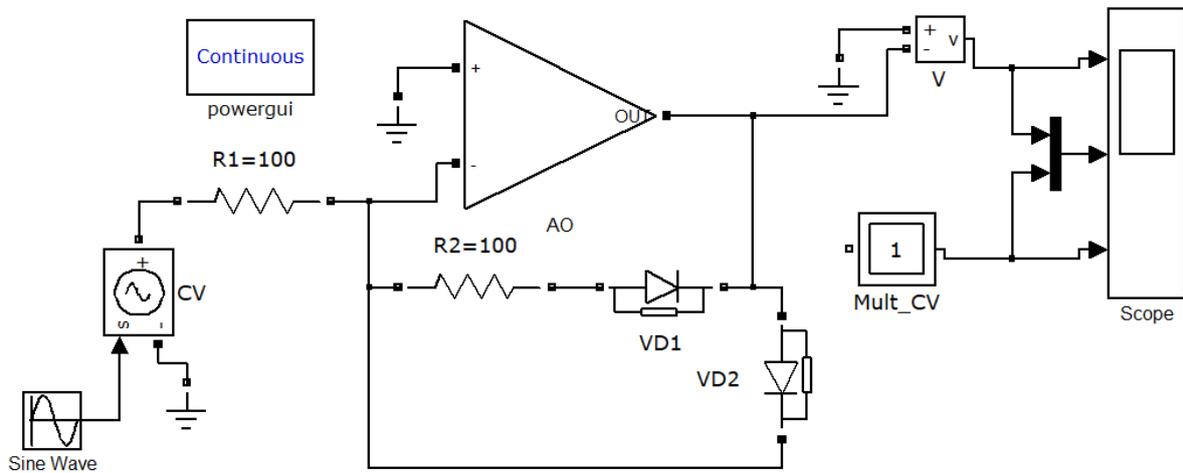


Рис.11.16. Схемы однополупериодного выпрямления.

Расчитанные напряжения на входе и выходе схемы однополупериодного выпрямления напряжения изображены на рис.11.17

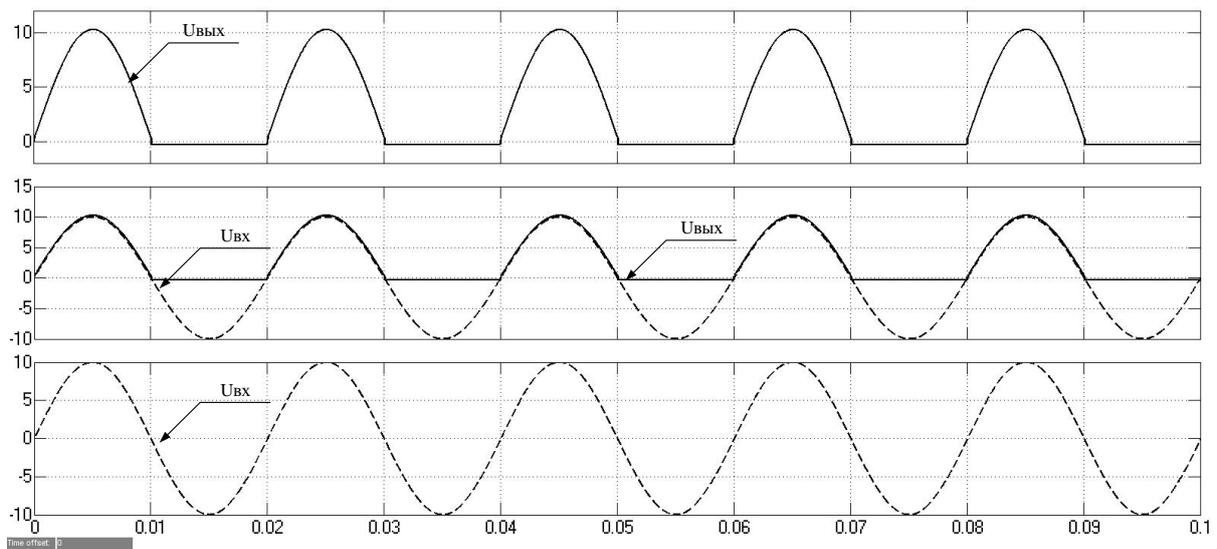


Рис.11.17. Напряжения на входе и выходе схемы однополупериодного выпрямления

Модель схемы двухполупериодного выпрямления представлена на рис.11.18.

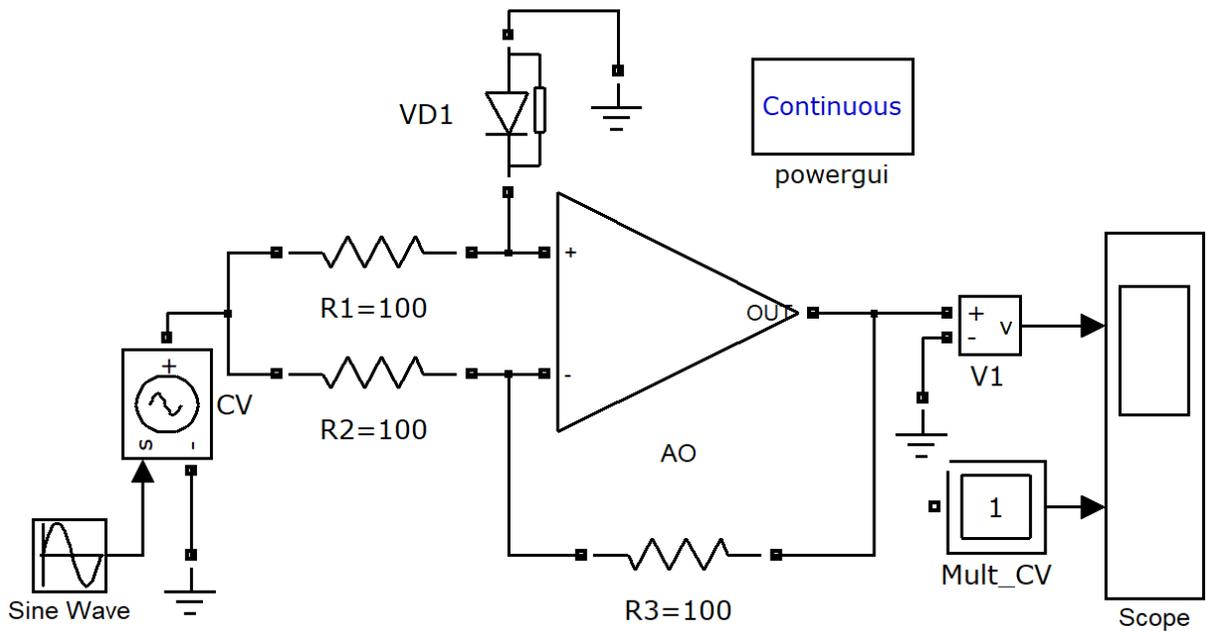


Рис.11.18. Схемы двухполупериодного выпрямления.

Расчитанные напряжения на входе и выходе схемы двухполупериодного выпрямления изображены на рис.11.19

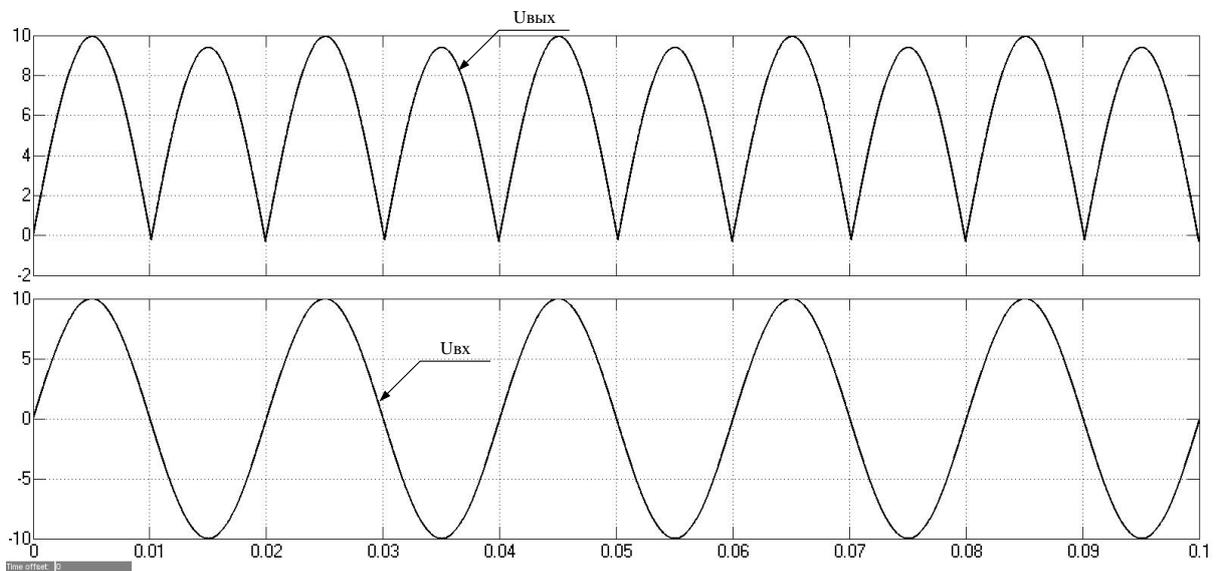


Рис.11.19. Напряжения на входе и выходе схемы двухполупериодного выпрямления.

Рассмотрим двухполупериодный выпрямитель, в котором используется мост на диодах $VD_1 - VD_4$, одна диагональ которого включена в цепь ООС ОУ, а к другой диагонали подключена нагрузка.

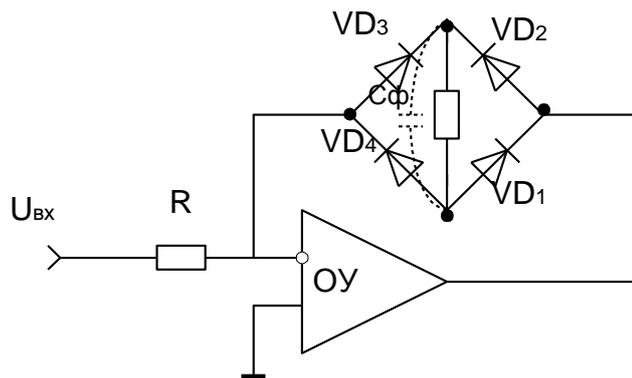


Рис.11.20. Двухполупериодный выпрямитель.

Модель схемы двухполупериодного выпрямления представлена на рис.11.21.

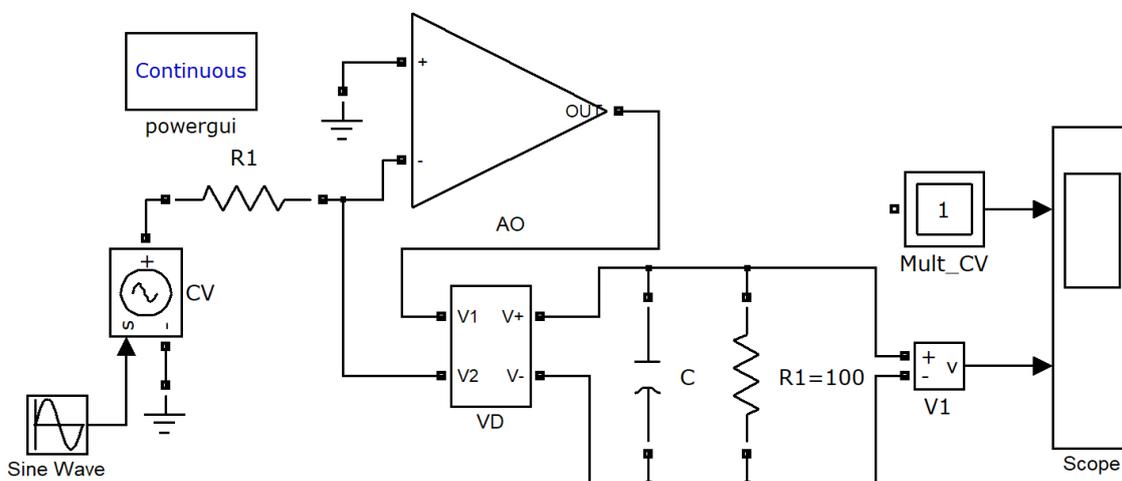


Рис.11.21. Модель схемы двухполупериодного выпрямления.

Модель выпремительного моста на диодах VD1 – VD4, показана на рис. 11.22

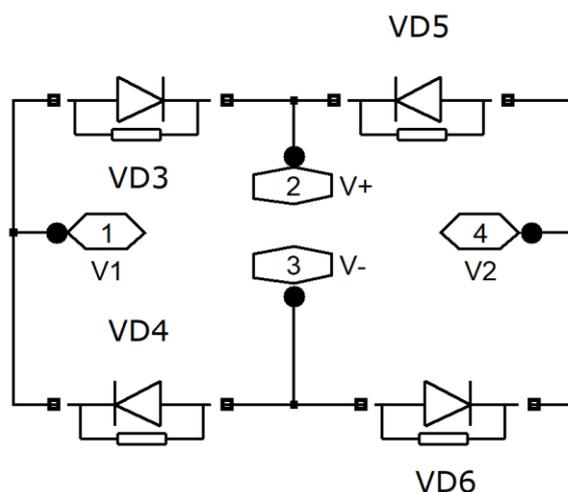


Рис. 11.22. Модель выпремительного моста на диодах VD1 – VD4.

Рассчитанные напряжения на входе и выходе схемы двухполупериодного выпрямления изображены на рис.11.23а и рис.11.23в.

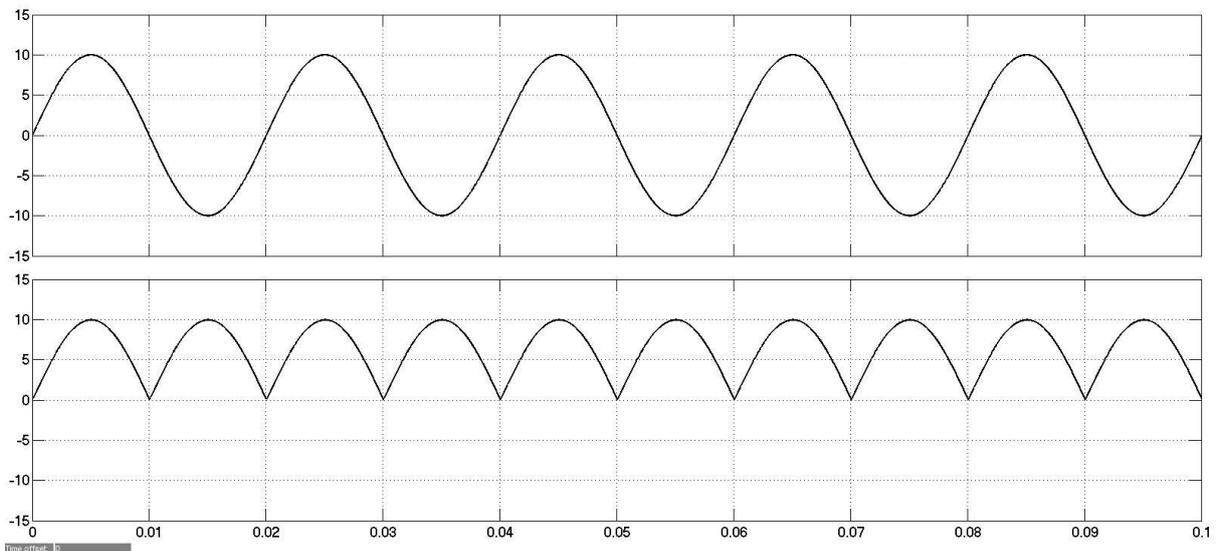


Рис.11.23а. Напряжения на входе и выходе схемы двухполупериодного выпрямления без конденсатора.

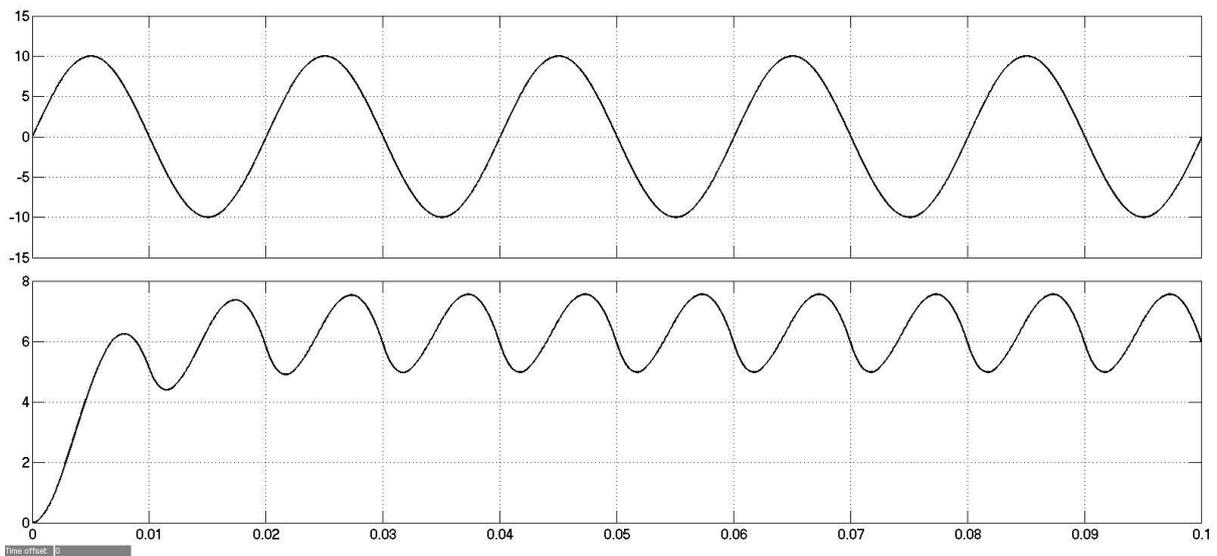


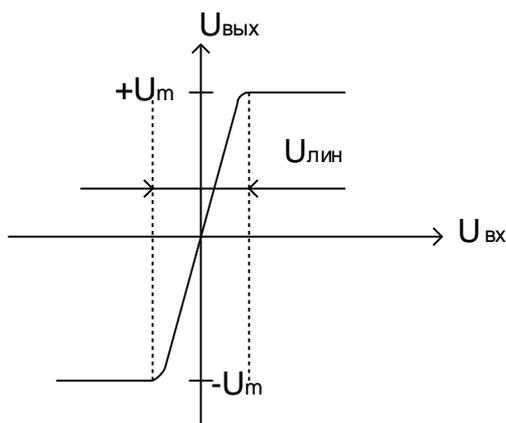
Рис.11.23в. Напряжения на входе и выходе схемы двухполупериодного выпрямления с конденсатором.

Рассмотрим создания модели компаратора. Компаратор – это устройство, предназначенное для сравнения каких-либо величин (от лат. compare – "сравнивать"). Основным элементом модели является операционный усилитель с большим коэффициентом усиления. Он

имеет входы: прямой и инверсный. При необходимости опорный сигнал может быть подключен к любому из них.

Компаратор используются в схемах измерения электрических сигналов и в аналогово-цифровых преобразователях.

В качестве компаратора может быть использован ОУ без ОС, т. к. у него большой коэффициент усиления, то его переходная характеристика:



$$U_m = 15 \text{ В}$$

$$K_u = 10^5$$

$$U_{\text{лин}} = 2 * 15 / 10^5 = 30 * 10^{-5} = 30 * 10^{-5} \cong 0,3 \text{ мВ}$$

У ОУ область линейной характеристики составляет по входу доли и единицы, мВ, если $\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}+} - U_{\text{вх}-} > U_{\text{лин}}$, то на выходе ОУ либо $+U_m$, либо $-U_m$.

Таким образом, ОУ без ОС позволяет сравнивать входные сигналы с точностью до единиц мВ, т. е. может быть использован как пороговое устройство - компаратор, с характеристикой, близкой к идеальному.

Если входной сигнал содержит шум, то во время действия помехи возникает многократное переключение компаратора. При этом для последовательных цифровых устройств это можно привести к сбою или неправильной работе. Для устранения этого эффекта используют компаратор с гистерезисом, который имеет разные пороги срабатывания.

Схема модели компаратора представлена на рис. 11.24.

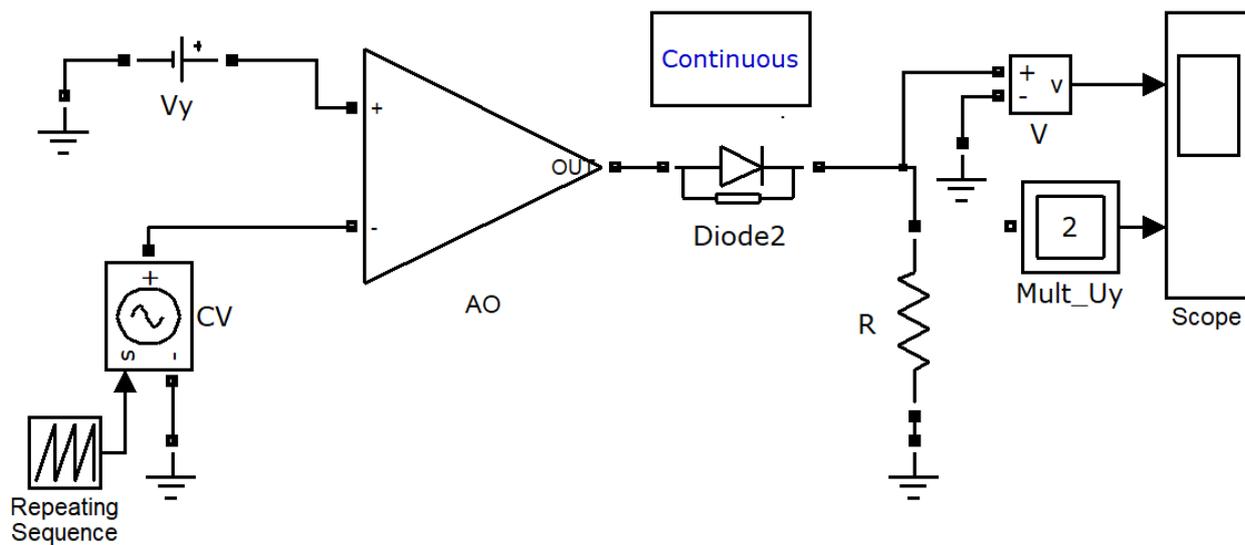


Рис. 11.24. Схема модели компаратора.

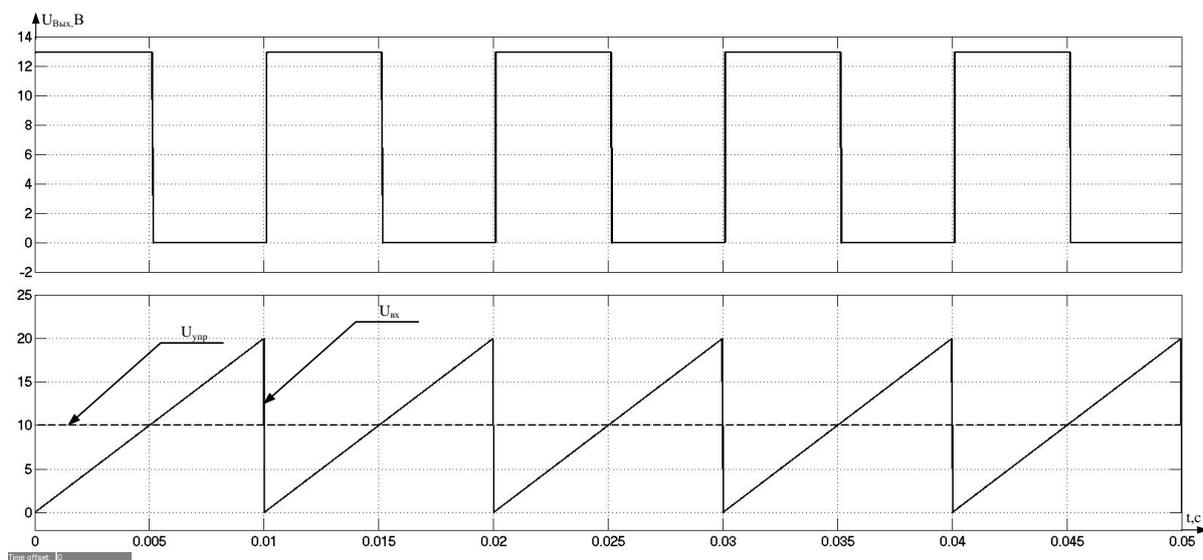


Рис. 11.25. Напряжения на входе и выходе схемы компаратора.

Модель компаратора на базе ОУ с подачей опорного сигнала на инверсный вход представлена на рисунке 11.26

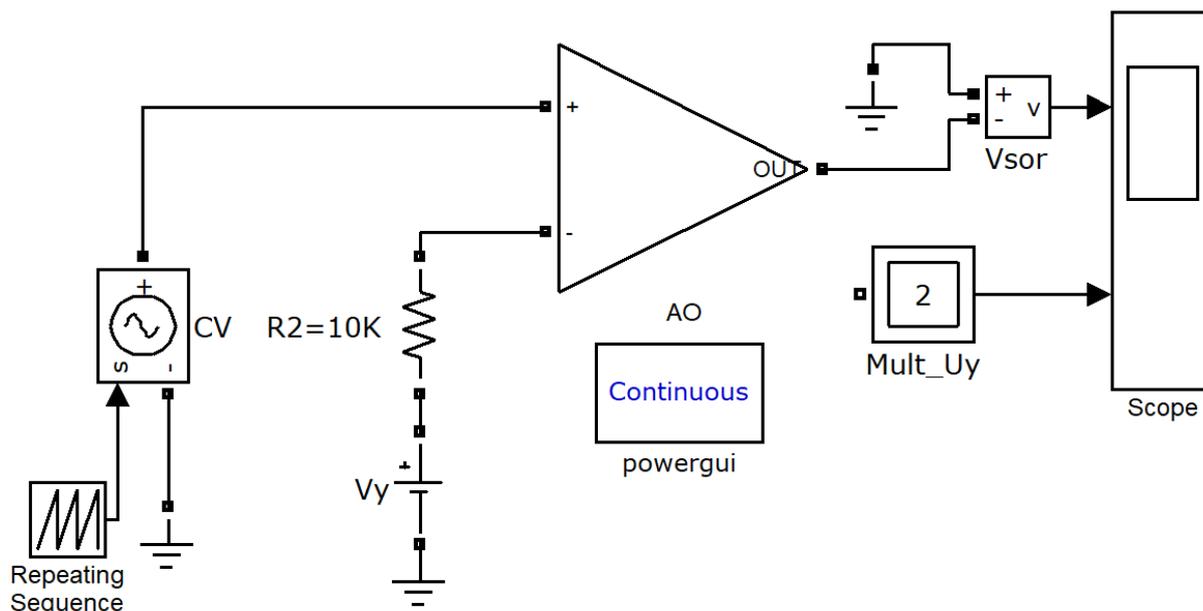


Рис. 11.26. Модель компаратора с подачей опорного сигнала на инверсный вход.

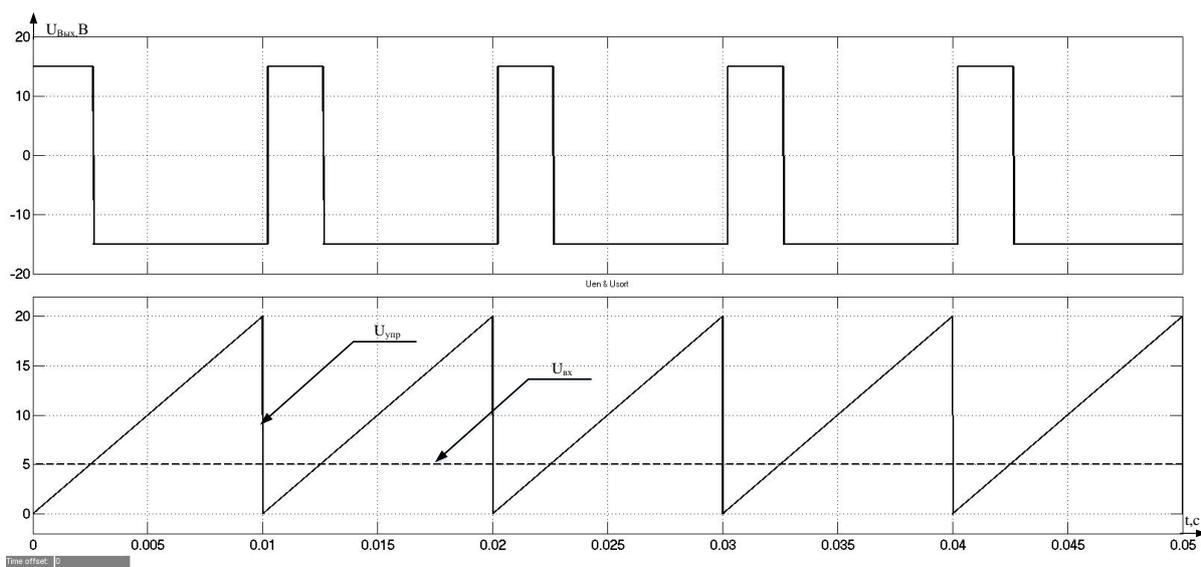


Рис. 11.27. Напряжения на входе и выходе схемы компаратора.

Рассмотрим модель мультивибратора. Мультивибратор — это генератор электрических колебаний. В переводе с латыни значит: «мульти» — много, «вибро» — колебание. В электротехнике встречается много схем мультивибраторов, различающихся исполнением, применением различных элементов и режимов работы. Главное назначение устройства — генерировать импульсы для различных целей.

11.28
 Схема простейшего мультивибратора на ОУ приведена на рис.

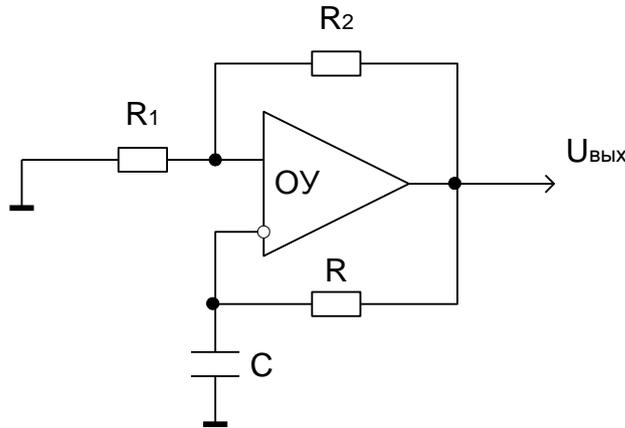


Рис. 11.28. Схема мультивибратора на ОУ.

Принцип работы мультивибратора иллюстрирует рис 11.29. С помощью делителя $R_1 - R_2$ обеспечивается ПОС, которая переводит ОУ в триггерный режим (переключательный).

$R_2 - R_1$ задают порог переключения на НИ входе.

Если $U_{\text{ВЫХ}} = +U_{\text{max}}$, то $U_{\text{порога}+} = [+U_{\text{max}}/(R_1 + R_2)] * R_1$.

Если $U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{max}}$, то $U_{\text{порога}-} = [-U_{\text{max}}/(R_1 + R_2)] * R_1$.

Пока входной сигнал на инвертирующем входе отличается от $\pm U_{\text{порога}}$, ОУ находится за счет ПОС в состоянии насыщения, либо $+$, либо $-U_{\text{max}}$. Когда входное напряжение сравнивается с $U_{\text{порога}}$ выходное напряжение меняет знак в зависимости от того, какой из порогов достигается, $+$ или $-$.

Цепочка $R - C$ обеспечивает заряд - пере заряд емкости, подключенной к инверсному входу за счет изменения $U_{\text{ВЫХ}}$. Таким образом, этой цепочкой обеспечивается генерация и временные соотношения в схеме.

Заряд - разряд происходит с постоянной времени $\tau_{\text{зар/раз}} = RC$

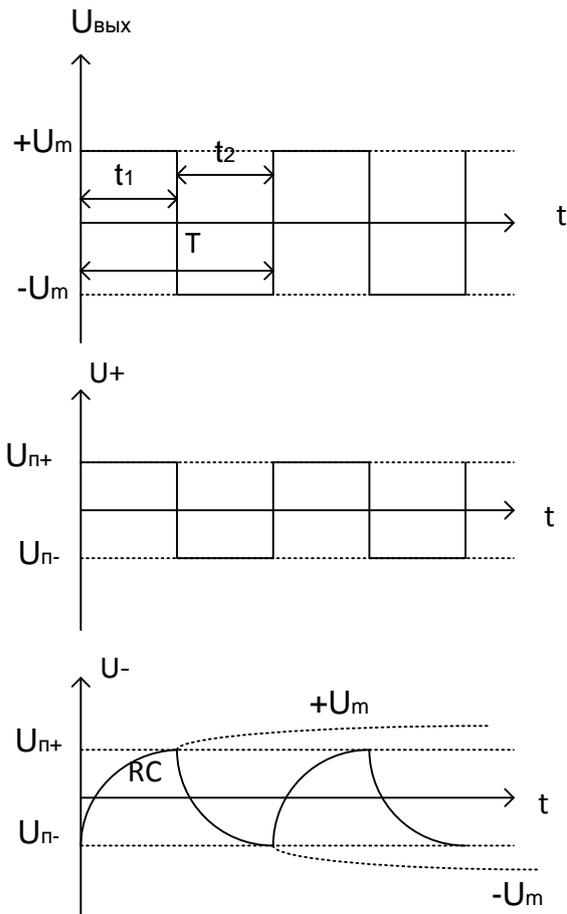


Рис. 11.29. Принцип работы мультивибратора

$$t_1 = t_2$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = +U_{\text{максВЫХ}}, \text{ то } U_{\text{П}+} = \frac{+U_{\text{максВЫХ}} * R_1}{R_1 + R_2} - \text{пороговое напряжение}$$

$$U_{\text{П}-} = \frac{-U_{\text{максВЫХ}} * R_1}{R_1 + R_2}, U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{максВЫХ}}$$

Выходное напряжение:

$$\text{Напряжение на НИ входе: } U_{\text{П}+} = U_{\text{ВХ}+}$$

$$\text{Напряжение на И входе: } U_{\text{П}-} = U_{\text{ВХ}-} = U_{\text{C}}$$

Делитель R_1 и R_2 задает пороги переключения ОУ как триггера.

В установившемся режиме работы пусть:

$$U_{\text{ВЫХ}} = +U_{\text{ВЫХ макс}},$$

при этом емкость C через R с постоянной времени τ заряжается до $+U_{\text{ВЫХ макс}}$. Пока $U_{\text{ВХ}-} < U_{\text{ВХ}+} \rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = +U_{\text{ВЫХ макс}} = \text{const}$. В момент времени $t = t_1$, когда $U_{\text{ВХ}-} = U_{\text{C}} = U_{\text{ВХ}+}$ напряжение на входах сравнивается, ОУ входит в линейный режим и как только U_{C} станет чуть боль-

ше $U_{\text{вх}+}$, ОУ переключается в состояние $U_{\text{вых}} = -U_{\text{вых max}}$, за счет ПОС через R_1 и R_2 обеспечивается быстрое переключение ОУ со скоростью, определяемой быстродействием самого ОУ. После переключения C начинает перезаряжаться от $U_{\text{вых}} = -U_{\text{вых max}}$ и пока $U_c \neq U_n -$, $U_{\text{вых}} = -U_{\text{вых max}} = \text{const}$. В момент времени t_2 $U_c = U_n -$, происходит обратное переключение и процесс повторяется и на выходе формируется симметричный прямоугольный сигнал (меандр), у которого длительность импульса $t_1 = t_2 = T/2$. Таким образом, частота f или период импульсов определяется временем, в течение которого напряжение на емкости U_c находится в пределах от $U_n +$ до $U_n -$.

$$T = 2RC \ln(1 + 2R_1/R_2)$$

Меняя R или C можно изменять частоту генерации.

Модель мультивибратора на ОУ изображена на рис.11.30.

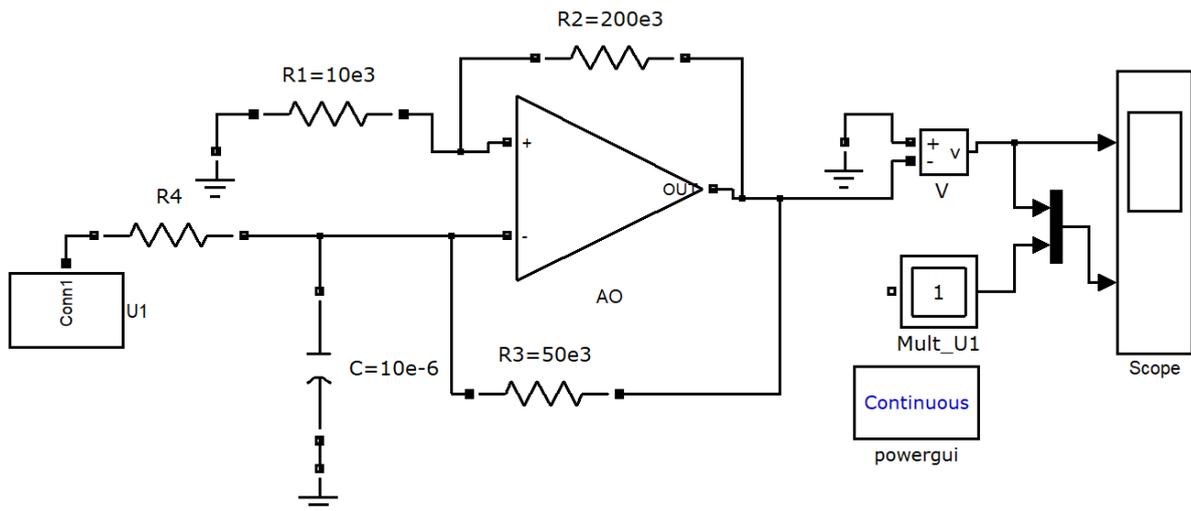


Рис. 11.30. Модель мультивибратора.

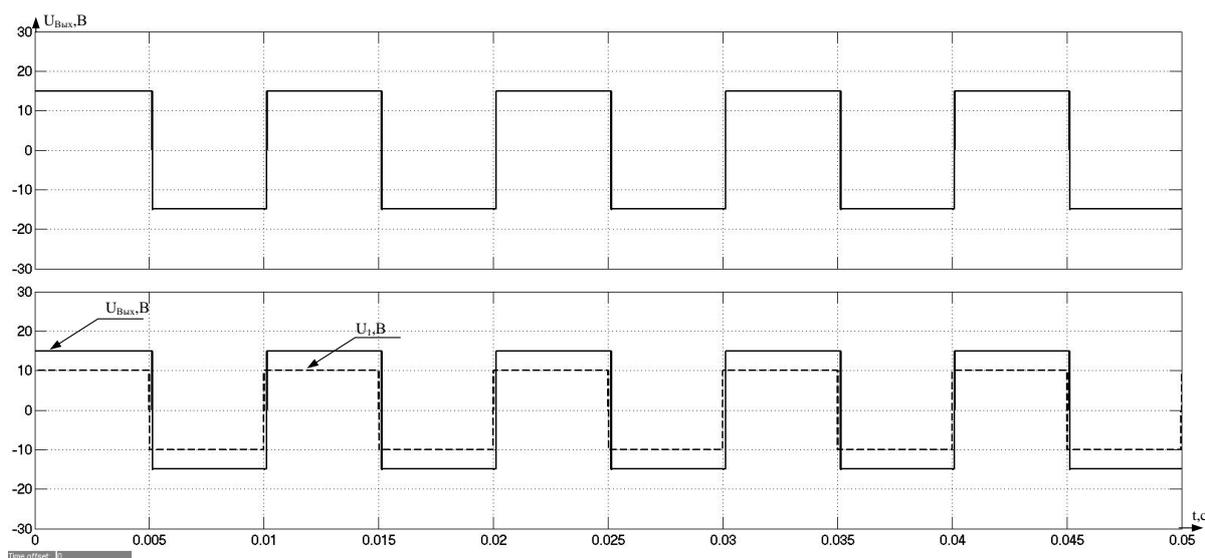


Рис. 11.31. Напряжения на входе и выходе схемы мультивибратора.

Разработаем и исследуем модель триггера Шмидта. Слово «trigger», в переводе на русский, значит, спусковой крючок. Функциональность устройства заключается в быстром переходе из одного устойчивого состояния в другое под внешним воздействием.

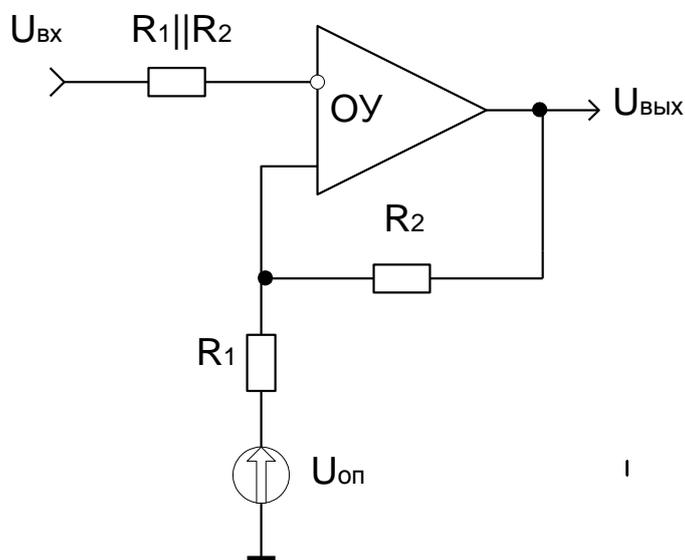


Рис. 11.32. Схема триггера Шмидта на базе ОУ.

$U_{оп}$ задает опорный пороговый уровень, с помощью делителя R_1 , R_2 обеспечивается ПОС и гистерезисная переключательная характеристика.

Имеются 2 порога переключения:

$$U_{\text{пор}}^+ \text{ (когда } U_{\text{ВЫХ}} = +U_m)$$

$$U_{\text{пор}}^+ = U_{\text{ВХ}^+} = (+U_m * R_1) / (R_1 + R_2)$$

$$\text{Когда } U_{\text{ВЫХ}} = -U_m$$

$$U_{\text{пор}}^- = U_{\text{ВХ}^-} = (U_{\text{оп}} * R_2) / (R_1 + R_2) - (U_m * R_1) / (R_1 + R_2)$$

$$U_{\text{п}}^+ - U_{\text{п}}^- = \Delta U_{\text{ГИСТ}} = (2U_m * R_2) / (R_1 + R_2)$$

$$U_{\text{оп}} = 0$$

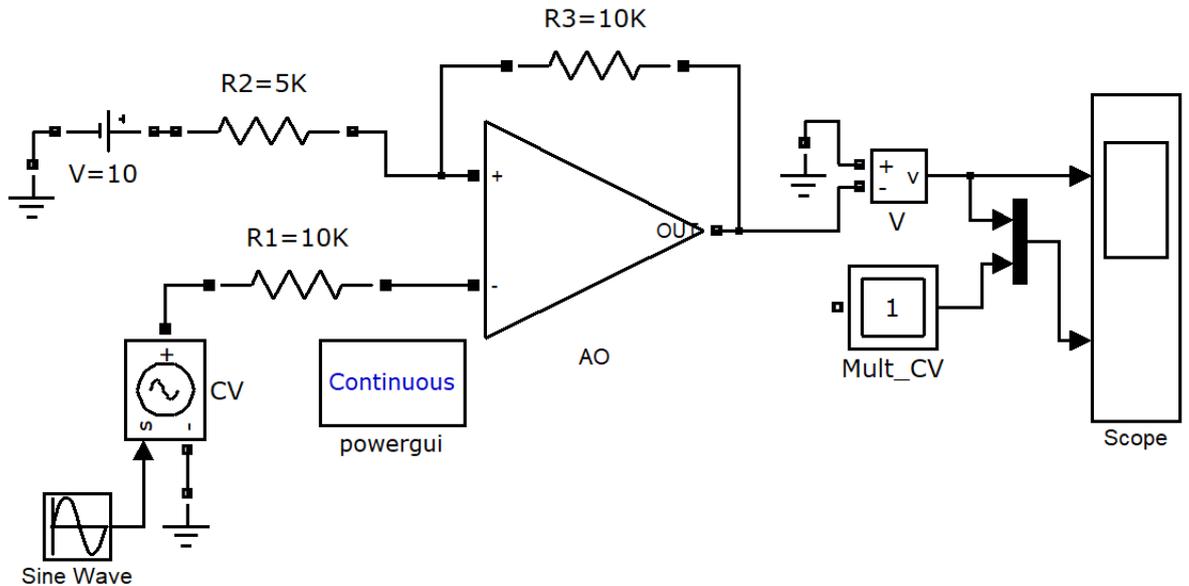


Рис. 11.33. Модель триггера Шмидта на базе ОУ.

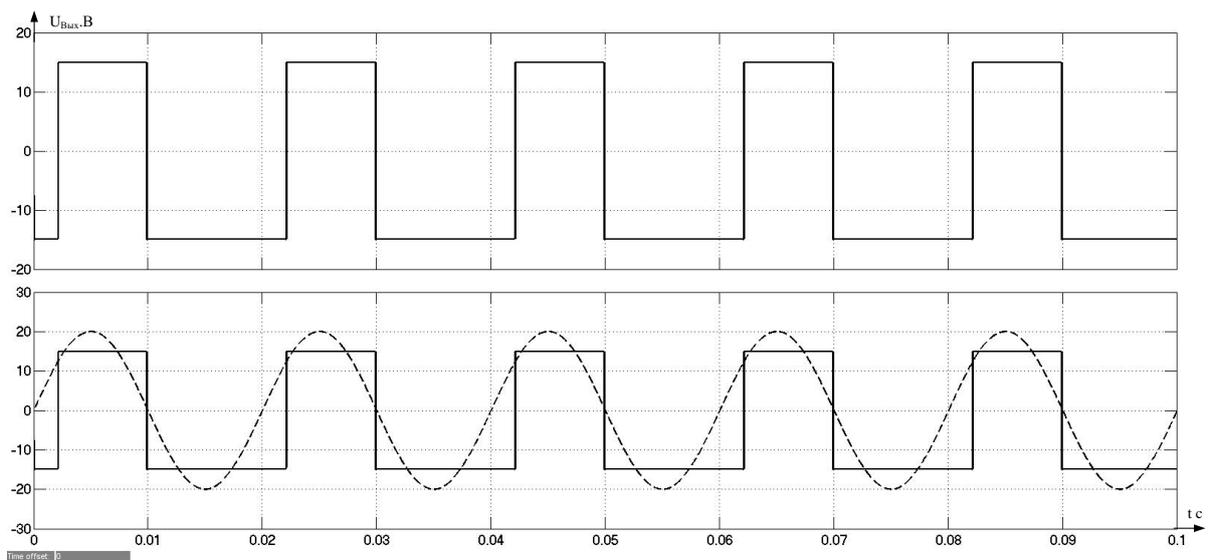


Рис. 11.34. Напряжения на входе и выходе схемы триггера Шмидта на базе ОУ.

Рассмотрим моделирование стабилизаторов. Для работы электронных схем необходимы источники постоянного напряжения. Однако напряжение на выходе простейшего источника, выполненного по схеме «трансформатор – выпрямитель – сглаживающий фильтр» может изменяться из-за колебаний сопротивления нагрузки, напряжения первичного источника и других факторов. Если отклонения напряжения превышают допустимую величину, в схемы источников вводят стабилизаторы – устройства, обеспечивающие малые изменения выходного напряжения.

Существуют два типа стабилизаторов: параметрические и компенсационные. В параметрических стабилизаторах напряжения, в качестве регулирующих используют нелинейные элементы, имеющие участок ВАХ, на котором напряжение остается неизменным при изменении тока. Такой участок имеет обратная ветвь ВАХ стабилитрона. Простейшая схема параметрического стабилизатора изображена на рис.11.35.

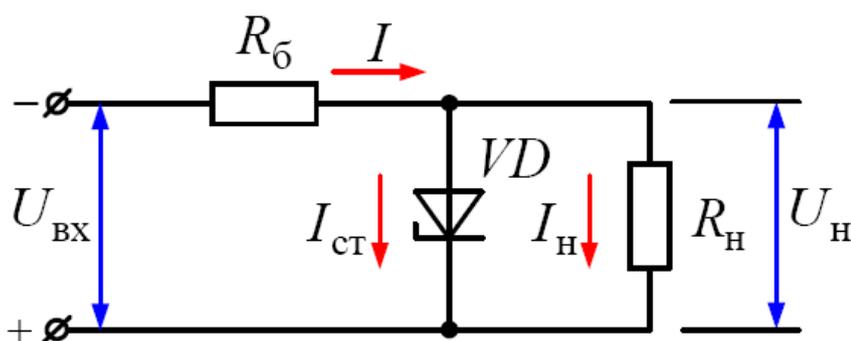


Рис. 11.35. Схема параметрического стабилизатора.

При увеличении входного напряжения $U_{вх}$ от нуля пропорционально возрастает напряжение на нагрузке $U_{вых}$. Когда входное напряжение достигнет напряжения пробоя стабилитрона, он открывается и в его цепи появляется ток $I_{ст}$. Дальнейшее увеличение $U_{вх}$ приведёт лишь к увеличению тока $I_{ст}$, а напряжение на нём и напряжение на нагрузке $U_{вых}$ будут оставаться почти неизменными. Разница между входным напряжением и выходным будет падать на балластном сопротивлении $R_б$. Максимальное значение входного напряжения ограничено величиной $U_{вх\max}$ (связано с максимальным значением тока $I_{ст\max}$ стабилитрона и ограничено его допустимым нагревом).

Минимальное значение входного напряжения, ограничено напряжением пробоя стабилитрона $U_{проб}$.

За номинальное значение входного напряжения $U_{вх}$ и принимают середину участка между $U_{вх\ max}$ и $U_{вх\ min}$.

Модель параметрического стабилизатора представлена на рисунке 11.36.

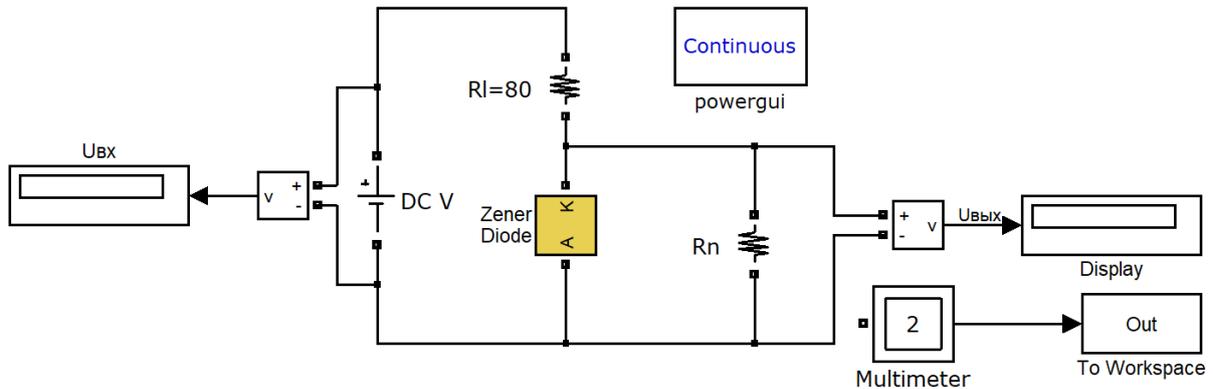


Рис. 11.36. Модель параметрического стабилизатора.

Код программы для расчета внешней характеристики стабилизатора представлен на рис 11.37, результаты расчета на рис.11.38.

```
clear, clc
for m=0:1:3;
    Uent=15+2.5*m;% величина входного напряжения;
for k=0:1:10;
    Rn=40*(k+1);% величина сопротивления нагрузки
    sim('stabslikh')
    A(k+1,1)=Out(1);
    A(k+1,2)=Out(2);
end
plot(A(1:k,1),A(1:k,2),'k')
    hold on;% — обеспечивает продолжение вывода графиков в текущее окно,
        %что позволяет добавлять последующие графики к уже существующим;
    grid on;%добавляет сетку к текущему графику;
end
```

Рис 11.37. Код программы для расчета внешней характеристики стабилизатора.

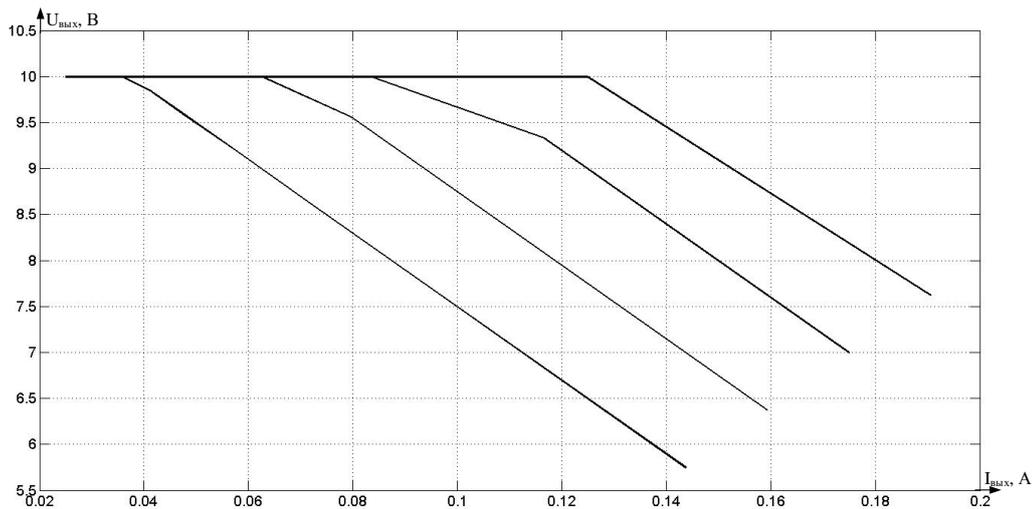


Рис.11.38. Результаты расчета внешних характеристик стабилизатора.

Задание

1. Набрать модели исследуемых устройств.
2. Провести исследование характеристик исследуемых устройств.

Содержание отчета. Отчет должен содержать:

1. Заданные схемы и модели электронных устройств.
2. Коды программ.
3. Рассчитанные характеристики, выполненные в MATLAB.
4. Выводы.

Контрольные вопросы.

1. Какими параметрами оцениваются частотные свойства усилителей?
2. Что такое дрейф усилителя, чем он вызывается?
3. Какие напряжения являются синфазными?
4. Каким входом ДУ присваивают названия «инвертирующий» и «неинвертирующий»?
5. Для чего в ДУ применяется двухполярный источник питания?
6. Что называется ОУ?
7. Дайте определение идеального ОУ.
8. Приведите три схемы включения ОУ

Практическое занятие 12

Моделирование электронных устройств на базе комбинационных логических схем

Цель работы: Исследование возможности реализации электронных устройств на базе логических функций.

Рассмотрим минимизацию логических функций. Основная задача минимизации состоит в получении такой формы, которой соответствует логическая функция с минимальным числом элементов. Существуют три основных способа минимизации: эвристический, использующий теоремы алгебры логики, с помощью карт Карно, с помощью ЭВМ. Недостаток первого способа - низкая скорость решения, зависящая во многом от квалификации и опыта специалиста, проводящего минимизацию. Сложные структуры с большим числом переменных можно минимизировать с помощью ЭВМ, для чего разработан ряд алгоритмов.

1. С помощью тождеств.

Этот способ упрощения основывается на знании тождеств и интуиции и представляет большие трудности, особенно при большом числе переменных. При этом бывает трудно оценить, является полученное выражение простейшим или возможны дальнейшие упрощения.

Рассмотрим пример. Дана таблица истинности (таблица 12.1).

Таблица 12.1

N	X ₁	X ₂	X ₃	Y	
0	0	0	0	1	→ $\overline{X_1}\overline{X_2}\overline{X_3}$
1	0	0	1	0	
2	0	1	0	1	→ $\overline{X_1}X_2\overline{X_3}$
3	0	1	1	0	
4	1	0	0	0	
5	1	0	1	1	→ $X_1\overline{X_2}X_3$
6	1	1	0	0	
7	1	1	1	1	→ $X_1X_2X_3$

Логическую функцию для данной таблицы истинности можно записать:

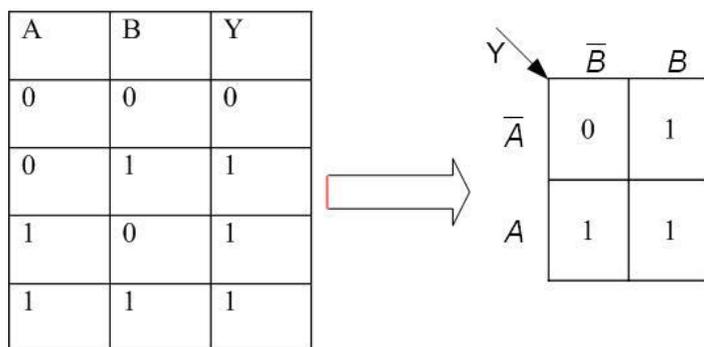
$$Y = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} + \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} + x_1 \overline{x_2} x_3 + x_1 x_2 x_3$$

Упрощая, получим:

$$Y = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} + \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} + x_1 \overline{x_2} x_3 + x_1 x_2 x_3 = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} + \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} + x_1 x_3 (\overline{x_2} + x_2) = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} + \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} + x_1 x_3 = \overline{x_1} \overline{x_3} (\overline{x_2} + x_2) + x_1 x_3 = \overline{x_1} \overline{x_3} + x_1 x_3.$$

2. Карта КАРНО.

Карта (диаграмма) Карно - это графический инструмент (метод), который позволяет упростить методически логическое уравнение или позволяет упростить процесс перехода от таблицы истинности к соответствующей логической схеме. Метод удобен в использовании, когда число переменных меньше 6. Карта Карно может быть составлена по таблице истинности. Если логическая функция зависит от n переменных, то в карте Карно будет 2^n квадратиков. Разметка карт для 2-х, 3-х переменных показана на рис.12.1.



а)

Для рассмотренного выше примера:

	$\overline{x_1} \overline{x_2}$	$\overline{x_1} x_2$	$x_1 \overline{x_2}$	$x_1 x_2$
$\overline{x_3}$	1	0	1	0
x_3	0	0	1	0

в)

Рис.12.1. Разметка карт для 2-х, 3-х переменных.

При такой разметке, соседние квадраты имеют координаты, отличающиеся только одно переменной. Например, для рис. 12.1,в: пер-

вый квадрат имеет координаты $\bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3$, второй $\bar{X}_1 X_2 X_3$. Переменная X_3 входит в эти выражения в прямой и инверсной форме. Можно сделать и обратное определение: если координаты квадратов отличаются только одной переменной, которая представлена в прямой и инверсной форме, то они называются соседними.

Кроме квадратов, расположенных в горизонтальных строках, соседними будут и квадраты, расположенные в правом и левом крайних столбцах карты Карно, представленной на рис. 12.1в.

В каждом квадрате карты Карно ставится значение логической функции 1 или 0. С этой целью для каждой строки таблицы истинности определяются координаты, как конъюнкция (логическое умножение) переменных с отрицаниями или без них по правилу: отрицание ставится над аргументами, которые на наборе равны 0.

Рассмотрим примеры:

а)

		$\bar{X}_1 \bar{X}_2$	$\bar{X}_1 X_2$	$X_1 \bar{X}_2$	$X_1 X_2$
\bar{X}_3	0	1	1	0	
X_3	0	0	0	0	

$$Y = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3 = X_2 \bar{X}_3 (\bar{X}_1 + X_1) = X_2 \bar{X}_3$$

в)

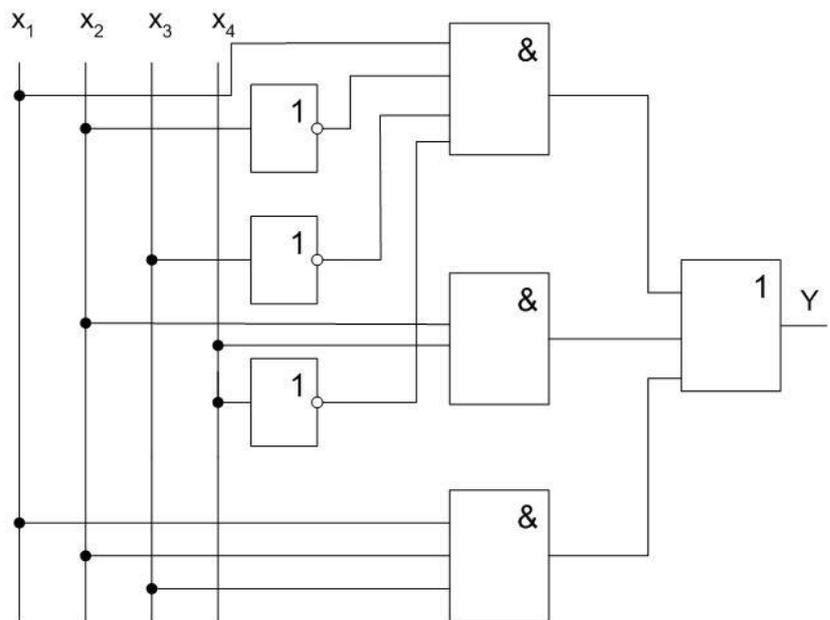
		$\bar{X}_1 \bar{X}_2$	$\bar{X}_1 X_2$	$X_1 \bar{X}_2$	$X_1 X_2$
\bar{X}_3	0	1	1	0	
X_3	0	1	1	0	

$$Y = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 + \bar{X}_1 X_2 X_3 + X_1 X_2 X_3 = X_2 \bar{X}_3 (\bar{X}_1 + X_1) + X_2 X_3 (\bar{X}_1 + X_1) = X_2 \bar{X}_3 + X_2 X_3 = X_2$$

с)

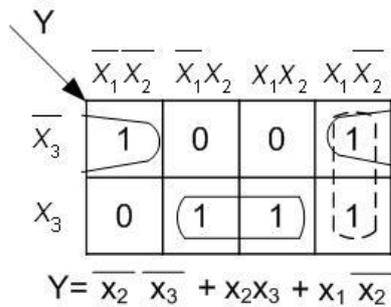
	$\overline{x_1}x_2$	$x_1\overline{x_2}$	x_1x_2	$\overline{x_1}\overline{x_2}$
$\overline{x_3}x_4$	0	0	0	1
$\overline{x_3}\overline{x_4}$	0	1	1	0
x_3x_4	0	1	1	0
$x_3\overline{x_4}$	0	0	1	0

$$Y = \overline{x_1}\overline{x_2}\overline{x_3}\overline{x_4} + x_2x_4 + x_1x_2x_3$$



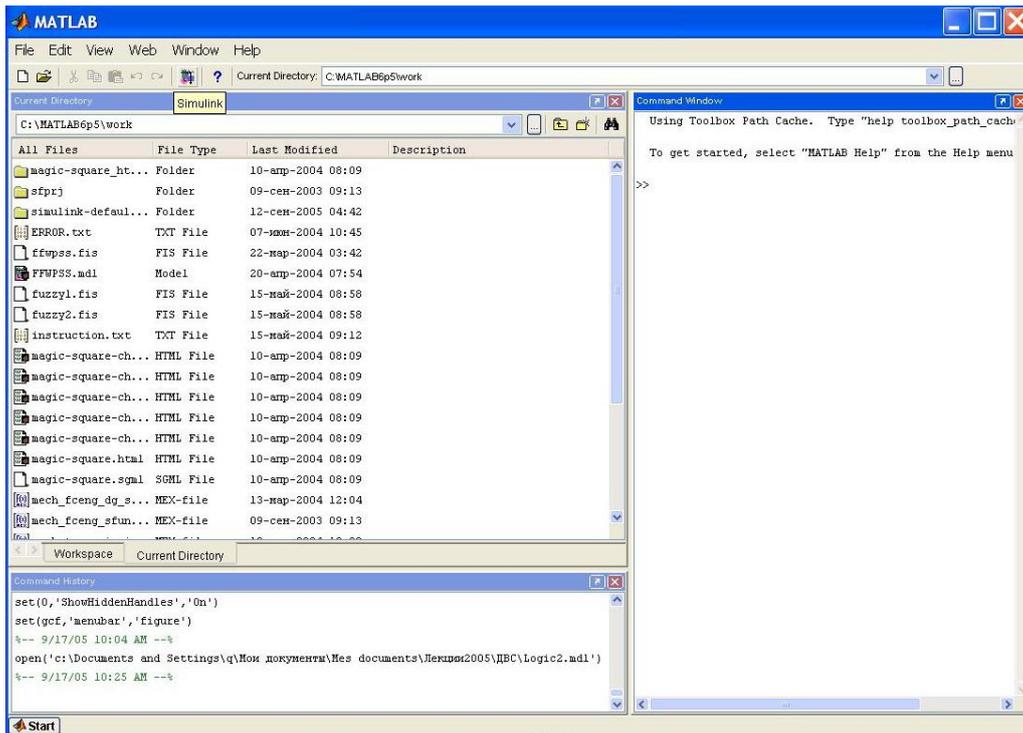
д)

x_1	x_2	x_3	Y
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

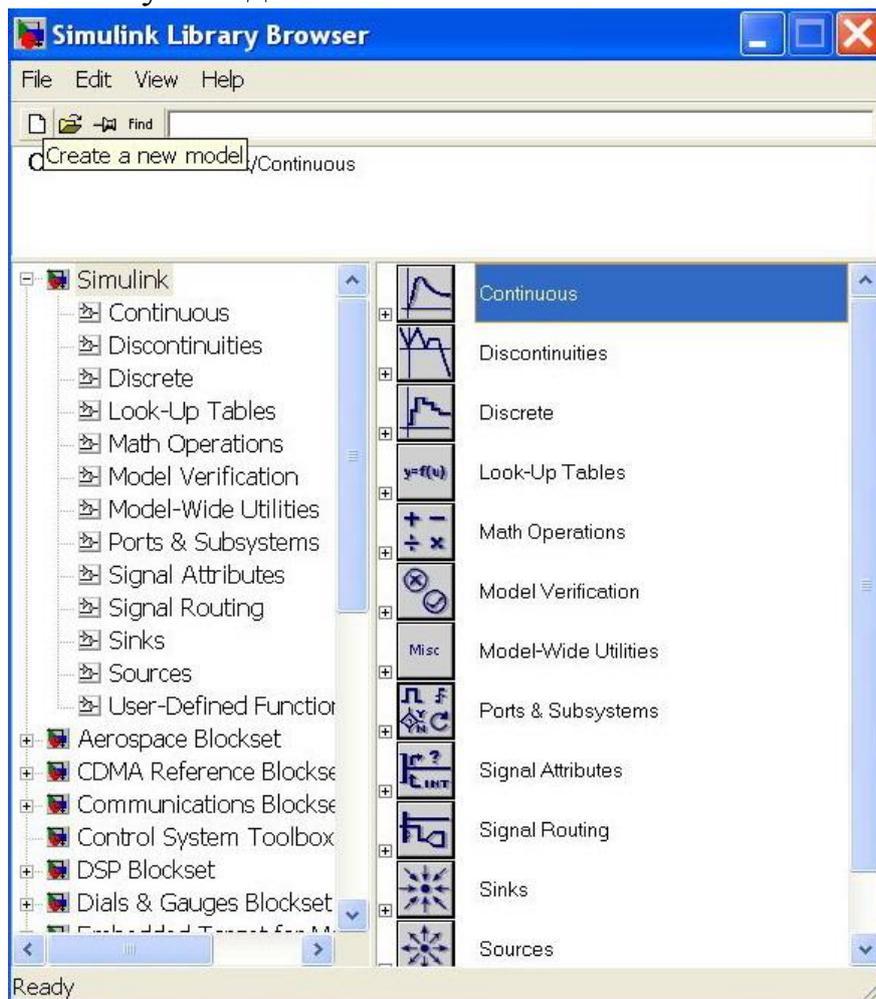


Рассмотрим алгоритм создания схемы в среде MATLAB

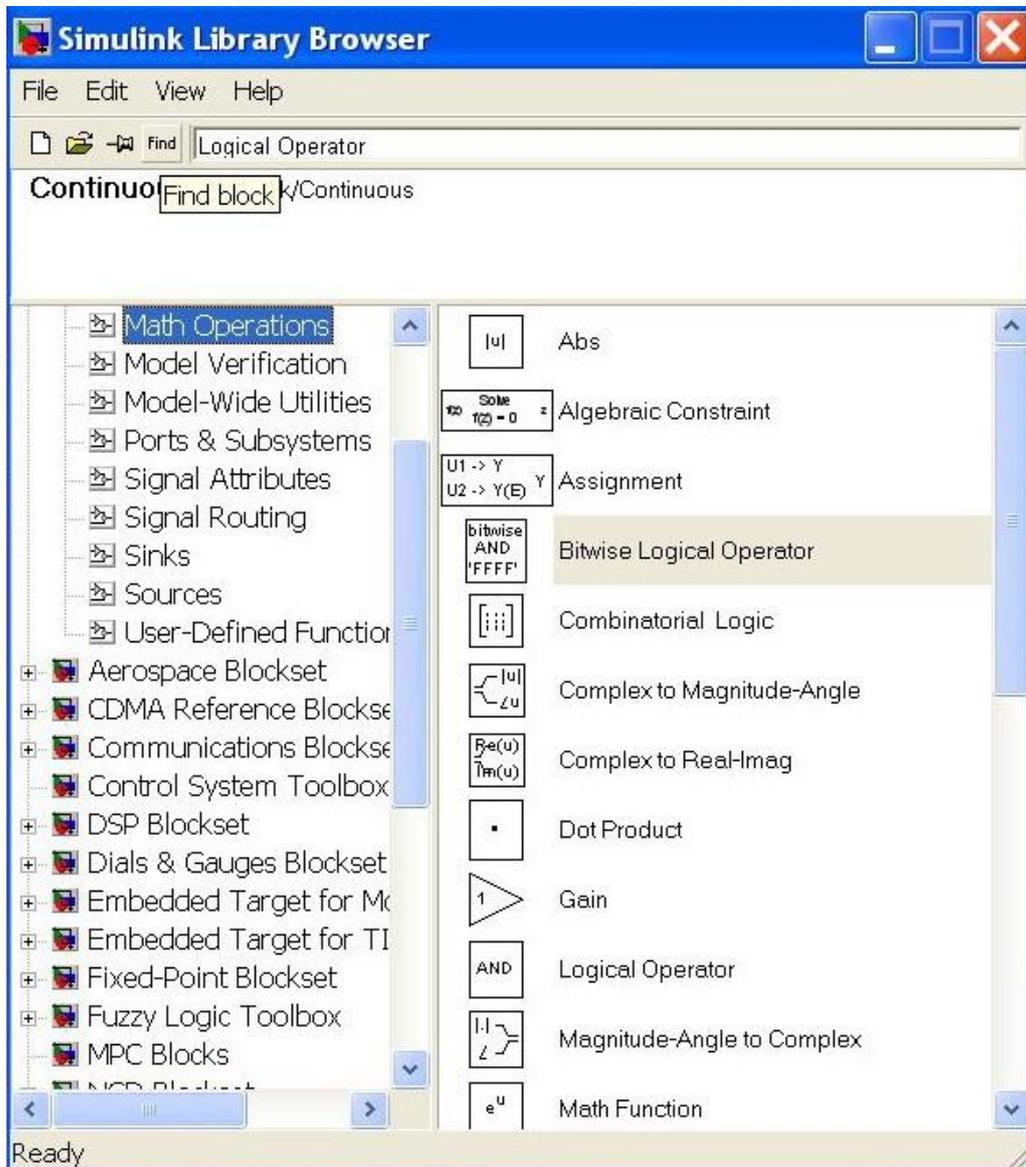
1. Запустить MATLAB.
2. Запустить Simulink.



3. Создать «новую модель»



- Используя названия логических блоков и элементов в примере (рис 12.2) найти их в библиотеке Simulink с помощью «Find» например:



- Необходимо «перетащить» мышкой необходимые блоки на поле «новой модели» и соединить их согласно заданной логической схеме.
- Запустить моделирование, кликнув по иконке «Simulation».
- Запустив в командной строке команды `set(0,'ShowHiddenHandles','On')` и `set(gcf,'menubar','figure')` следует сохранить полученные осциллограммы с расширением .jpg.

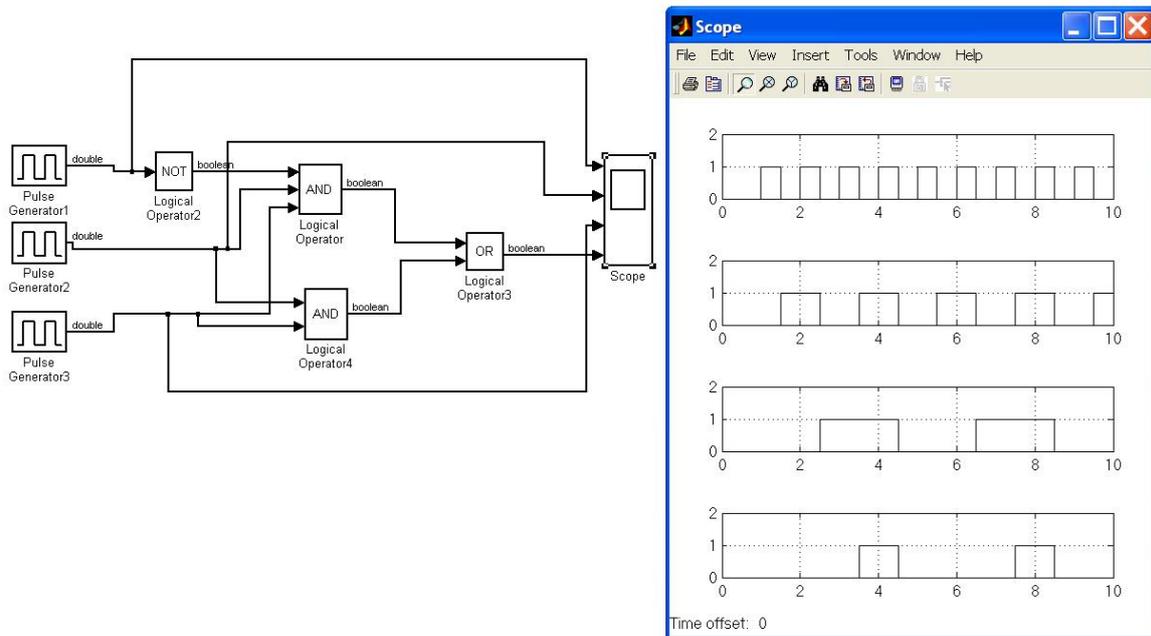


Рис 12.2. Пример модели с использованием в качестве входных величин генераторов импульсов.

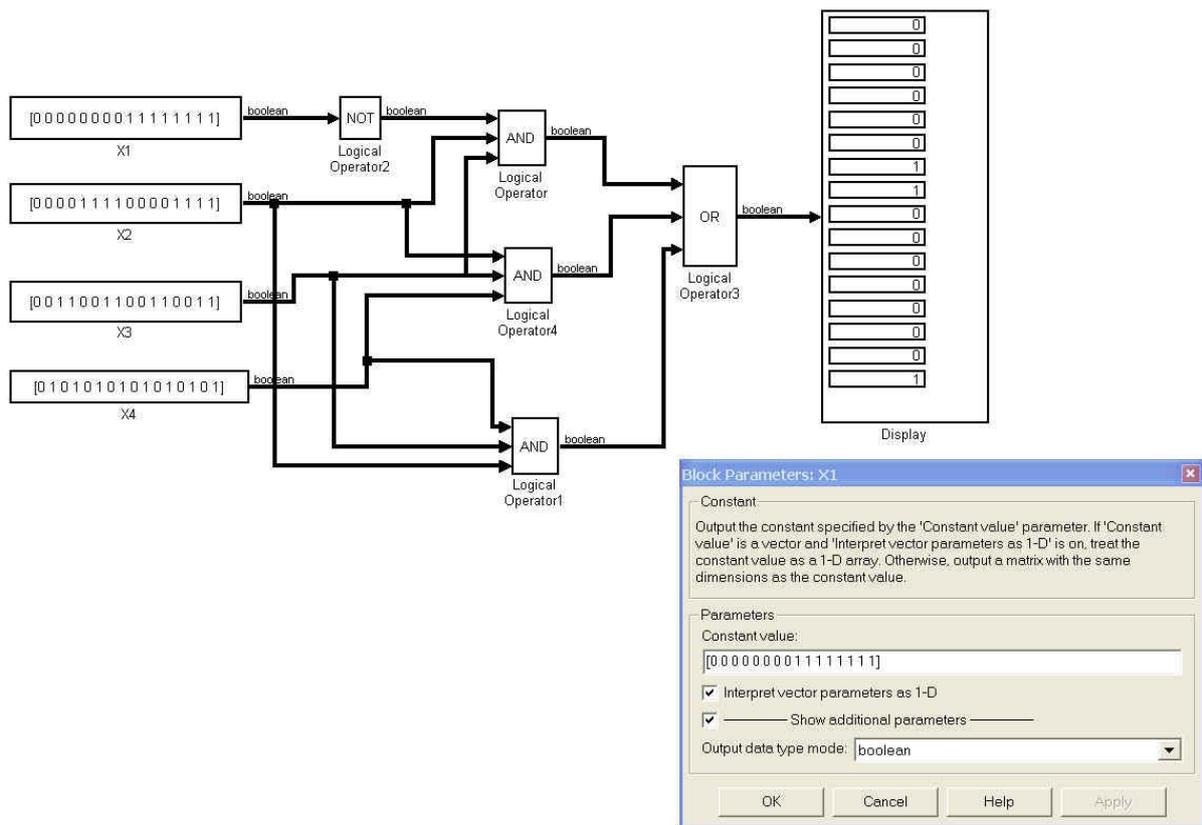


Рис 12.3. Пример модели с использованием в качестве входных величин «constant».

Рассмотрим пример разработки модели светофора.

На рис. 12.4 показано пересечение главной (OE) и второстепенной дорог (NS).

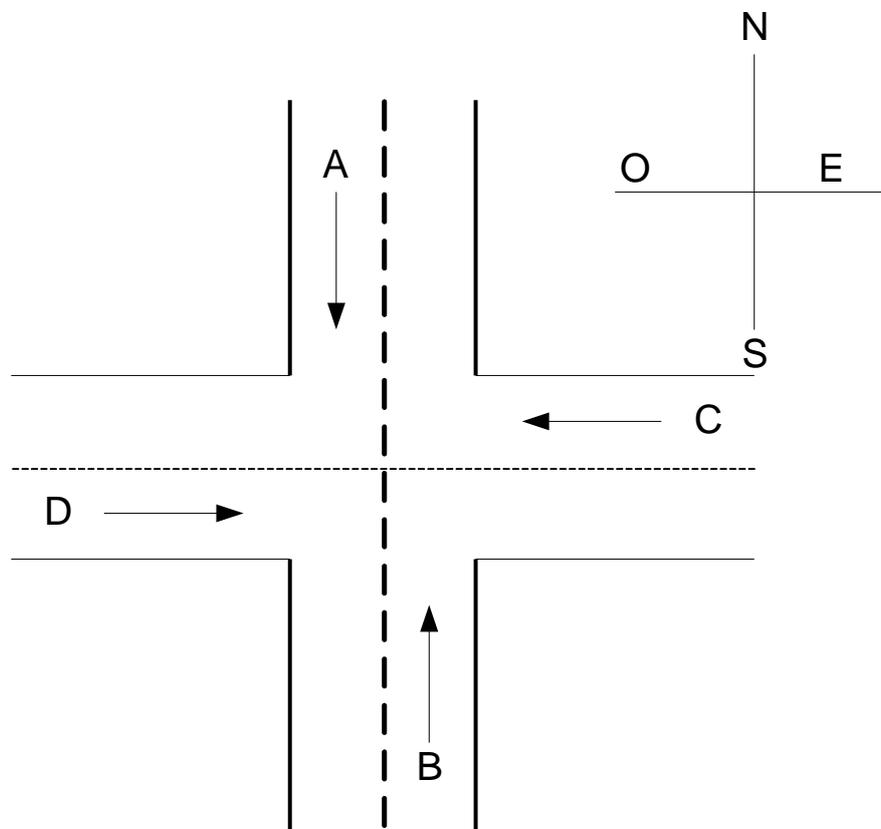


Рис 12.4. Пересечение главной (OE) и второстепенной дорог (NS).

Вдоль направлений A, B, C, D установлены датчики. Входной сигнал этих датчиков соответствует логической единице, когда на дорогах имеются машины, и равен логическому нулю, когда их нет. Светофор, находящийся на этом перекрестке, управляется по следующим правилам:

1. Цвет светофора на направлении O-E зеленый, когда имеются одновременно машины на D и C; на C или D и когда имеется транспортное средство или на A или на B, но не на двух A и B одновременно;
2. На направлении N-S зажигается зеленый цвет светофора, когда имеются машины на A и B; на A и B и вместе с тем или на C, или на D, но не на двух C и D одновременно; когда нет машин на C и D, но они имеются на A или на B;
3. Если нет ни одной машины, ни на одном из направлений, то зеленый свет светофора зажигается на O-E.

Используя сигналы датчиков, установленных на направления А, В, С и D как входные напряжения, разработать логическую функциональную схему, которая будет управлять светофором. Эта схема должна иметь два выхода ОЕ и NS, на которых должен быть сигнал, соответствующий логической единице, при зеленом сигнале светофора.

Исходя из условий задачи, составим таблицу истинности для направления О-Е. Таблица истинности для направления N-S получается простым инвертированием сигнала ОЕ, так как на перекрестке зеленый цвет светофора может быть только на одном из рассматриваемых направлений, в то время как на другом должен быть красный. Таблица истинности для светофора представлена ниже:

Таблица 12.2

NS	A	B	C	D	ОЕ
0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	1	1
1	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1
0	0	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	1	1
1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1

Используя таблицу истинности 12.2., составим диаграммы Карно для логических функций ОЕ и NS.

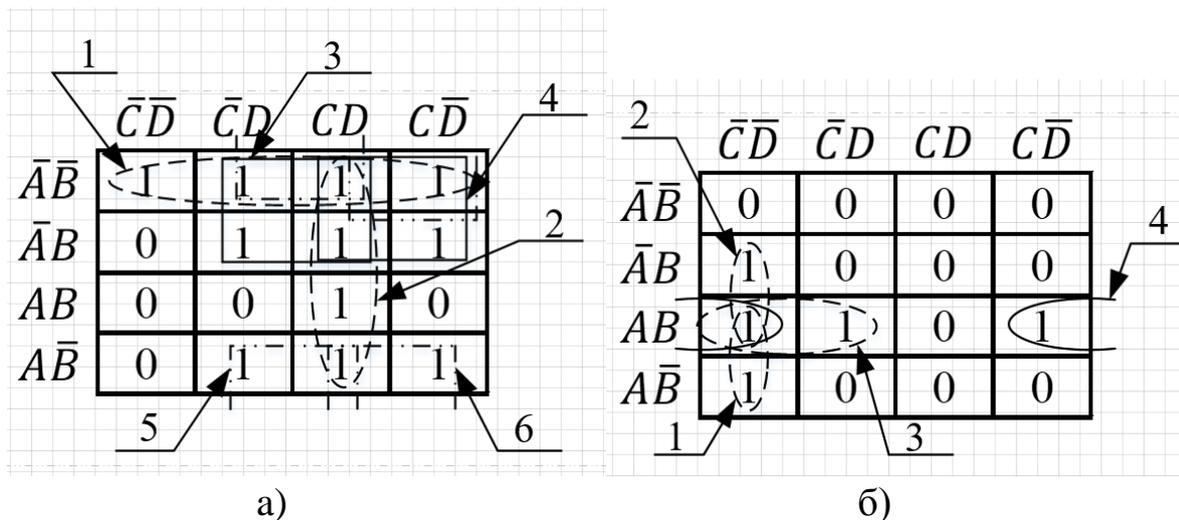


Рис 12.5. Диаграммы Карно для логических функций OE и NS.

Анализ диаграмм Карно позволяет получить логические уравнения:

$$OE = \bar{A}\bar{B} + CD + \bar{A}D + \bar{A}C + \bar{B}D + \bar{B}C, \text{ рис.12.5 а}$$

$$NS = \bar{B}\bar{C}\bar{D} + \bar{A}\bar{C}\bar{D} + AB\bar{C} + AB\bar{D}, \text{ рис.12.5 б}$$

Полученным выражениям соответствует схема, которая приведена на рис.12.6

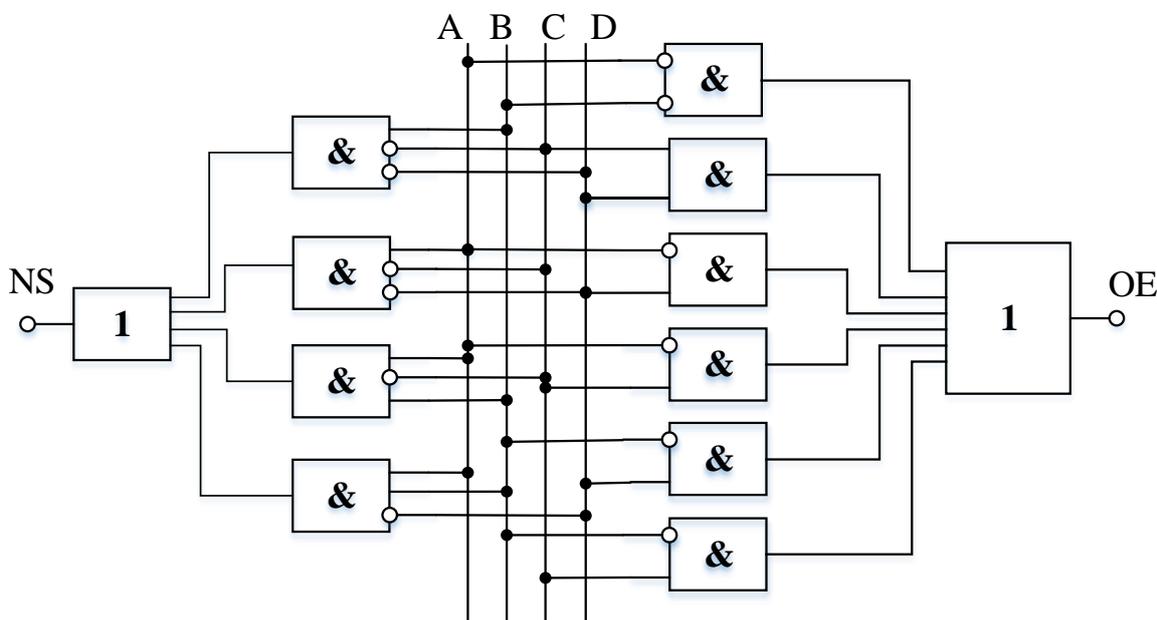


Рис.12.6. Схема светофора.

Задание.

По одному из выбранных вариантов (табл. 12.3) провести синтез, исследовать и проанализировать схему в системе «MATLAB».

Таблица 12.3

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Варианты														
				Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₁₅
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1
0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1

Порядок выполнения работы.

1. По заданной таблице истинности (см. табл. 12.3) написать логическое выражение в СДНФ.
2. Провести минимизацию логического выражения, используя карты Карно.
3. По полученному выражению нарисовать схему.
4. Набрать полученную схему в среде MATLAB (см рис 12.2 и рис 12.3)
5. Выполнить исследование схемы. Результаты исследования оформить в виде таблицы истинности.

Содержание отчета

1. Схема исследуемого устройства.
2. Временные диаграммы, полученные при моделировании на компьютере.
3. Материалы по минимизации заданной логической функции.
4. Результаты испытаний синтезированной схемы в виде таблицы.

Контрольные вопросы.

1. Что такое таблица истинности?
2. Как реализовать с помощью таблицы истинности логический элемент «И» в MATLAB?
3. Как написать логическое выражение в СДНФ?
4. Как написать логическое выражение в СКНФ?
5. Какие клетки карты Карно называются «соседними»?
6. Как использовать диаграмму Карно для упрощения логического выражения заданного уравнением?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без базовых знаний систем автоматического регулирования и электротехнических систем достаточно сложно обеспечить эффективное использование современного оборудования. Изучение электротехники и электроники и систем автоматического регулирования напрямую связано с экспериментальными исследованиями, а перспективное развитие – с виртуальным моделированием.

Согласно основным разделам курса «Математические модели технических объектов управления» и «Электротехника и электроника» в пособии рассмотрено моделирование процессов, происходящих в электротехнических и электронных устройствах: исследование частотных характеристик систем автоматического управления, анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования, синтез систем автоматического регулирования, исследование качества переходных процессов линейной автоматической системы, моделирование нелинейных систем управления, исследование автоматической системы стабилизации постоянного напряжения, моделирование устройств на базе операционных усилителей, моделирование электронных устройств на базе комбинационных логических схем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. П. Дьяконов. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с. ISBN 978-5-94074-652-2
2. Теория автоматического управления: учебник для студентов вузов / С. Е. Душин [и др.] ; под ред. В. Б. Яковлева. - Изд. 3-е, стер. - М. : Высшая школа, 2009. - 567 с.- ISBN 5-06-004096-8
3. MATLAB 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. в математике и моделировании. В. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс. 2005. – 806 с. – ISBN 5-98003-181-2.
4. Моделирование и расчет автоматических систем: С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. Учеб. пособие / Издательство «Посад»; Владимир, 2003. –200 с. – ISBN 5-86953-132-2.
5. В. А. Прянишников. Электроника. Полный курс лекций. 4-е издание. Издательство «Корона принт» 2004. - 210с.- ISBN 5-7931-0018-0
6. Моделирование операционного усилителя в MATLAB. <https://poisk-ru.ru/s66298t1.html>

Учебное электронное издание

ЛИХОДЕЕВ Сергей Иванович

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В СРЕДЕ MATLAB

Практикум

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10;
Adobe Reader; дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Кафедра вычислительной техники и систем управления
slikh@rambler.ru