

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра электроэнергетики и электротехники

Р.Е. Мажирина

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Практикум
для направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Новотроицк, 2020 г.

УДК 681.5(07)
ББК 32.965 я 7
М12

Рецензенты:

Доцент кафедры электроэнергетики и электротехники Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС», кандидат технических наук, **К. В. Лицин**

Инженер по эксплуатации теплотехнического оборудования ООО «Агро-Альянс ОМФ», кандидат технических наук, **А. Н. Бушуев**

Мажирина Р.Е. Теория автоматического управления: практикум для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2020. – 52 с.

В практикуме рассмотрены примеры решения задач по исследованию типовых звеньев и синтезу систем автоматического управления. Примеры даны с использованием программирования и моделирования в MATLABe.

Пособие может быть использовано для дисциплины «Управление техническими системами» для направления подготовки 09.03.03 Прикладная информатика.

Практикум составлен в соответствии с требованиями образовательного стандарта НИТУ "МИСиС" по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ "МИСиС"

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО "Национальный
исследовательский технологиче-
ский университет "МИСиС", 2020

Содержание

Список используемых сокращений	4
1 Общие сведения о MATLAB	5
2 Характеристики типовых звеньев.....	8
3 Устойчивость линейных систем	28
4 Синтез линейных систем автоматического управления	31
Глоссарий	50
Список использованных источников	51

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АФХ – амплитудно-фазовая характеристика

АФЧХ – амплитудно-фазовая частотная характеристика

ЛАХ – логарифмическая амплитудная характеристика

ЛАЧХ – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

ЛФЧХ – логарифмическая фазо-частотная характеристика

ООС – отрицательная обратная связь

САР – система автоматического регулирования

САУ – система автоматического управления

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О MATLAB

MATLAB (от начальных букв слов MATrix LABoratory – матричная лаборатория) - программа, в основе которой матрицы, вектора-строка и вектора-столбцы. Программа создана Мюлер в 70-х г. г. XX века.

В MATLAB реализованы классические численные алгоритмы решения уравнений, задач линейной алгебры, нахождения интегралов, решение дифференциальных уравнений.

В MATLAB существует собственный язык программирования достаточно простотой по применению и интерпретации. В MATLAB существуют довольно мощные среды программирования и визуализации, такие как Fortran, Delphi, C++ и т. п.

MATLAB интегрирован с Word, Excel.

Для того, чтобы узнать, какие именно пакеты входят в установку MATLAB достаточно в командной строке набрать

`>> ver` и нажать <Enter>.

Выводятся все названия пакетов с указанием версий. В версии могут быть такие приложения:

Simulink - средство графического моделирования;

Signal Processing Toolbox - программа обработки сигналов;

Image Processing Toolbox - программа обработки изображений;

Statistics Toolbox - программа статистики;

Symbolic Math Toolbox - символьные вычисления;

Fuzzy Logic Toolbox - интуитивная графическая среда нечеткого моделирования и др.

Интерфейс пакета MATLAB (рисунок 1) состоит из 4-х независимых окон, имеющих следующие названия: **Workspace** (рабочее пространство), **Command Window** (командное окно), **Command History** (окно историй), **Current Director** (окно текущих директорий).

Работа с текущими переменными предполагает использование следующих команд:

who - команда выводит только имена переменных;

whos - команда выводит информацию о размерах массивов и типе переменной, а также, в отдельной строке, информацию об общем количестве элементов в рабочей области и объеме используемой памяти.

clear - команда освобождаем из памяти все переменные. Если в аргументах указать через пробел список переменных, то освобождаются только они;

exist ('имя переменной') - команда сообщающая занято ли имя переменной;

pack - команда выполняет дефрагментацию, очищает память;

clc - чистка командного окна.

Command Window

(командное окно)

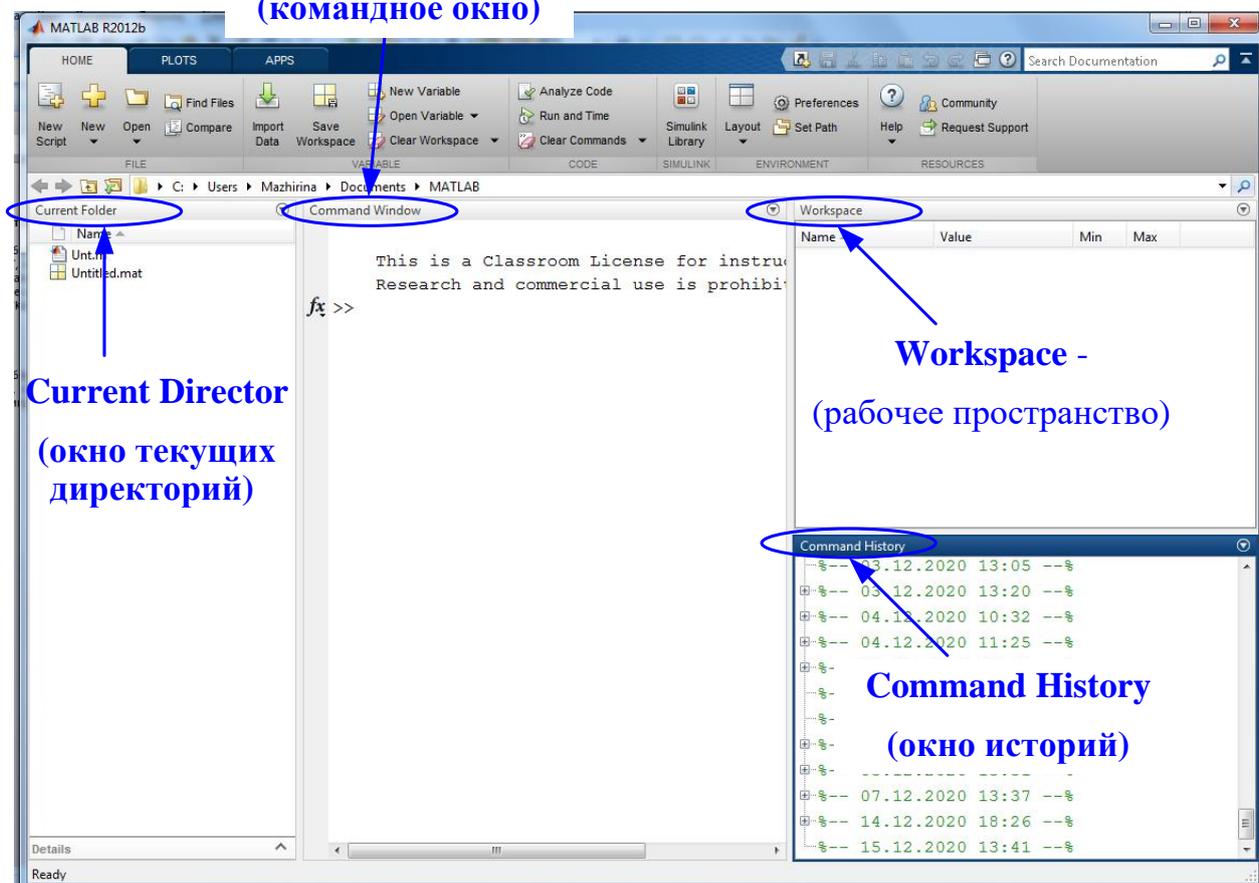


Рисунок 1 – Интерфейс пакета MATLAB

Ввод модели линейной возможен в трех формах - в форме матриц пространства состояния, в виде коэффициентов числителей и знаменателей передаточных функций и в форме задания нулей, полюсов коэффициента передачи системы.

Например:

ss (**State Space** - пространство состояния) - создает модель пространства состояния по заданным матрицам A, B, C, D уравнений состояния системы.

tf (**Transfer function** - передаточная функция) - создает модель по заданным передаточным функциям системы.

zpk (**Zero-Pole_Gain** - нули-полюсы-коэффициент передачи) - создает модель по заданным нулям, полюсам и коэффициентам передачи системы.

Ввод непрерывной модели по периодической функции выполняется следующим образом:

```
>> k1=tf([1 0],[0.05 1])
k1 =
    s
-----
    0.05 s + 1
Continuous-time transfer function.
```

Процедура **get** дает полную характеристику модели.

Например:

```
>> get(k1)
    num: {[1 0 ]}           числитель
    den: {[0.0500 1]}      знаменатель
    Variable: 's'          имя и тип переменной
    ioDelay: 0             время единой задержки
    InputDelay: 0          время задержки на входе
    OutputDelay: 0         время задержки на выходе
    Ts: 0                  время дискретизации в с
    TimeUnit: 'seconds'    единица времени 'секунды'
    InputName: {''}        имена входов {ячейка}
    InputUnit: {''}        входной блок
    InputGroup: [1x1 struct] группа входов, {ячейка}
    OutputName: {''}       имена выходов
    OutputUnit: {''}       выходной блок {ячейка}
    OutputGroup: [1x1 struct] группа входов, {ячейка}
    Name: ''               имя
    Notes: {}              заметки
    UserData: []           дополнительная информация
```

Процедуры анализа вводятся следующим образом:

```
>> функция(название модели)
```

Для анализа системы предусмотрены следующие функции:

impulse – график отклика системы на единичное импульсное воздействие;

step – график отклика на единичный скачок входного воздействия;

bode - строит графики АЧХ и ФЧХ;

nyquist - строит в комплексной плоскости АФХ в полярных координатах;

nichols - строит график Николса, т.е. АЧХ в декартовых координатах.

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

Задача 1

Исследовать аperiodическое звено с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{1}{s+1}.$$

Необходимо построить переходную функцию, импульсную переходную, частотные (амплитудно-фазовую частотную характеристику, амплитудно-частотную характеристику, фазо-частотную характеристику, логарифмические амплитудную и фазовую частотные характеристики).

Решение:

Аperiodическое звено описывается дифференциальным уравнением вида:

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (1)$$

где T – постоянная времени звена, с;

k – коэффициент усиления звена.

Передаточная функция аperiodического звена представлена на рисунке 2.

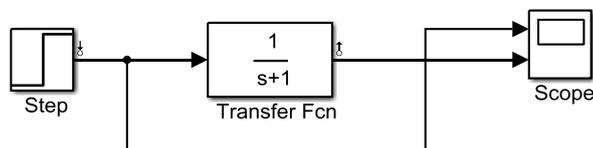


Рисунок 2 – Схема аperiodического звена ($k=1$, $T=1$)

Переходный процесс с экрана Scope представлен на рисунке 3.

Переходная функция – реакция системы на единичный сигнал строится при применении команды **step** и представлена на рисунке 4.

Переходная функция представляет собой реакцию на выходе при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия. По переходной функции можно определить коэффициент усиления системы (**Final value**). В данном примере он равен 1.

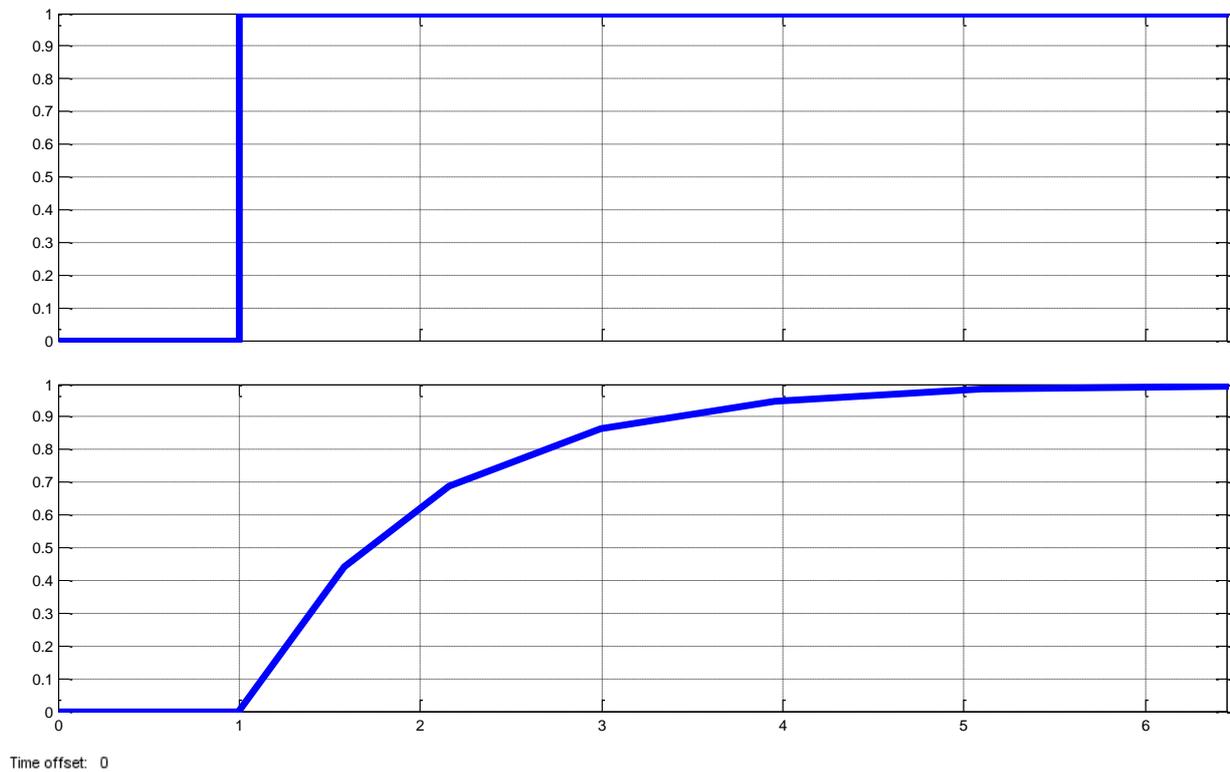


Рисунок 3 – График переходного процесса в окне Score

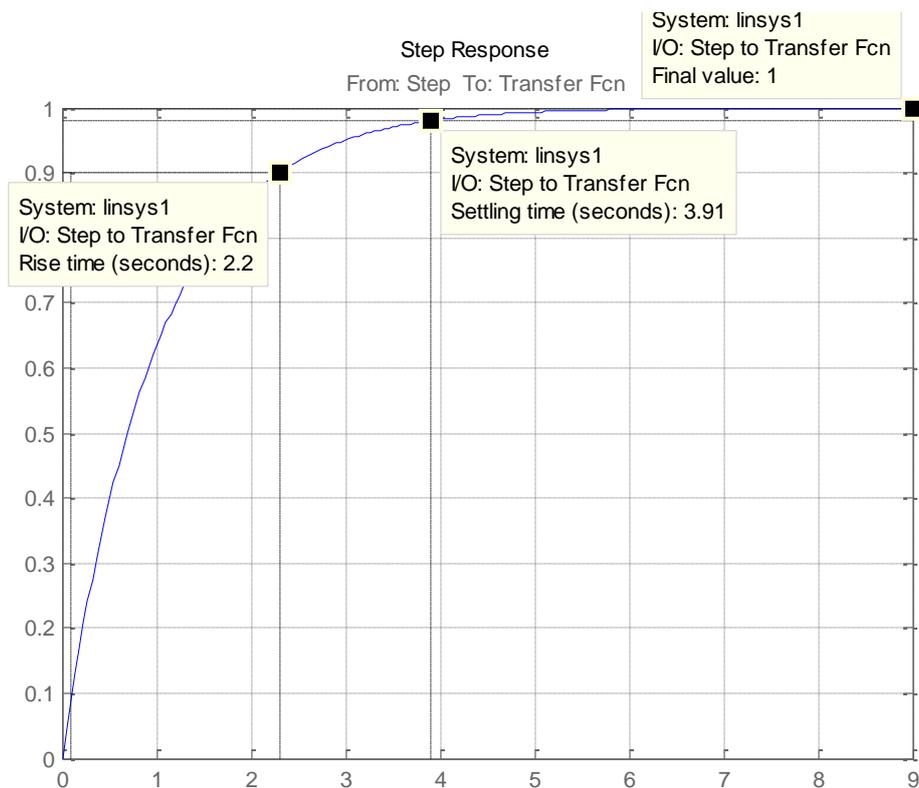


Рисунок 4 – Переходная функция аperiodического звена ($k=1, T=1$)

Rise time – время нарастания системы при подаче на вход ступенчатого сигнала по умолчанию установлено от 10 до 90 % от установившегося значе-

ния. В примере $t_n=2,2$ с.

Settling time – это время переходного процесса, когда установившееся значение находится в пределах 2% от установившегося значения. В примере $t_{\text{пп}}=3,91$ с.

Расчетное время для апериодического звена составляет:

$$T_{\text{ппрасч}}=(3\div 4)\cdot T=3\div 4 \text{ с.} \quad (2)$$

Импульсная переходная характеристика – реакция системы на дельта-сигнал строится при применении команды **impulse** и представлена на рисунке 5.

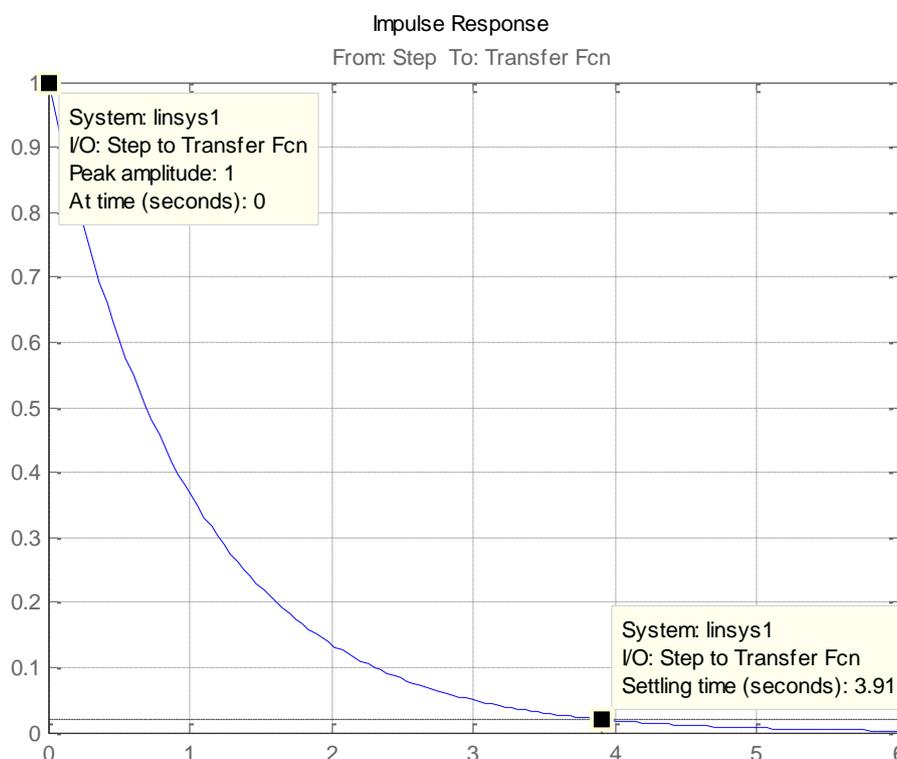


Рисунок 5 – Импульсная переходная функция апериодического звена

Логарифмическая амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики строятся при применении команды **bode**.

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе звена, вызванные гармоническим воздействием на входе.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выражает отношение амплитуды колебаний на выходе звена к амплитуде колебаний на его входе в зависимости от частоты выходного сигнала.

Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) выражает зависимость разности

фаз между входными и выходными колебаниями звена от частоты входного сигнал. Опережению фазы соответствует $\varphi > 0$, а отставанию $\varphi < 0$.

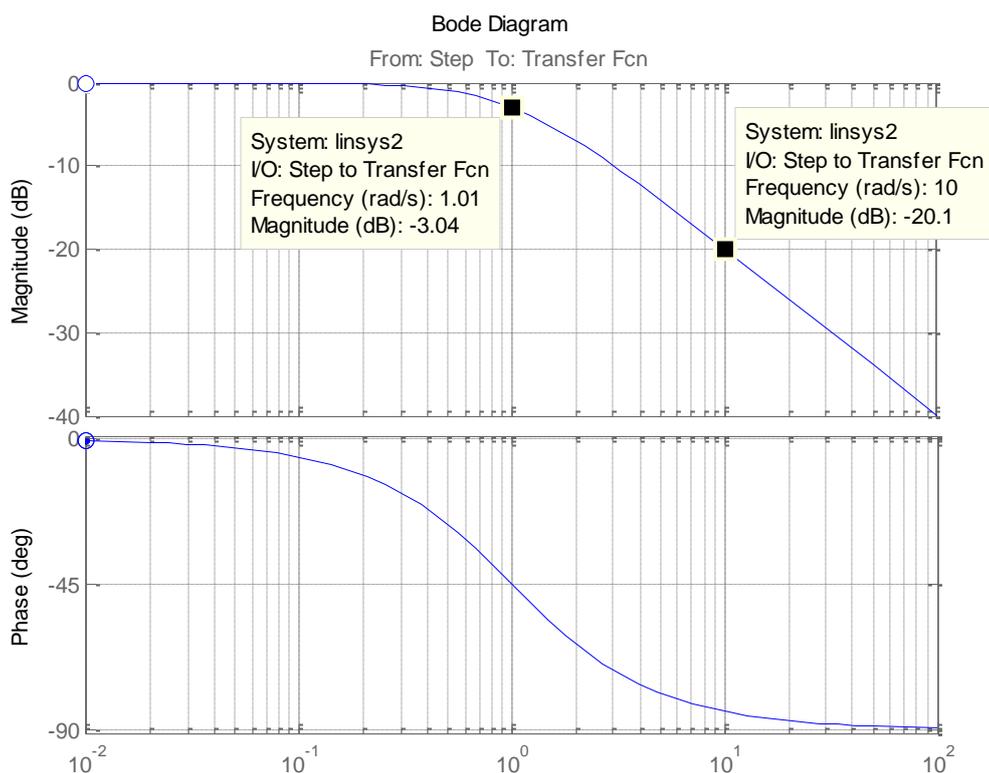


Рисунок 6 – ЛАЧХ и ЛФЧХ аperiodического звена

По оси ординат откладывается величина $L(\omega)$ в децибелах. Изменение уровня сигнала на 10 дБ соответствует изменению его мощности в 10 раз. По оси абсцисс - частота ω в логарифмическом масштабе. Единичным промежуткам по оси абсцисс соответствует изменение частоты в 10 раз. Такой интервал называется декадой.

ЛАЧХ представляет собой прямую, проходящую через точку $L(\omega)=0$ при $\omega=1$, т.е. низкочастотная часть ЛАЧХ имеет нулевой наклон. При увеличении частоты на декаду ордината уменьшается на $20 \cdot \lg 10 = 20$ дБ, то есть наклон ЛАЧХ соответствует наклону -20 дБ/дек.

Логарифмическая фазо-частотная характеристика (ЛФЧХ) асимптотически стремится к нулю при уменьшении ω до нуля (чем меньше частота, тем меньше искажения сигнала по фазе) и к $-\frac{\omega}{2}$ при возрастании ω до бесконечности. Перегиб ЛАЧХ происходит при $\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{4} = 45^\circ$.

Частотный годограф (диаграмма Найквиста) строится при применении команды **nyquist** и представлен на рисунке 7.

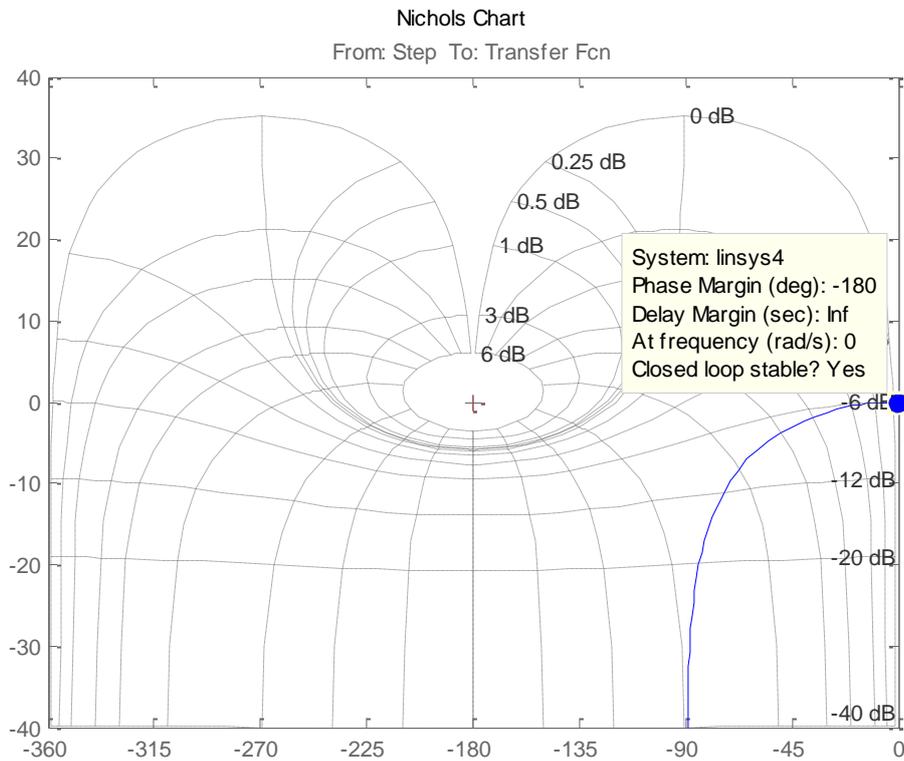


Рисунок 8 – Диаграмма Николса аperiodического звена

Задача 2

Исследовать колебательное звено с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{T_2^2 \cdot s^2 + T_1 \cdot s + 1} = \frac{1}{0,0008 \cdot s^2 + 0,01 \cdot s + 1}$$

Необходимо построить переходную функцию, импульсную переходную, частотные логарифмические амплитудную и фазовую частотные характеристики.

Решение:

Уравнение колебательного звена имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{T_2^2 \cdot s^2 + T_1 \cdot s + 1}, \quad (3)$$

где T_1 , T_2 – постоянные времени колебательного звена;

k – коэффициент усиления колебательного звена.

Постоянные времени колебательного звена T_1 и T_2 связаны зависимостью

$$\xi = \frac{T_1}{2 \cdot T_2} = \frac{0,01}{2 \cdot \sqrt{0,0008}} = 0,178.$$

Коэффициент ξ называют коэффициентом колебательности, он характеризует колебательность переходного процесса колебательного звена. Если $\xi < 1$, то переходный процесс звена – колебательный, и чем ξ меньше единицы, тем больше колебательность звена. Если $\xi \geq 1$, то получаем апериодическое звено второго порядка.

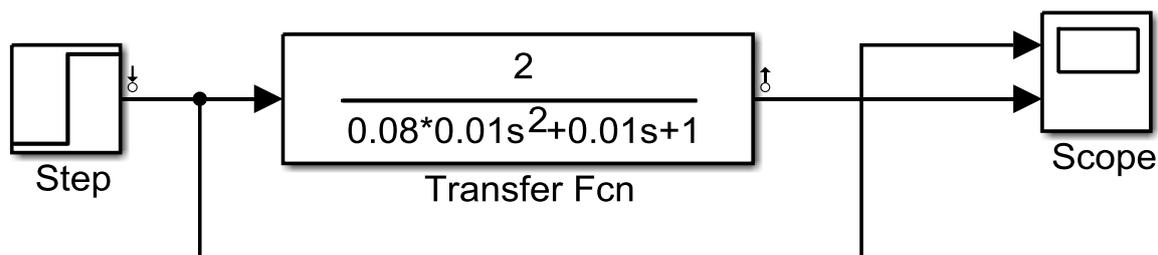


Рисунок 9 – Схема колебательного звена

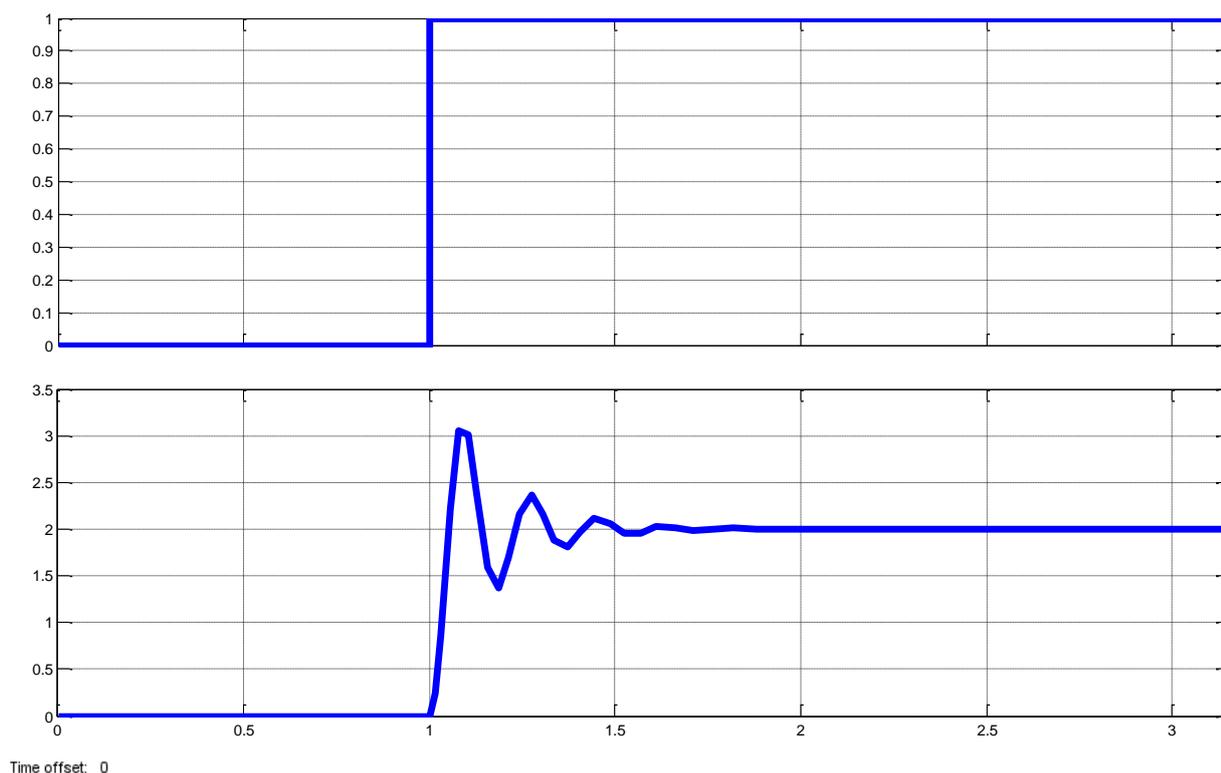


Рисунок 10 – График переходного процесса в окне Scope

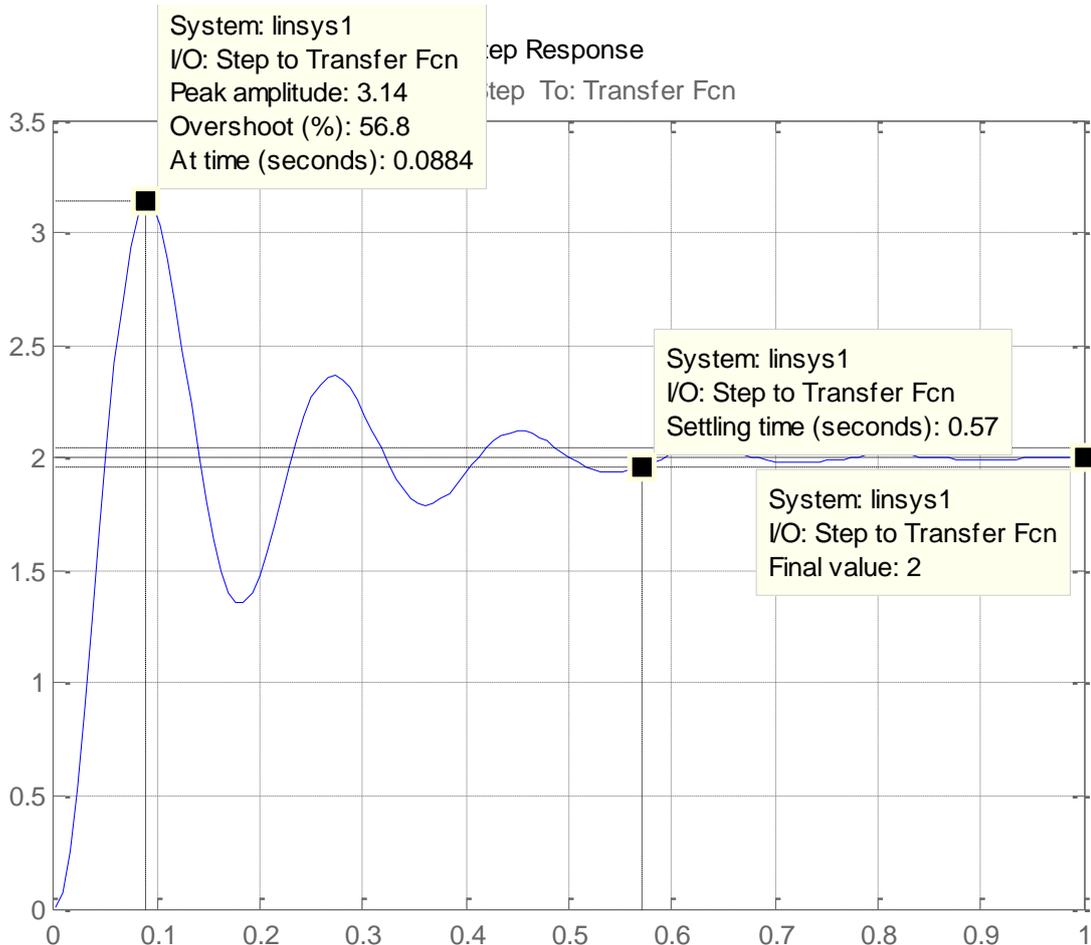


Рисунок 11 – Переходная функция колебательного звена

По переходной функции можно определить коэффициент усиления системы (**Final value**). В данном примере он равен 1. Время переходного процесса, когда установившееся значение находится в пределах 2% от установившегося значения. В примере $t_{\text{пн}}=0,57$ с.

Расчетное время для апериодического звена составляет:

$$T_{\text{пн,расч}}=(3.4) \cdot T. \quad (4)$$

Импульсная переходная характеристика колебательного звена представлена на рисунке 12.

Логарифмическая амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики колебательного звена представлена на рисунке 13.

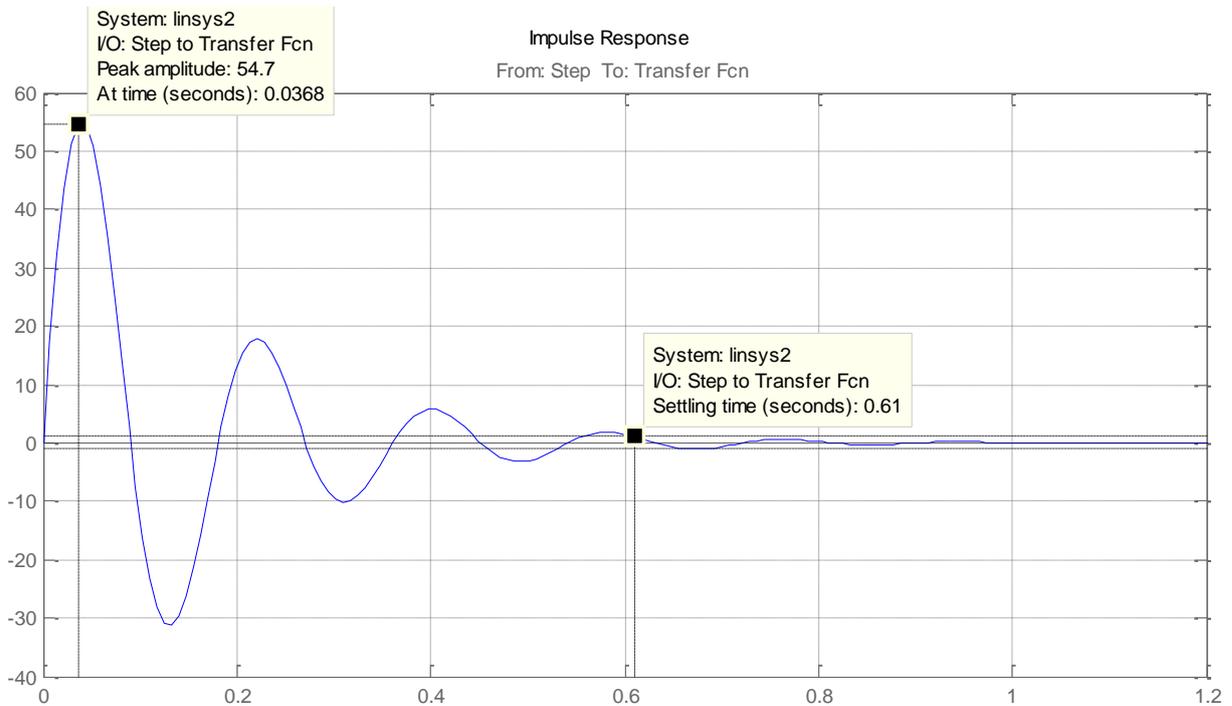


Рисунок 12 – Импульсная переходная функция колебательного звена

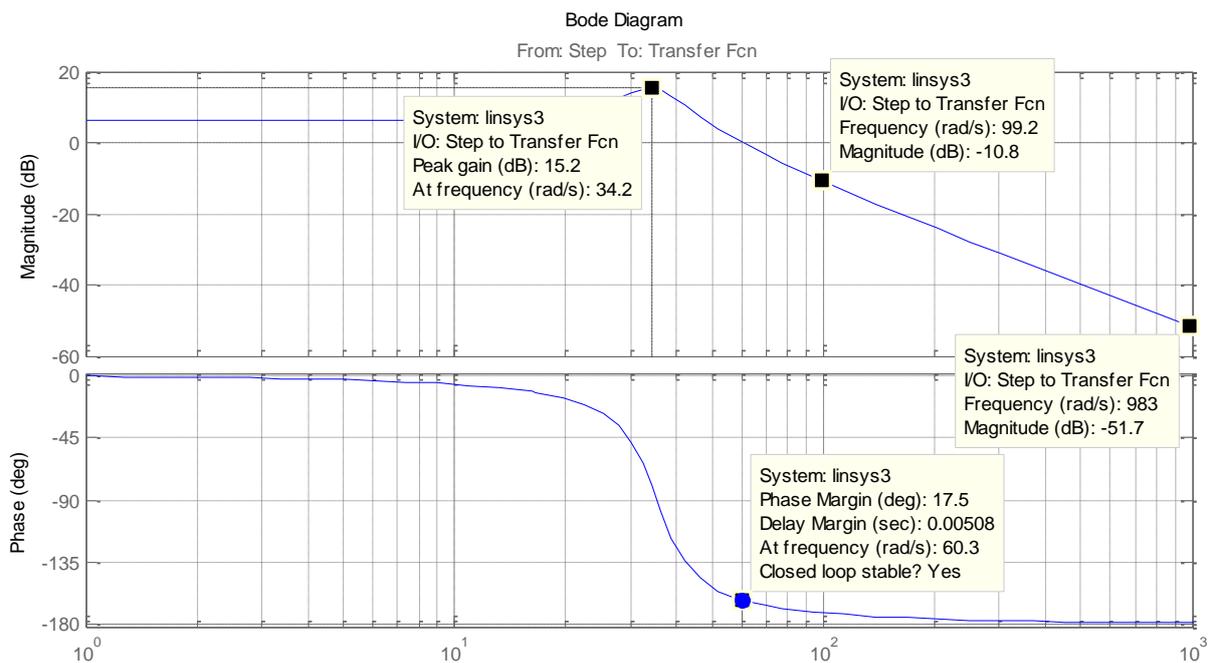


Рисунок 13 – ЛАЧХ и ЛФЧХ колебательного звена

Асимптотическая ЛАЧХ колебательного звена до сопрягающей частоты совпадает с осью абсцисс, при дальнейшем увеличении частоты наклон -40 дБ/дек. То есть высокие частоты колебательное звено «заваливает» сильнее, чем аperiodическое звено.

ЛФЧХ при малых частотах асимптотически стремится к нулю. При увели-

чении частоты до бесконечности выходной сигнал поворачивается по фазе относительно входного на угол, стремящийся в пределе к -180° .

Задача 3

Исследовать систему, состоящую из двух апериодических звеньев с передаточными функциями $W_1(s) = \frac{2}{0,1 \cdot s + 1}$ и $W_2(s) = \frac{2,5}{0,002 \cdot s + 1}$.

Решение:

Схема последовательно соединенных апериодических звеньев представлена на рисунке 14. Переходные процессы для последовательно соединенных звеньев представлены на рисунке 15.

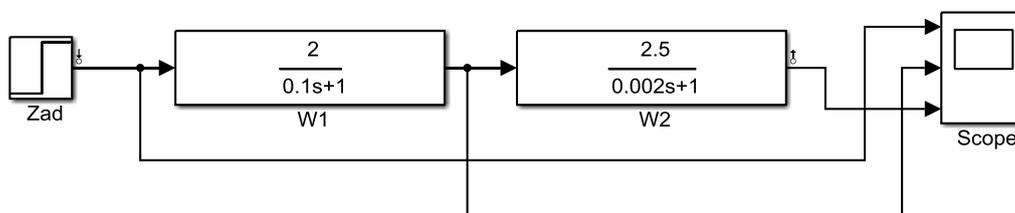


Рисунок 14 – Схема двух апериодических звеньев

Анализируя переходный процесс на рисунке 15, коэффициент усиления апериодического звена $W_1(s)$ $k_{\text{усил } w1} = 2$, а время переходного процесса $t_{\text{пп1}} = 0,4$ с.

Общий коэффициент усиления системы

$$k_{\text{усил}} = k_{\text{усил } w1} \cdot k_{\text{усил } w2} = 2 \cdot 2,5 = 5.$$

Время переходного процесса системы изменится незначительно, так как постоянная времени звена $W_2(s)$ имеет небольшое значение $T_2 = 0,02$ с.

ЛАЧХ и ЛФЧХ представлены на рисунке 16.

Низкочастотная часть ЛАЧХ имеет нулевой наклон, так как в системе отсутствуют интегральные звенья. В системе имеются два апериодических звена, поэтому ЛАЧХ имеет два участка с наклонами -20 дБ/дек и -40 дБ/дек.

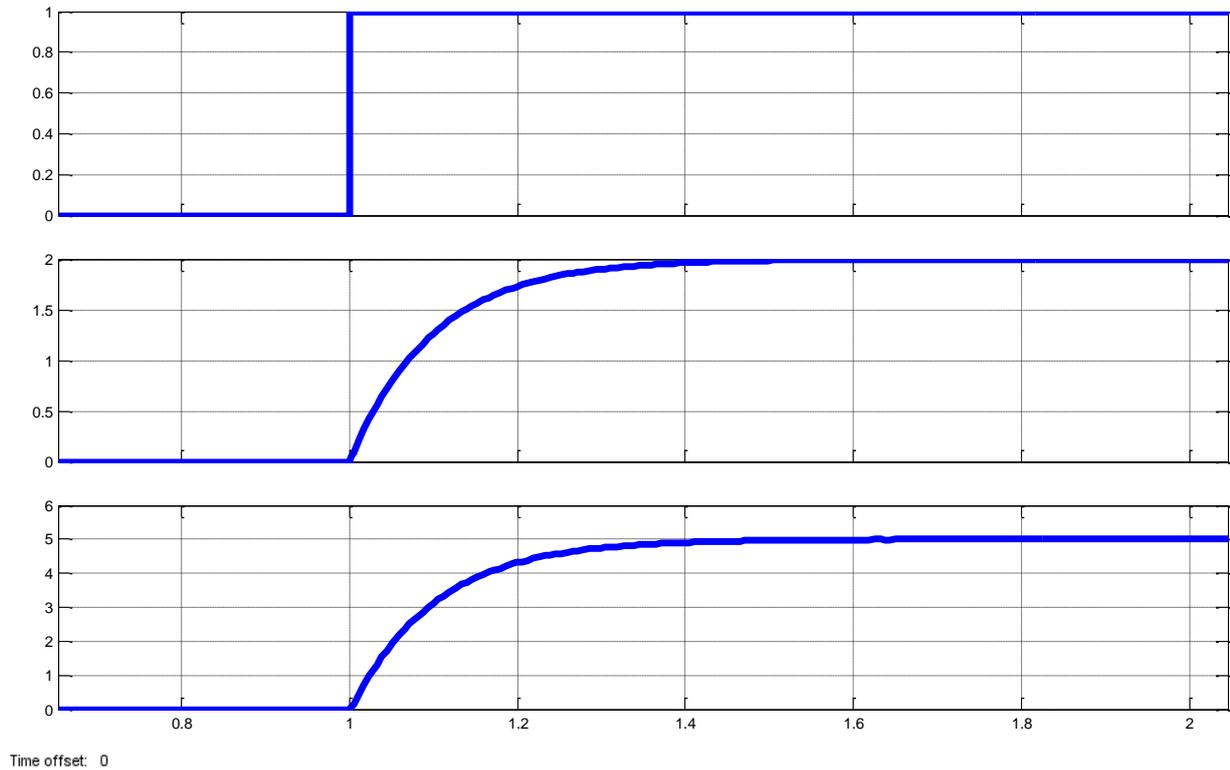


Рисунок 15 – Переходные процессы к задаче 3

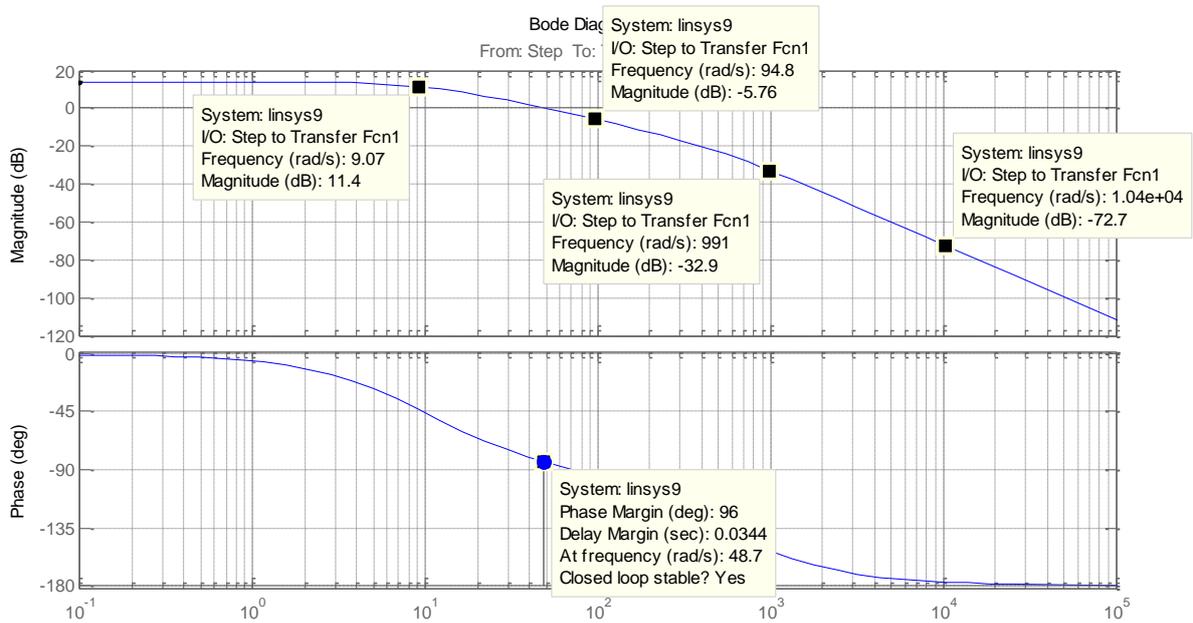


Рисунок 16 – ЛАЧХ к задаче 3

Задача 4

Исследовать два последовательно соединенных звена интегратора и колебательного звена

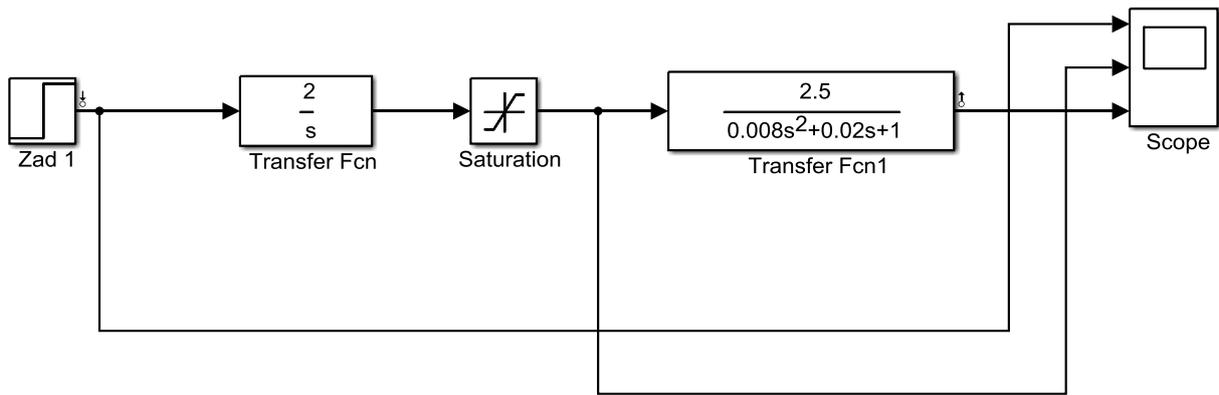


Рисунок 17 – Схема к задаче 4

Решение:

Переходные процессы для схемы, изображенной на рисунке 17 представлены на рисунке 18, а частотные характеристики на рисунке 19.

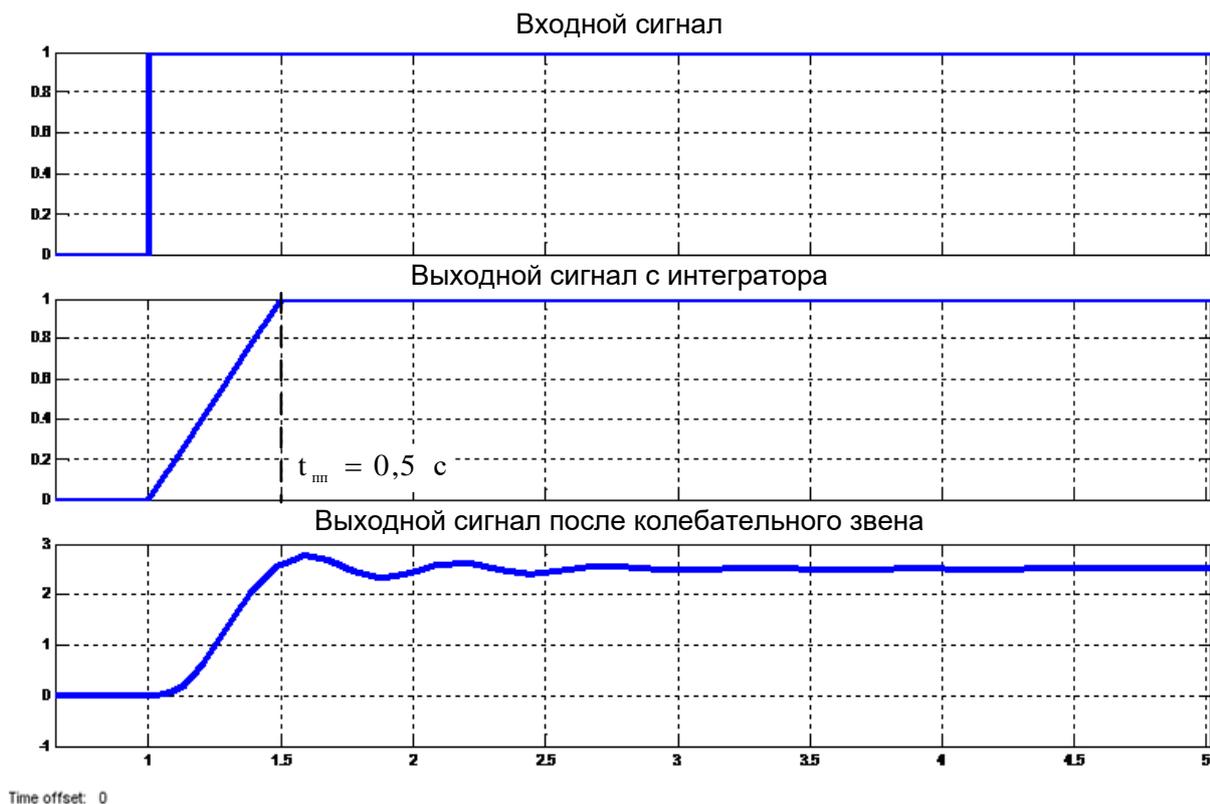


Рисунок 18 – Переходный процесс в задаче 4

На входе системы сигнал изменяется скачком с задержкой в 1 с. На выходе интегратора сигнал нарастает линейно, а время нарастания зависит от параметров интегратора и в данном случае составило $t_{инт} = \frac{1}{k_{усилн}} = \frac{1}{2} = 0,5$ с. Такие

образом, коэффициент усиления интегратора влияет только на длительность переходного процесса.

А общий коэффициент усиления системы определяется коэффициентом усиления колебательного звена. В данной системе общий коэффициент системы $k_{\text{усил}_c} = 2,5$.

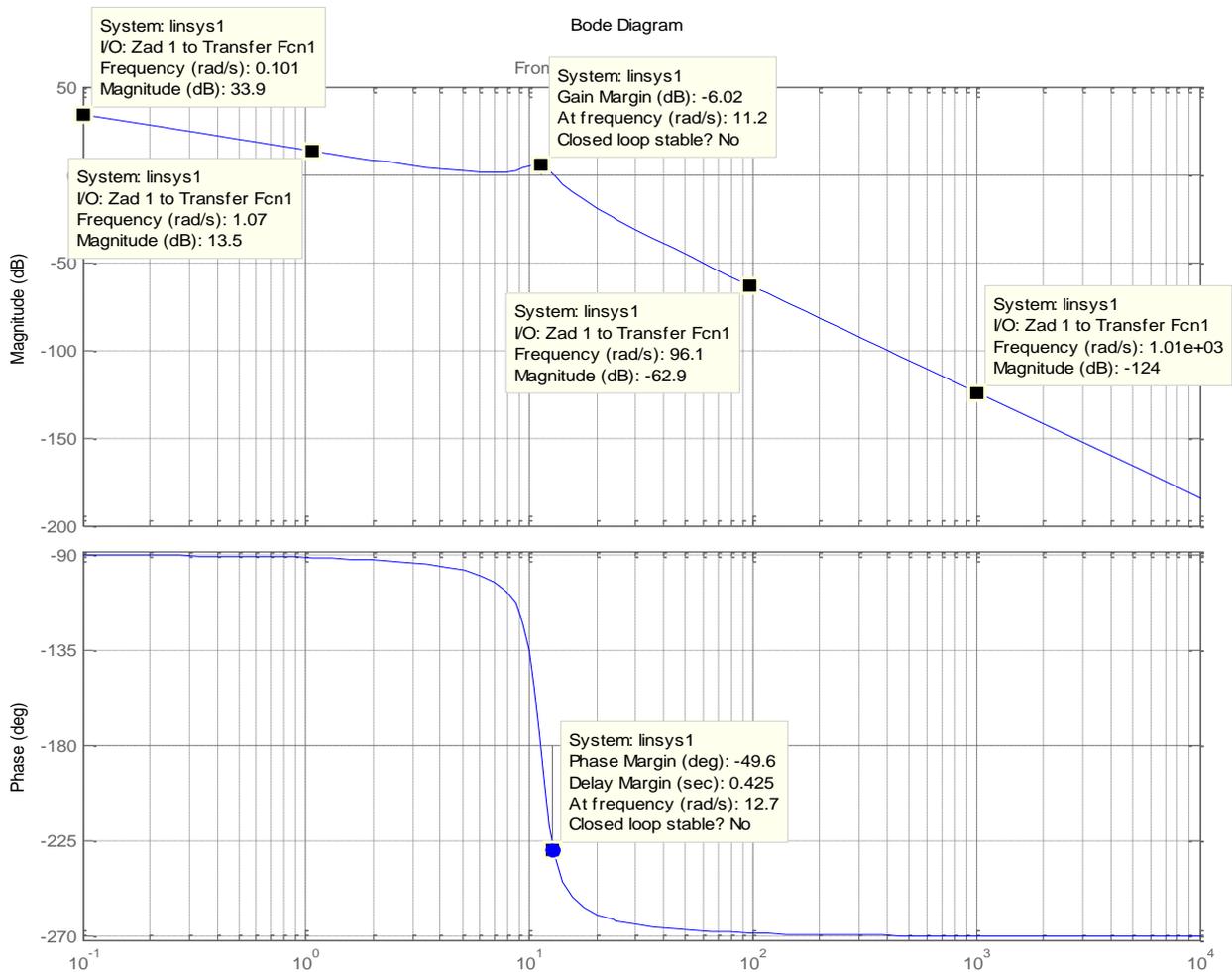


Рисунок 19 – ЛАЧХ и ЛФЧХ к задаче 4

Наклон низкочастотной части ЛАЧХ определится как $13,5 - 33,9 = -20,4 \text{ дБ/дек}$, что соответствует интегратору. Далее ЛАЧХ имеет наклон $62,9 - 124 = -61,1 \text{ дБ/дек}$, что свидетельствует о наличии последовательно расположенного колебательного звена.

Задача 5

Определить передаточную функцию при соединении двух апериодических звеньев $W_1(s) = \frac{1}{2 \cdot s + 3}$ и $W_2(s) = \frac{1}{4 \cdot s + 5}$ последовательно и параллельно.

Решение:

При последовательном соединении двух передаточных функций результирующая определится как произведение передаточных функций:

$$W_3(s) = W_1(s) \cdot W_2(s). \quad (5)$$

$$W_3(s) = \frac{1}{(2 \cdot s + 3) \cdot (4 \cdot s + 5)} = \frac{1}{8 \cdot s^2 + 10 \cdot s + 12 \cdot s + 15} = \frac{1}{8 \cdot s^2 + 22 \cdot s + 15}.$$

При параллельном соединении двух передаточных функций результирующая определится как сумма передаточных функций:

$$W_3(s) = W_1(s) + W_2(s). \quad (6)$$

$$W_3(s) = \frac{1}{(2 \cdot s + 3)} + \frac{1}{(4 \cdot s + 5)} = \frac{(4 \cdot s + 5) + (2 \cdot s + 3)}{(2 \cdot s + 3) \cdot (4 \cdot s + 5)} = \frac{6 \cdot s + 8}{8 \cdot s^2 + 22 \cdot s + 15}.$$

Листинг программы имеет вид:

```
% Очистка памяти
clear
% Очистка экрана
clc
% Ввод передаточная функции звена W1
W1=tf([1],[2 3])
% Ввод передаточной функции звена W2
W2=tf([1],[4 5])
% Нахождение результирующей передаточной функции
% при соединении последовательно W1 и W2
W3=W1*W2
% Нахождение результирующей передаточной функции
% при соединении параллельно W1 и W2
W4=W1+W2
```

Программа работает следующим образом:

```
W1 =
1
-----
2 s + 3
```

Continuous-time transfer function.

W2 =

1

4 s + 5

Continuous-time transfer function.

W3 =

1

8 s² + 22 s + 15

Continuous-time transfer function.

W4 =

6 s + 8

8 s² + 22 s + 15

Continuous-time transfer function.

Задача 6

Построить переходную функцию для интегрального звена с передаточной функцией $W_1(s) = \frac{1}{s}$, аperiodического звена: $W_2(s) = \frac{1}{s+1}$, и колебательного звена $W_3(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}$.

Решение:

Текстовое оформление графиков осуществляется при помощи следующих команд:

grid on – включение сетки;

title('string') – установка на графике титульной надписи, заданной строковой переменной;

legend('string') – добавление легенды;

xlabel ('string') - установка надписей возле оси x;

ylabel ('string') - установка надписей возле оси y*

text (X, Y, 'string') - добавляет в график текст, заданный строковой константой 'string' в место определяемое точной с координатами (X, Y).

Листинг программы имеет вид:

```
% Ввод передаточной функции аperiodического звена
```

```

W1=tf([1],[1 1])
% Построение переходной функции
step(W1)

% Вывод на дисплей надписи
disp ('Передаточная функция колебательного звена')
% Ввод передаточной функции колебательного звена
W2=tf([1],[1 0.8 1])
% Добавление графика
hold on
% Построение переходной функции
step(W2)

% Текстовое оформление графиков
% Включение сетки
grid on
% Установка на графике титульной надписи, заданной строко-
вой переменной
title('Переходные функции апериодического и колебательного
звена')
% добавление легенды
legend('апериодическое звено', 'колебательное звено')
% установка надписей возле оси X
xlabel ('t, с')
% установка надписей возле оси Y
ylabel ('w, о.е.')
% добавляет в график текст
text (3, 0.3, 'Подписи графиков при нажатии правой кнопки
мышь')

```

Программа работает следующим образом:

Передаточная функция апериодического звена

W1 =

1

s + 1

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция колебательного звена

W2 =

1

s² + 0.8 s + 1

Continuous-time transfer function.

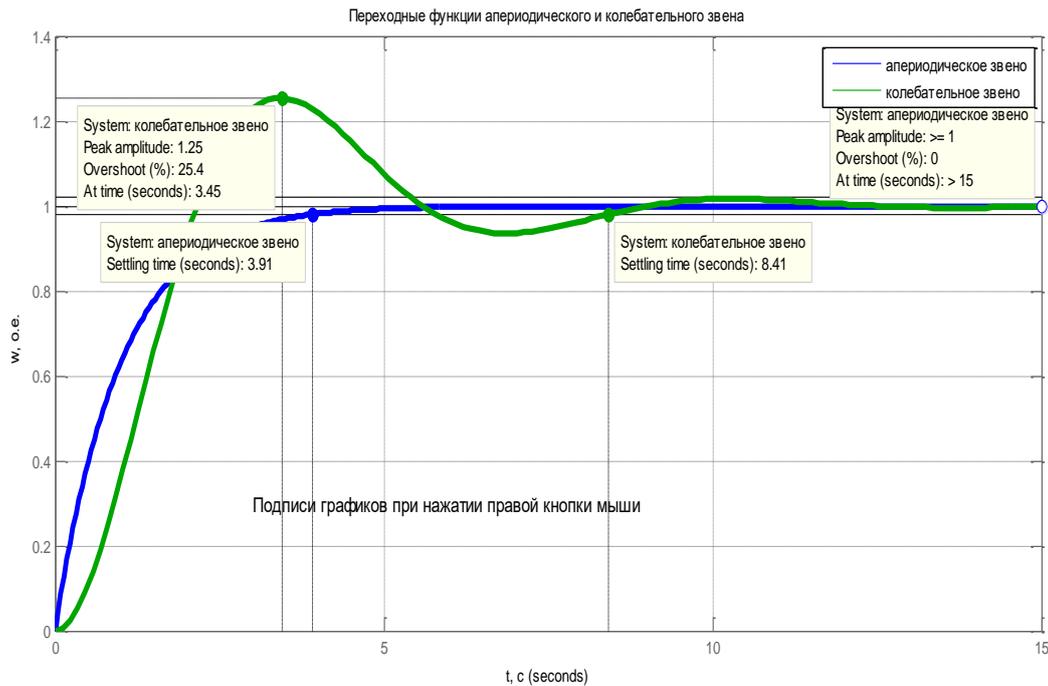


Рисунок 20 – Переходные функции аperiodического и колебательного звена

Задача 7

Составить программу построения переходных функций аperiodического и колебательного звеньев последовательно и параллельно соединенных. Передаточная функция передаточная функция аperiodического звена: $W_1(s) = \frac{1}{s+1}$, а

передаточная функция колебательного звена $W_2(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}$.

Решение:

При написании программы использовалась команда разбиения графического окна **subplot**, позволяющая построить в одном графическом окне несколько осей и вывести на них различные графики. Команда имеет следующий формат:

$$\text{subplot}(i, j, n), \quad (7)$$

где i – число графиков по вертикали;

j – число графиков по горизонтали,

n – номер текущего графика.

Листинг программы имеет вид:

```

% Очистка памяти
clear
% Очистка экрана
clc

% Вывод на дисплей надписи
disp ('Передаточная функция аperiodического звена')
% Ввод передаточной функции аperiodического звена
W1=tf([1],[1 1])
% Создание графического окна 1x4
% построение графика в окне 1
subplot (1, 4, 1)
% Построение переходной функции аperiodического звена
step(W1)
% Включение сетки
grid on
title('Аperiodическое звено')

% Вывод на дисплей надписи
disp ('Передаточная функция колебательного звена')
% Ввод передаточной функции колебательного звена
W2=tf([1],[1 1 1])
% Создание графического окна 1x4
% построение графика в окне 2
subplot (1, 4, 2)
% Построение переходной функции колебательного звена
step(W2)
% Включение сетки
grid on
title('Колебательное звено')

% Последовательное соединение звена W3, W4
disp ('Передаточная функция при последовательном соединении
звеньев W1, W2')
Q1=W1*W2
% Создание графического окна 1x4
% построение графика в окне 3
subplot (1, 4, 3)
% Построение переходной функции колебательного звена
step(Q1)
% Включение сетки
grid on
title('Последовательное соединение')

% Параллельное соединение звена W3, W4
disp ('Передаточная функция при параллельном соединении
звеньев W1, W2')

```

```

Q2=W1+W2
% Создание графического окна 1x4
% построение графика в окне 4
subplot (1, 4, 4)
% Построение переходной функции колебательного звена
step(Q2)
% Включение сетки
grid on
title('Параллельное соединение')

```

Программа работает следующим образом:

Передаточная функция аperiodического звена

W1 =

1

s + 1

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция колебательного звена

W2 =

1

s² + s + 1

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция при последовательном соединении звеньев

W3, W4

Q1 =

1

s³ + 2 s² + 2 s + 1

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция при параллельном соединении звеньев W3,

W4

Q2 =

s² + 2 s + 2

s³ + 2 s² + 2 s + 1

Continuous-time transfer function.

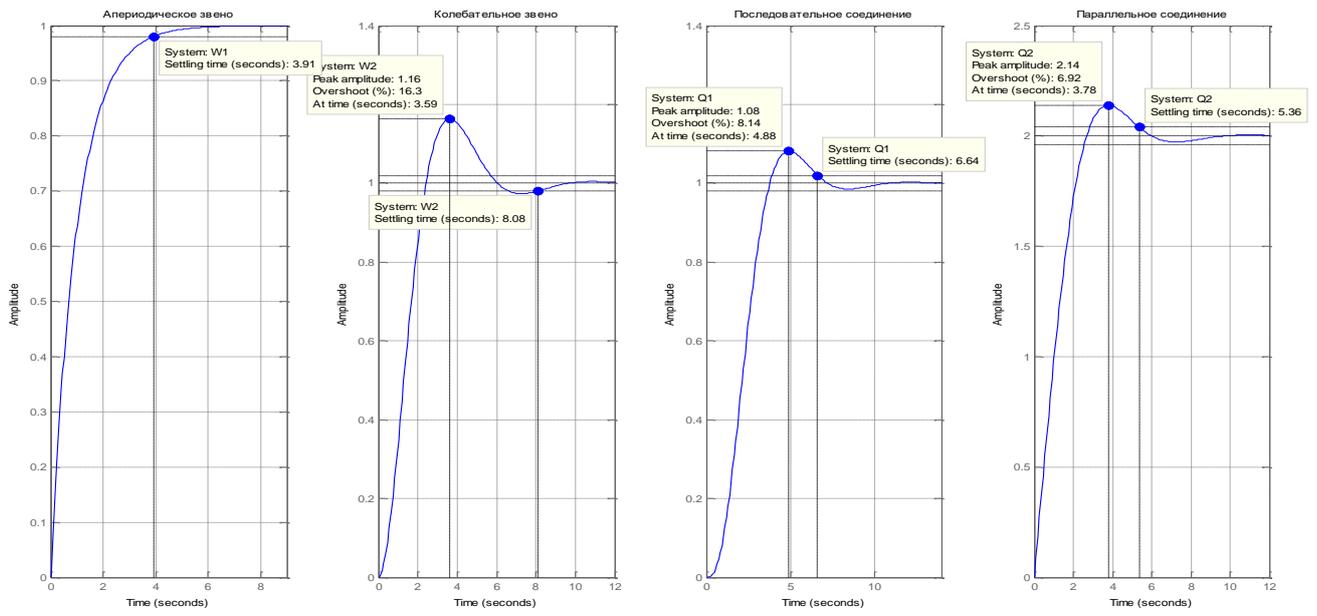


Рисунок 21 - Переходные функции к задаче 7

3 УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Задача 8

Исследовать последовательное соединение колебательного и апериодического звеньев с единичной отрицательной обратной связью. Передаточная функция колебательного звена $W_1(s) = \frac{1}{s^2 + 0,1 \cdot s + 1}$, а передаточная функция апериодического звена: $W_2(s) = \frac{1}{s + 1}$. Построить ЛАЧХ для разомкнутой и замкнутой систем.

Решение:

При построении графиков можно управлять видом графиков, при помощи дополнительных аргументов, помещенных за каждой парой векторов. Этот аргумент заключается в апострофы.

Аргумент состоит из трех символов, которые определяют цвет, тип маркера и тип линии.

Цвет: **y** – желтый, **m** – розовый, **c** – голубой, **r** – красный, **g** – зеленый, **k** – черный.

Тип маркера: «.» – точка, «O» – кружок, «x» – крестик, «+» – знак плюса, * – звездочка, s – квадрат, d – ромб, v – треугольник вершиной вверх и др.

Тип линии: «-» – сплошная, «:» – пунктирная, «-.» – штрих-пунктирная, «--» – штриховая.

Например:

```
x=0:0.25:2;  
y=sin(x);  
plot(x, y, 'cd:')
```

Листинг программы имеет вид:

```
clc  
% Ввод передаточной функции  
W1=tf([1],[1 0.1 1])  
W2=tf([1],[1 1])  
% Передаточная функция при последовательном  
% соединении W1 и W2  
W=W1*W2  
% Построение ЛАЧХ разомкнутой системы
```

```

% (красного цвета сплошной линией)
bode(W, 'r-')
% Передаточная функция с отрицательной единичной
% обратной связью
W3=feedback(W,1)
% Команда добавления графика
hold on
% Построение замкнутой ЛАЧХ
% (черного цвета штриховой линией)
bode(W3, 'k--')
% Команда включения сетки
grid on
% Название графика
title('ЛАЧХ разомкнутой и замкнутой систем')
% Добавление легенды
legend('разомкнутая система', 'замкнутая система')

```

Программа работает следующим образом:

W1 =

1

$s^2 + 0.1s + 1$

Continuous-time transfer function.

W2 =

1

$s + 1$

Continuous-time transfer function.

W =

1

$s^3 + 1.1s^2 + 1.1s + 1$

Continuous-time transfer function.

W3 =

1

$s^3 + 1.1s^2 + 1.1s + 2$

Continuous-time transfer function.

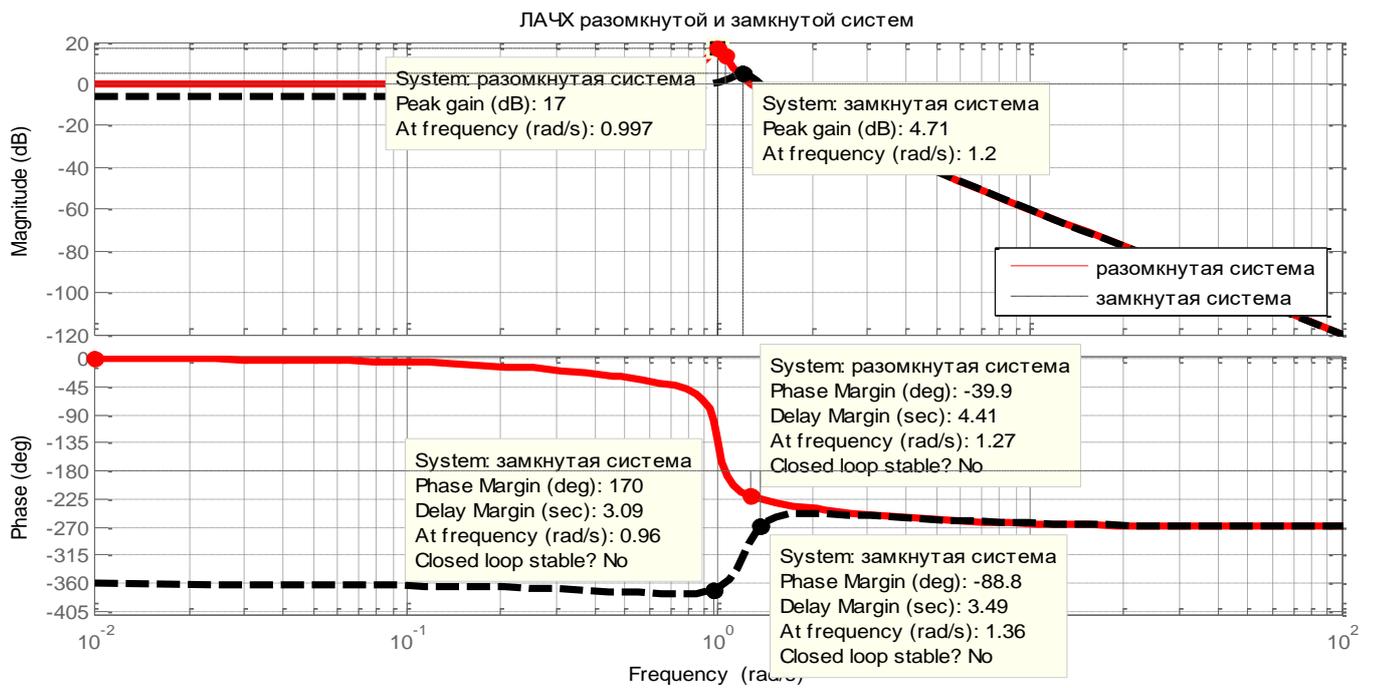


Рисунок 22 - ЛАХХ и ЛФЧХ разомкнутой и замкнутой систем

Анализируя вид ЛАЧХ и ЛФЧХ для разомкнутой и замкнутой систем видно, что различия в зависимостях наблюдается только на низких частотах. При возрастании частот характеристики сливаются.

4 СИНТЕЗ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Задача 9

Система состоит из двигателя с передаточной функцией:

$$W_{dv}(s) = \frac{1/k\phi}{T_{я} \cdot T_{м} \cdot s^2 + T_{м} \cdot s + 1} = \frac{1/2}{0,08 \cdot 0,1 \cdot s^2 + 0,1 \cdot s + 1}$$

и преобразователя с передаточной функцией:

$$W_{tp}(s) = \frac{k_{tp}}{T_{tp} \cdot s + 1} = \frac{22}{0,008 \cdot s + 1}$$

Для регулирования выходной величины - скорости используется П-регулятор с коэффициентом усиления $k_{pc}=5$. Построить ЛАЧХ и ЛФЧХ для объекта регулирования, регулятора и скорректированной системы.

Решение:

При известной ЛАЧХ разомкнутой, системы объекта регулирования $L_{or}(\omega)$ ЛАЧХ последовательного регулятора $L_{rs}(\omega)$ определяется:

$$L_{or}(\omega) + L_{rs}(\omega) = L_{raz}(\omega), \quad (8)$$

где $L_{raz}(\omega)$ - разомкнутая ЛАЧХ скорректированной системы.

Разомкнутая ЛАЧХ скорректированной системы определяется графическим сложением ЛАЧХ объекта регулирования (нескорректированной системы) и ЛАЧХ регулятора.

Листинг программы имеет вид:

```
% Очистка памяти
clear
%Очистка командного окна
clc
% Ввод передаточной функции двигателя
Wdv=tf([1/2],[0.08*0.1 0.1 1]);
% Ввод передаточной функции преобразователя
Wtp=tf([22],[0.008 1]);
% Передаточная функция объекта регулирования
```

```

disp('Передаточная функция объекта регулирования')
Wor=Wtp*Wdv
% Определение передаточной функции регулятора
disp('Передаточная функция регулятора')
Wrs=tf([5],[1])
% Построение ЛАЧХ объекта регулирования
% черного цвета штриховой линией
bode(Wor, 'k--')
% Добавление графика
hold on
% Построение ЛАЧХ регулятора скорости
% синего цвета непрерывной линией
bode(Wrs, 'b-')
disp('Передаточная функция разомкнутой скорректированной
системы')
W_raz=Wrs*Wor
% Построение ЛАЧХ разомкнутой скорректированной системы
% красного цвета штрихпунктирной линией
bode(W_raz, 'r-.')
% Включение сетки
grid on
% Добавление легенды
legend('объект регулирования', 'регулятор', 'разомкнутая
система')

```

Программа работает следующим образом:

Передаточная функция объекта регулирования

Wor =

11

6.4e-05 s³ + 0.0088 s² + 0.108 s + 1

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция регулятора

Wrs =

5

Static gain.

Передаточная функция разомкнутой скорректированной системы

W_raz =

55

6.4e-05 s³ + 0.0088 s² + 0.108 s + 1

Continuous-time transfer function.

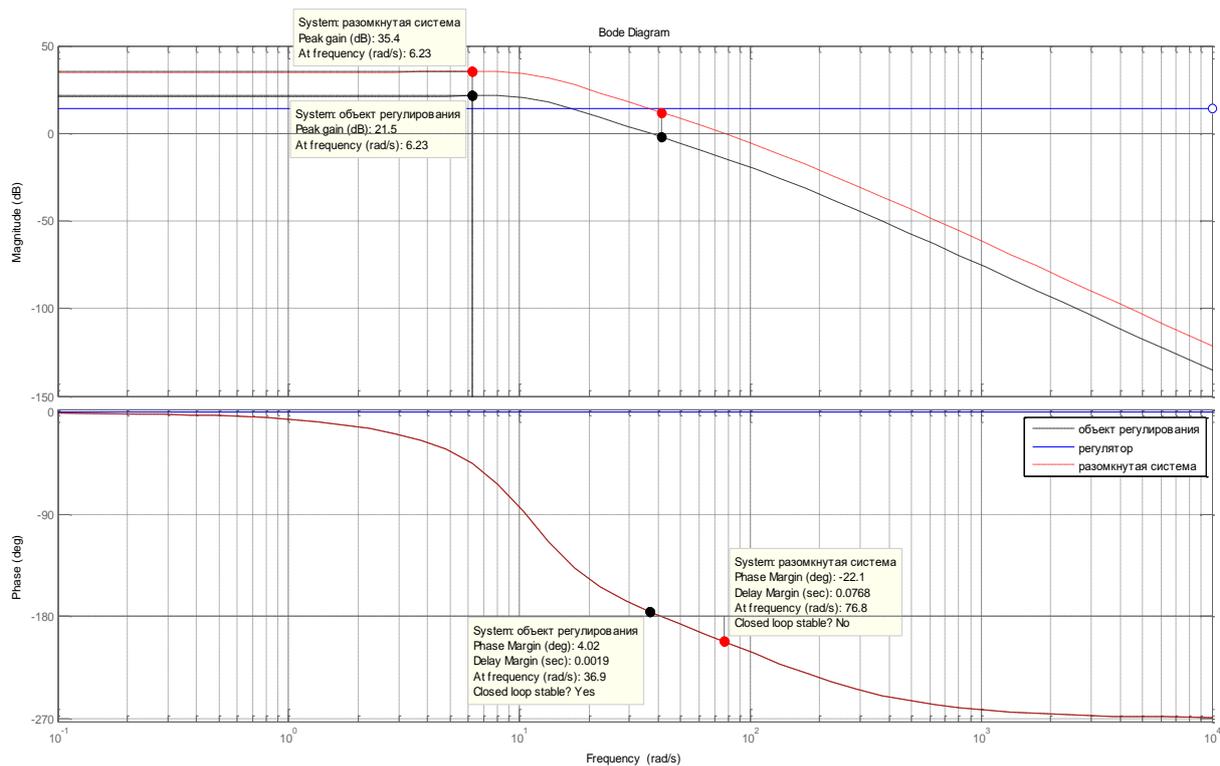


Рисунок 23 - ЛАХЧ и ЛФЧХ к задаче 9

Представленные ЛАХЧ на рисунке демонстрируют графический метод сложения характеристик объекта регулирования и регулятора.

Объектом регулирования являются два последовательно соединенных звена апериодического и колебательного. При последовательном соединении преобразователя и двигателя нескорректированная система была устойчивой. При добавлении пропорционального регулятора скорректированная система перестала быть устойчивой.

Задача 10

Составьте программу для построения переходных и частотных характеристик контура регулирования, настроенного на модульный оптимум, по значениям коэффициента настройки $a=2$ и величине некомпенсируемой постоянной времени T .

Решение:

Передаточная функция разомкнутой системы, настроенной на модульный оптимум с учетом единичной обратной связи имеет вид:

$$W(s)_{\text{раз}} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2 + a \cdot T_{\mu} \cdot s}, \quad (9)$$

а передаточная функция замкнутой системы:

$$W(s)_{\text{зам}} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1) + 1} = \frac{1}{a \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2 + a \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}. \quad (10)$$

Программа имеет вид:

```
clear
clc
% Программа построения переходных и
% частотных характеристик контура настроенного
% на модульный оптимум

% Некомпенсируемая постоянная времени
T=1;
% Коэффициент настройки
a=2;
% Передаточная функция разомкнутого контура
disp('Передаточная функция разомкнутого контура')
Wr=tf([1], [a*T^2 a*T 0])
% Передаточная функция замкнутого контура
disp('Передаточная функция замкнутого контура')
Wz=tf([1], [a*T^2 a*T 1])
% Построение графика переходной функции замкнутого
контура
step (Wz)
% Название графика
title('Переходная функция замкнутого контура при МО')
% Команда включения сетки
grid on
% Открытие нового окна Figure
figure
% Построение ЛАЧХ разомкнутой системы
% (красного цвета сплошной линией)
bode (Wr, 'r-')
% Команда добавление графика
hold on
% Построение ЛАЧХ замкнутой системы
% (черного цвета штриховой линией)
bode (Wz, 'k--')
% Команда включения сетки
```

```

grid on
% Название графика
title('ЛАЧХ и ЛФЧХ контура настроенного на МО')
% Добавление легенды
legend('разомкнутая система', 'замкнутая система')

```

Программа работает следующим образом:

Передаточная функция разомкнутого контура

$W_r =$

1

$2 s^2 + 2 s$

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция замкнутого контура

$W_z =$

1

$2 s^2 + 2 s + 1$

Continuous-time transfer function.

Переходная характеристика представлена на рисунке 24, частотные характеристики разомкнутой и замкнутой системы на рисунке 25.

Правильность построения переходной характеристики можно осуществить по следующим формулам:

Время максимума расчетное: $t_{\max} = 6,3 \cdot T_{\mu} = 6,3 \cdot 1 = 6,3$ с.

По графику это время составило $t_{\max} = 6,26$ с.

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1,04 - 1}{1} \cdot 100\% = 4\%$$
, что соответствует перерегули-

рованию при настройке на модульный оптимум $\sigma = 4,32\%$.

Время переходного процесса расчетное: $t_{\text{пп}} = 8,4 \cdot T_{\mu} = 8,4 \cdot 1 = 8,4$ с, а по графику время составило $t_{\text{пп}} = 8,43$ с.

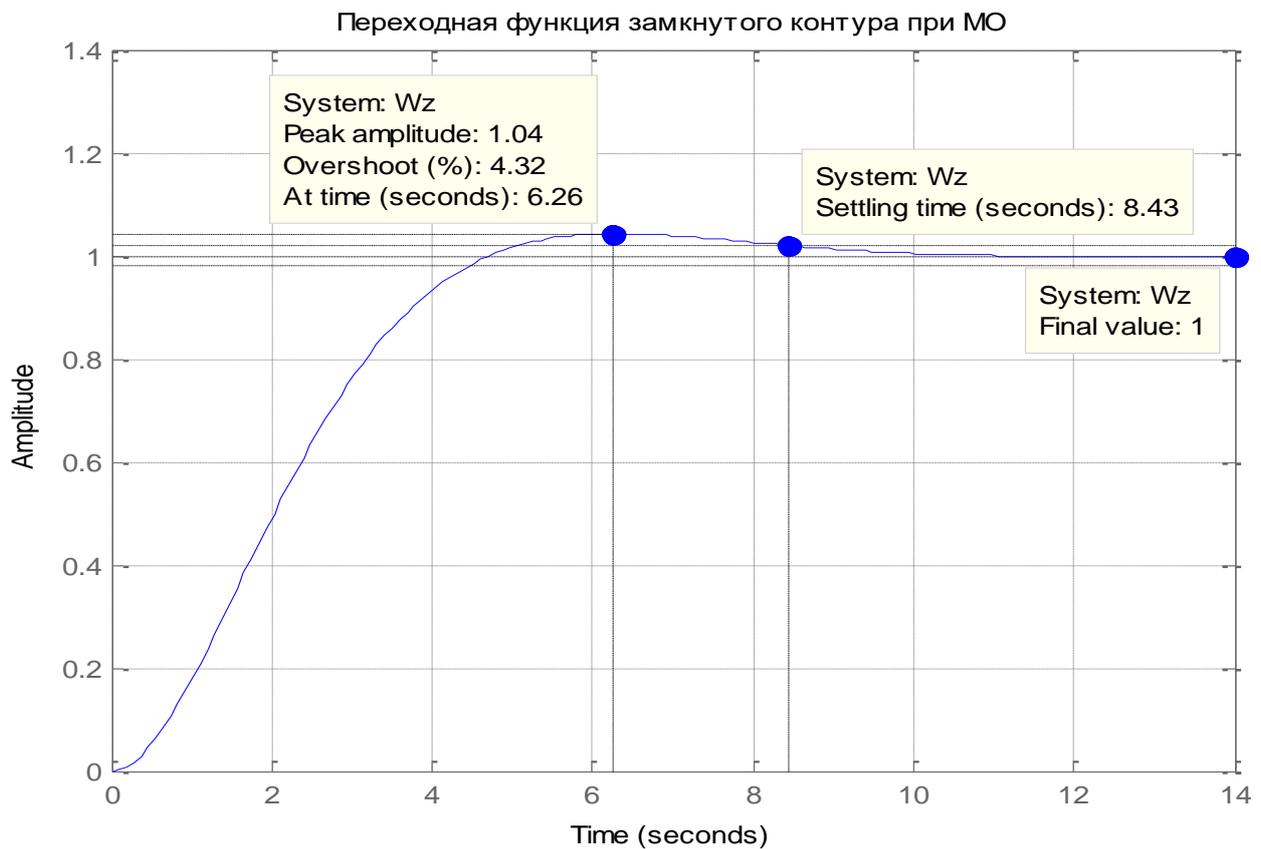


Рисунок 24 - Переходная функция замкнутой системы

Правильность построения частотных характеристик, представленных на рис. 20 можно осуществить по следующим формулам:

$$\text{Частота среза расчетная: } \omega_{\text{cp}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 1} = 0,5 \text{ рад/с.}$$

Частота среза по графику: $\omega_{\text{cp}} \approx 0,455 \text{ рад/с}$, что свидетельствует о правильности построения частотных характеристик.

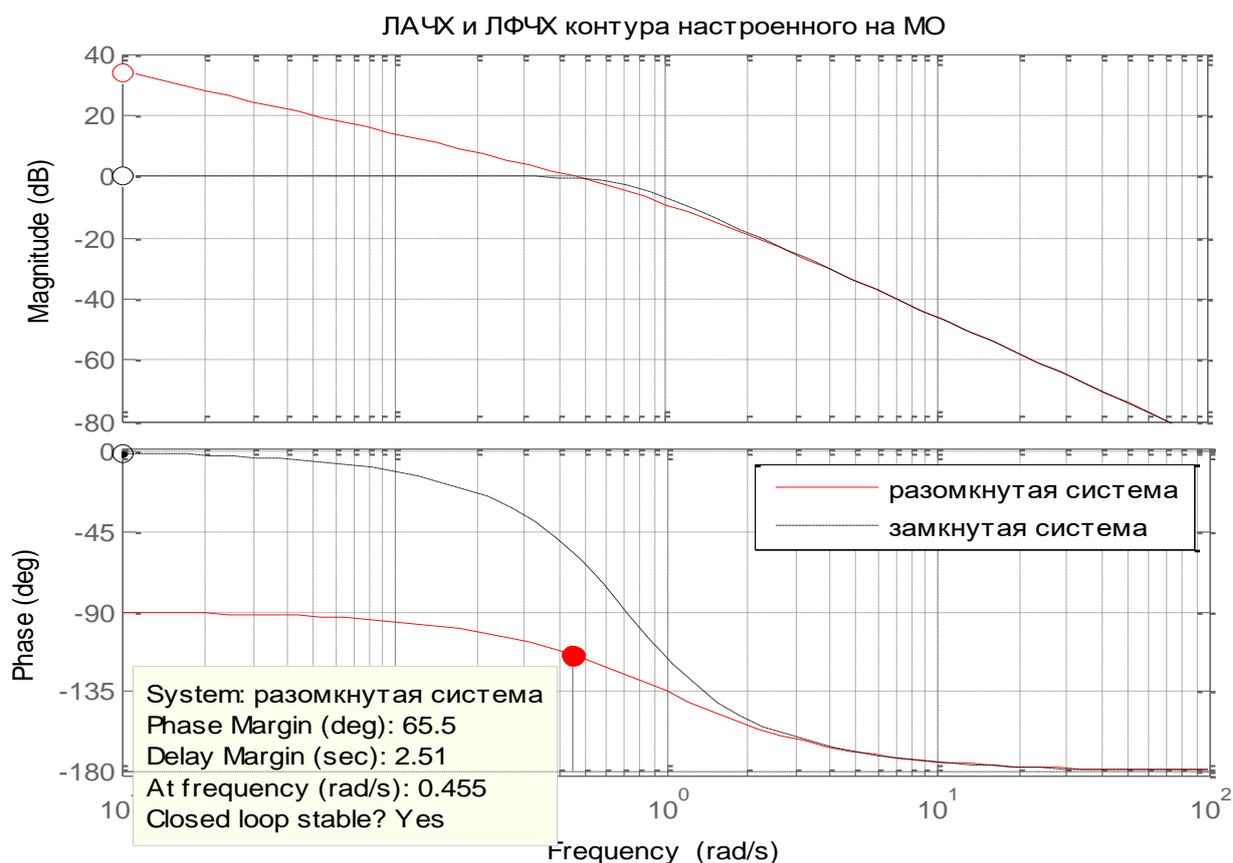


Рисунок 25 - ЛАЧ и ЛФЧ к задаче 10

Задача 11

Составьте программу для построения переходных и частотных характеристик контура регулирования, настроенного на симметричный оптимум без фильтра на входе и с фильтром, при величине некомпенсируемой постоянной времени $T=1$ с.

Решение:

Передаточная функция разомкнутой системы, настроенной на симметричный оптимум при отсутствии фильтра на входе имеет вид:

$$W(s)_{\text{раз}} = \frac{(4 \cdot T_{\mu c} \cdot s + 1)}{8 \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2 (T_{\mu} \cdot s + 1)} = \frac{(4 \cdot T_{\mu c} \cdot s + 1)}{8 \cdot T_{\mu}^3 \cdot s^3 + 8 \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2}, \quad (11)$$

где $a=8$ – коэффициент настройки.

Замкнутый контур, настроенный на симметричный оптимум, имеет передаточную функцию третьего порядка:

$$W(s)_{\text{замк}} = \frac{4 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}{8 \cdot T_{\mu}^3 \cdot s^3 + 8 \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2 + 4 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}. \quad (12)$$

Передаточная функция замкнутого контура, настроенного на симметричный оптимум с фильтром на входе имеет вид:

$$W(s)_{\text{замк.ф}} = \frac{1}{8 \cdot T_{\mu}^3 \cdot s^3 + 8 \cdot T_{\mu}^2 \cdot s^2 + 4 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}. \quad (13)$$

Программа построение переходных и частотных характеристик по выше-приведенным формулам написана в MATLABe.

Программа построение характеристик имеет вид:

```
clear
clc
% Ввод некомпенсируемой постоянной времени
Tm=1;
% Передаточная функция замкнутого контура
% при настройке на симметричный оптимум без фильтра
disp('Передаточная функция замкнутого контура СО без
фильтра')
W=tf([4*Tm 1],[8*Tm^3 8*Tm^2 4*Tm 1])
% Команда разбиения окна Figure в виде матрицы 2x2
% Расположение графика под номером 1
subplot(2, 2, 1)
% Команда построения графика переходной функции
step (W)
% Команда включения сетки
grid on
% Название графика
title('Переходной процесс КР без фильтра')
% Передаточная функция замкнутого контура
% при настройке на симметричный оптимум с фильтром
disp('Передаточная функция замкнутого контура СО с
фильтром')
Wf=tf([1],[8*Tm^3 8*Tm^2 4*Tm 1])
% Расположение графика под номером 2 матрицы 2x2
subplot(2, 2, 2)
```

```

% Команда построения графика переходной функции
step (Wf)
% Команда включения сетки
grid on
% Название графика
title('Переходной процесс КР с фильтром')
% Передаточная функция разомкнутого контура
% при настройке на симметричный оптимум без фильтра
disp('Передаточная функция разомкнутого контура при
СО')
Wr=tf([4*Tm 1],[8*Tm^3 8*Tm^2 0 0])
% Расположение графика под номером 3 матрицы 2x2
subplot(2, 2, 3)
% Команда построения графика переходной функции
bode (Wr)
% Команда включения сетки
grid on
% Название графика
title('ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура')
% Передаточная функция замкнутого контура
% при настройке на симметричный оптимум с фильтром
Wf1=tf([1],[4*Tm 1]);
disp('Передаточная функция замкнутого контура при
СО')
Wq=W*Wf1
% Расположение графика под номером 4 матрицы 2x2
subplot(2, 2, 4)
% Команда построения графика переходной функции
bode (Wq)
% Команда включения сетки
grid on
% Название графика
title('ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого контура')

```

Программа работает следующим образом:

Передаточная функция замкнутого контура СО без фильтра

W =

$$4s + 1$$

$$8s^3 + 8s^2 + 4s + 1$$

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция замкнутого контура СО с фильтром

Wf =

$$1$$

$$8s^3 + 8s^2 + 4s + 1$$

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция разомкнутого контура при СО

Wr =

$$4s + 1$$

$$8s^3 + 8s^2$$

Continuous-time transfer function.

Передаточная функция замкнутого контура при СО

Wq =

$$4s + 1$$

$$32s^4 + 40s^3 + 24s^2 + 8s + 1$$

Continuous-time transfer function.

Таблица 1 – Параметры переходного процесс для контура настроенного на симметричный оптимум без входного фильтра на входе

Наименование параметра	расчет	график
Время первого максимума	$t_{\max 1} = 5,8 \cdot T_{\mu} = 5,8 \text{ с}$	5,71 с
Перегулирование	$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1,43 - 1}{1} \cdot 100\% = 43,4\%$	43,4
Время переходного процесса	$t_{\text{пп}} = 16,5 \cdot T_{\mu} = 16,5 \cdot 1 = 16,5 \text{ с}$	16,6

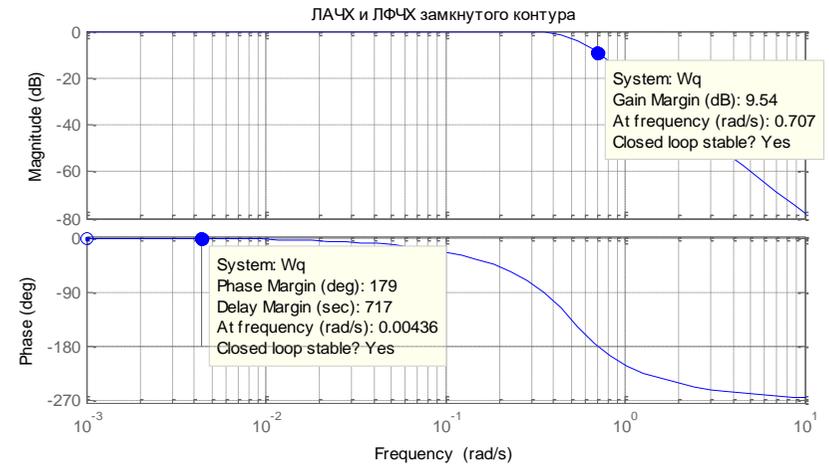
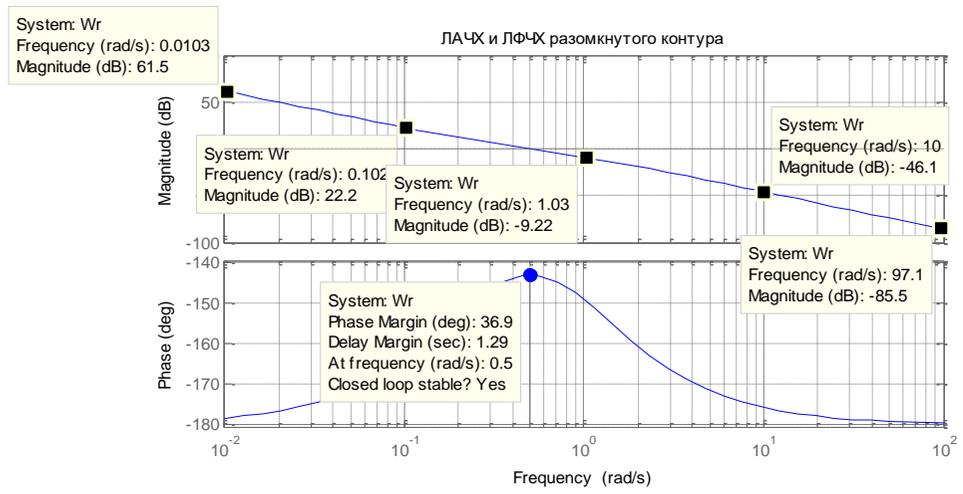
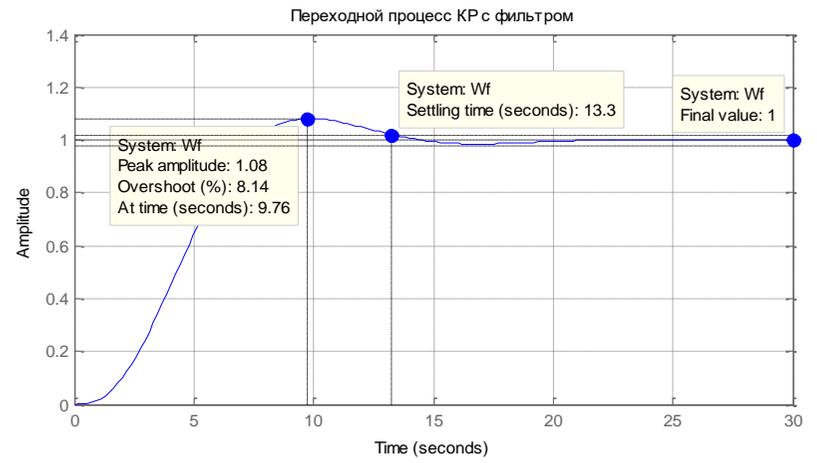
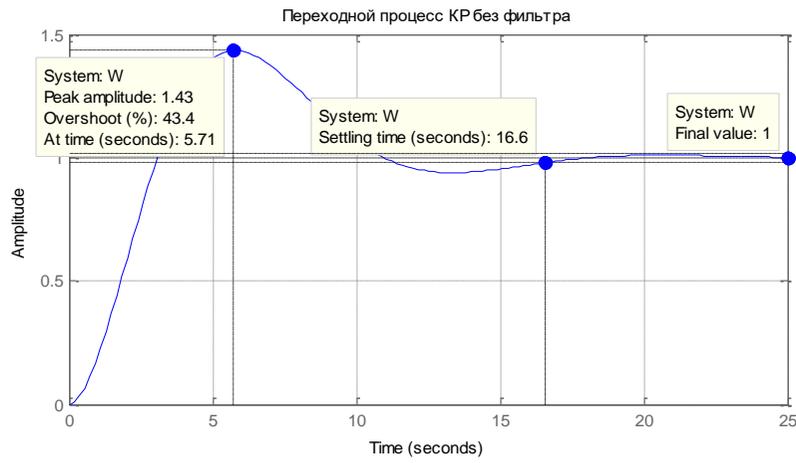


Рисунок 26 - Характеристики к задаче

Таблица 2 – Параметры переходного процесс для контура настроенного на симметричный оптимум с фильтром на входе

Наименование параметра	расчет	график
Время первого максимума	$t_{\max}=10,2 \cdot T_{\mu}=10,2 \text{ с}$	9,76 с
Перегуливание	$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{уст}}}{\omega_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1,08 - 1}{1} \cdot 100\% = 8,14$	8,14
Время переходного процесса	$t_{\text{пп}}=13,3 \cdot T_{\mu}=13,3 \text{ с}$	13,3

Правильность построения частотных характеристик можно оценить по наклону разомкнутой ЛАЧХ, который составляет в низкочастотной части $22,2 - 61,5 \approx -40 \text{ дБ/дек}$, в высокочастотной части $85,5 - 46,1 \approx -40 \text{ дБ/дек}$, среднечастотной части $-9,22 - 22,2 \approx -31,42 \text{ дБ/дек}$. На участке ЛАЧХ от 10^{-1} до 10^0 расположена частота сопряжения, при которой изменяется наклон ЛАЧХ с частоты -40 дБ/дек на -20 дБ/дек .

$$\text{Частота среза составляет: } \omega_{\text{ср}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 1} = 0,5 \text{ рад/с.}$$

Расчетные параметры соответствуют параметрам на рисунке, соответственно программа составлена правильно.

Задача 12

Для структурной схемы, изображенной на рисунке 28 с отрицательной обратной связью и П-регулятором построить переходную функцию и частотные характеристики.

Параметры схемы: коэффициент усиления П-регулятор $K_{\text{pc}}=50$; коэффициент усиления преобразователя $K_{\text{тп}}=22$, сопротивления якорной цепи $R_{\text{яц}}=4 \text{ Ом}$, электромагнитная постоянная времени $T_{\text{я}}=0,08 \text{ с}$, коэффициент, связывающий ЭДС и скорость $k \cdot \phi=2 \text{ В} \cdot \text{с}$, момент инерции $J=1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, коэффициент обратной связи $k_{\text{oc}}=0,08 \text{ В} \cdot \text{с}$.

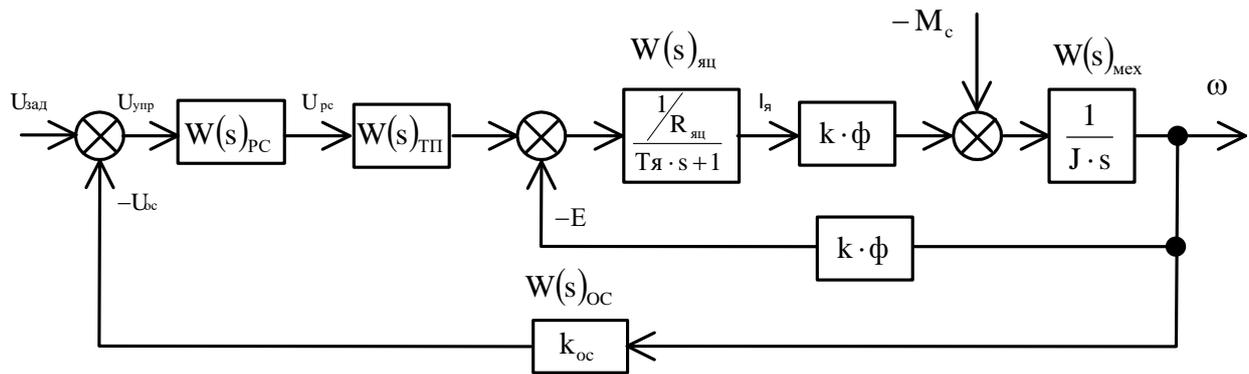


Рисунок 27 – Структурная схема

Решение:

В предложенной схеме реализовано автоматическое регулирование выходной координаты по отклонению от заданного значения. В системе имеется пропорциональный регулятор, на вход которого подается разность сигналов задания и сигнала обратной связи, снимаемого с датчика обратной связи.

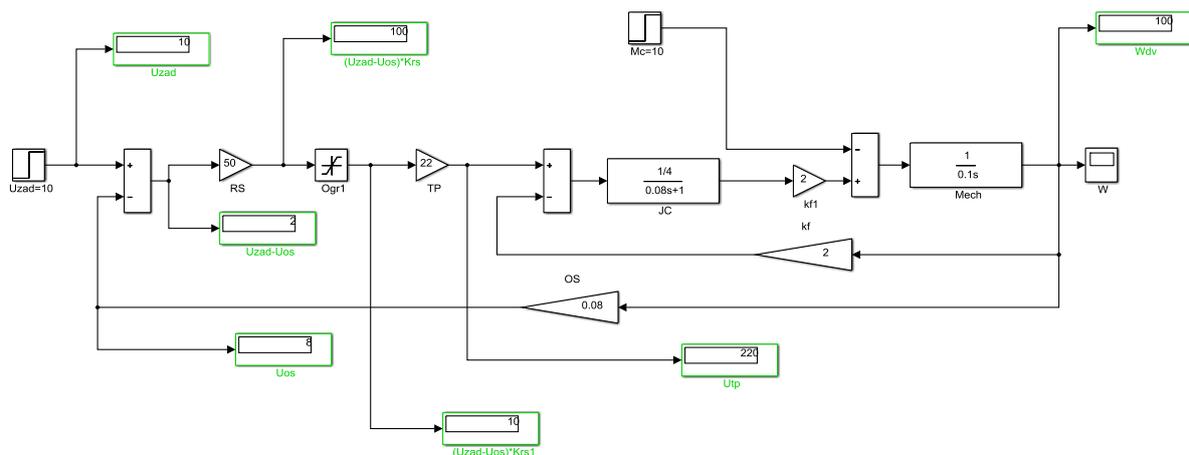


Рисунок 28 - Схема системы с ООС и П-регулятором

Переходной процесс в систему при воздействии задающего сигнала через 1 с и возмущающего сигнала через 5 с представлена на рисунке 29.

График переходного процесс показан при воздействии задающего сигнала имеет колебательный характер и содержит одно колебание. Аналогично при приложении возмущающего воздействия в системе имеется одно колебание.

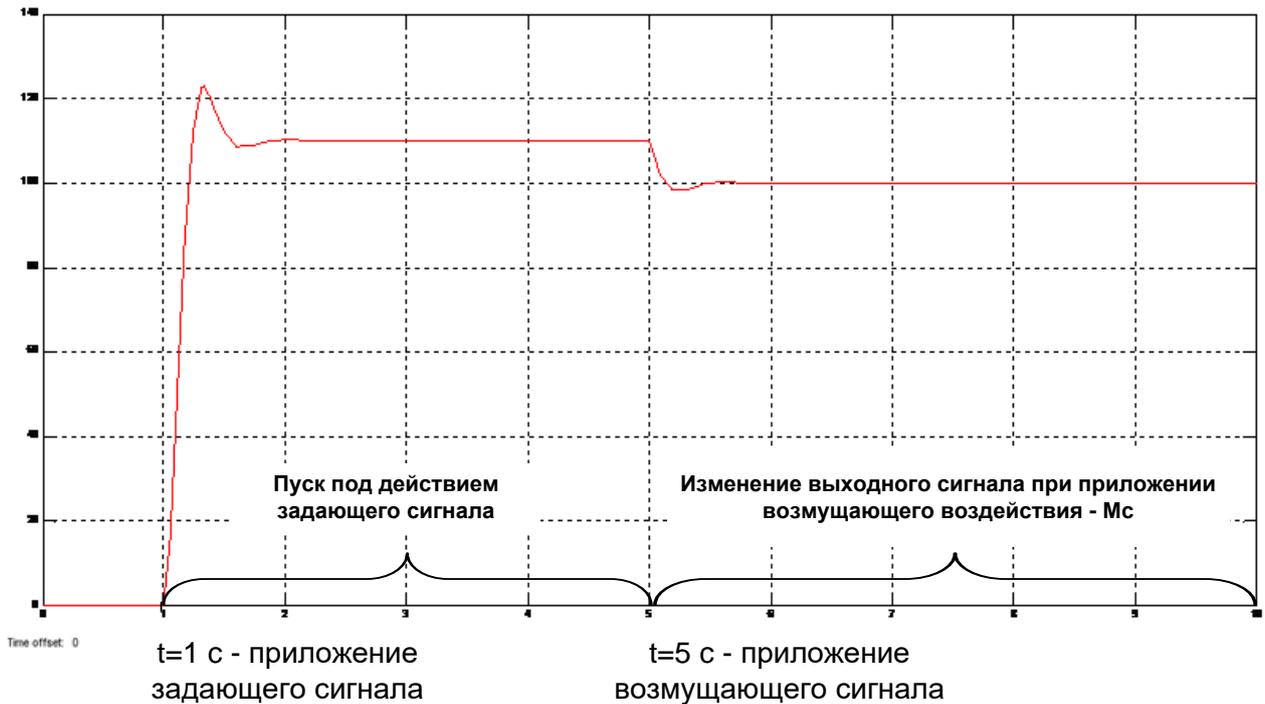


Рисунок 29 – Переходной процесс при приложении нагрузки

Схема описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_d = (U_{\text{зад}} - K_{\text{oc}} \cdot \omega) \cdot K_{\text{PC}} \cdot K_{\text{ТП}} \\ U_d = E + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{яц}} + L_{\text{яц}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} \\ E = k \cdot \Phi \cdot \omega \\ M = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (14)$$

Упрощение схемы, изображенной на рисунке 28 выполним преобразовав схему двигателя постоянного тока к виду, представленному на рисунке 30.

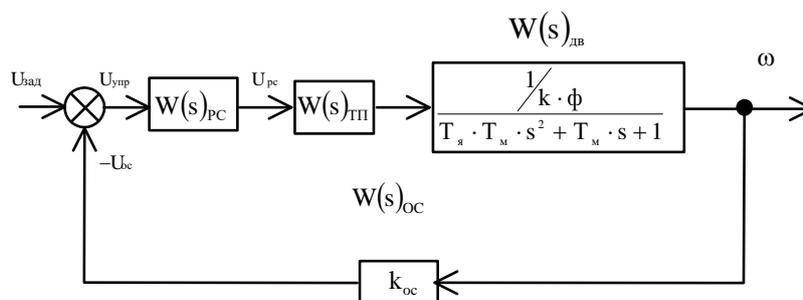


Рисунок 30 – Преобразованная структурная схема к задаче 12

Для преобразования передаточной функции двигателя используется формула:

$$W(s)_{\text{зам}} = \frac{W(s)_{\text{пр}}}{1 + W(s)_{\text{пр}} \cdot W(s)_{\text{oc}}}, \quad (15)$$

где $W(s)_{\text{пр}}$ – передаточная функция прямой цепи;

$W(s)_{\text{oc}}$ – передаточная функция обратной цепи.

Передаточная функция по управляющему воздействию имеет вид:

$$W_{U_{\text{я}} \rightarrow \omega}(s) = \frac{\frac{1/R_{\text{я}}}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1)} \cdot k \cdot \phi \cdot \frac{1}{J \cdot s}}{1 + \frac{1/R_{\text{я}}}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1)} \cdot (k \cdot \phi)^2 \cdot \frac{1}{J \cdot s}} = \frac{\frac{1/R_{\text{я}}}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1)} \cdot k \cdot \phi \cdot \frac{1}{J \cdot s} \cdot \frac{k \cdot \phi}{k \cdot \phi}}{1 + \frac{1/R_{\text{я}}}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1)} \cdot (k \cdot \phi)^2 \cdot \frac{1}{J \cdot s}}$$

Введем обозначение электромеханической постоянной времени, согласно формулы:

$$T_{\text{м}} = \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{(k \cdot \phi)^2}. \quad (16)$$

Выполнив преобразования получим

$$W_{U_{\text{я}} \rightarrow \omega}(s) = \frac{\frac{1}{k \cdot \phi} \cdot \frac{1}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1) \cdot T_{\text{м}} \cdot s}}{1 + \frac{1}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1) \cdot T_{\text{м}} \cdot s}}$$

Окончательно передаточная функция двигателя будет иметь вид:

$$W(p)_{\text{Дв}} = \frac{\frac{1}{k \cdot \phi}}{(T_{\text{я}} \cdot s + 1) \cdot T_{\text{м}} \cdot s + 1} = \frac{\frac{1}{k \cdot \phi}}{T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}} \cdot s^2 + T_{\text{м}} \cdot s + 1}. \quad (17)$$

Численное значение электромеханической постоянной времени равно:

$$T_{\text{м}} = \frac{0,1 \cdot 4}{(2)^2} = 0,1 \text{ с},$$

а передаточная функция двигателя в численной форме будет иметь вид:

$$W(s)_{Dv} = \frac{1/2}{0,08 \cdot 0,1 \cdot s^2 + 0,1 \cdot s + 1}.$$

Схема в числовом формате представлена на рисунке 31

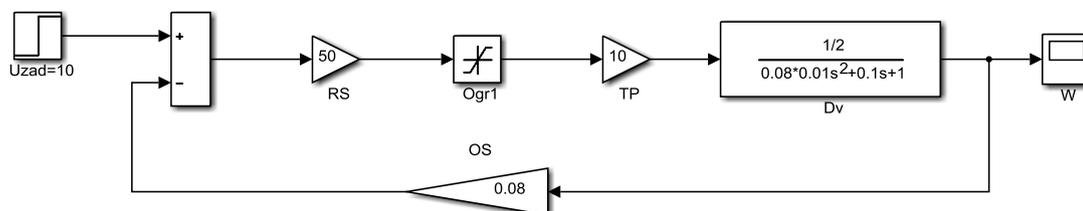


Рисунок 31 – Упрощенная структурная схема в числовом виде к задаче 12

Коэффициент усиления замкнутой системы определяется по формуле (15):

$$K_{KPC_3} = \frac{50 \cdot 22 \cdot \frac{1}{2}}{1 + 50 \cdot 22 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,08} = 12,22.$$

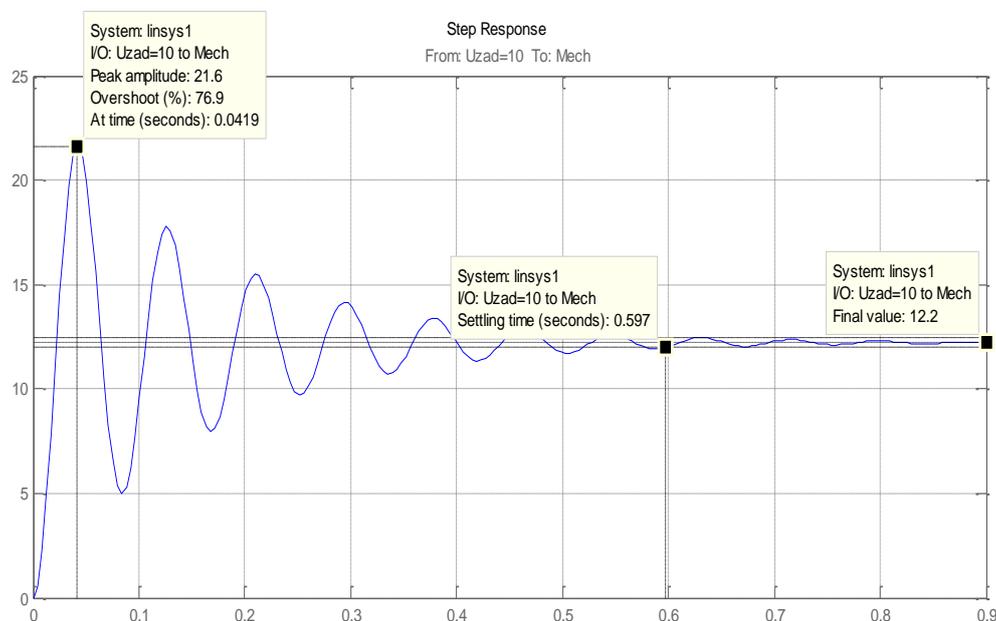


Рисунок 32 – Переходная функция к задаче 12

Коэффициент усиления замкнутой системы по графику $K_{KPC_3} = 12,2$.

Равенство значений расчетов по формуле (15) и значений с графика переходной функции говорит о верности расчетов.

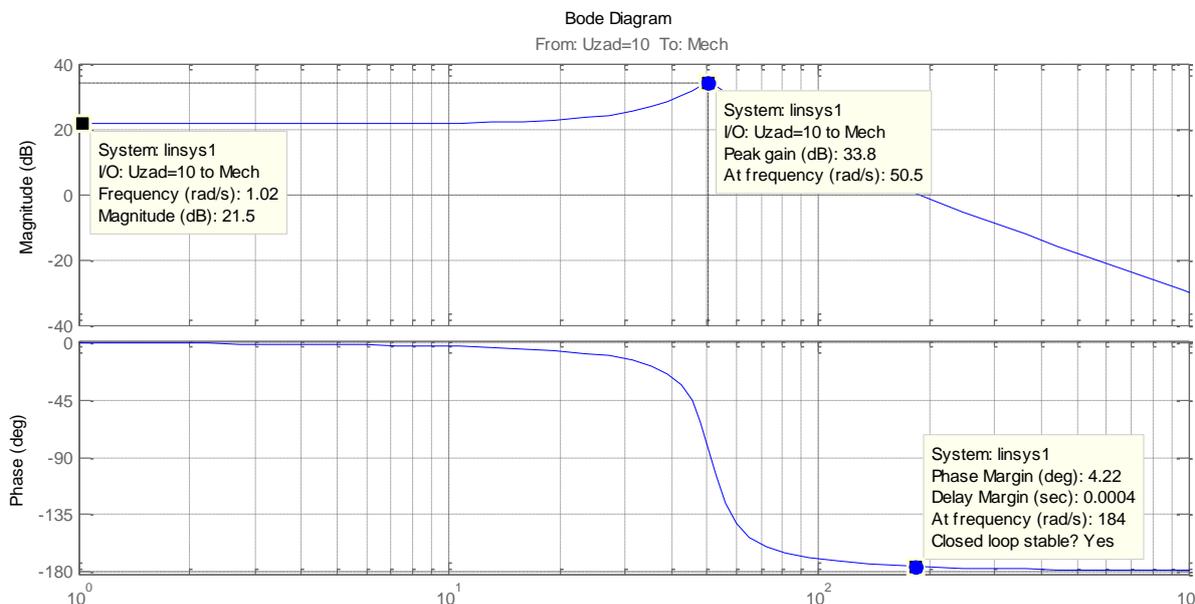


Рисунок 33 – ЛАЧХ, ЛФЧХ замкнутой системы к задаче 12

Колебательность может определяться по ЛАЧХ замкнутой системы по показателю: $M = \frac{L_{\text{макс}}}{L(0)}$. Чем больше значение M , тем больше колебательность.

При $M < 1$ динамическая характеристика неколебательна. При $M \rightarrow \infty$ колебательность системы возрастает до получения незатухающих колебаний. Оптимальным считается значение $M = 1,1 \div 1,5$.

В данной задаче колебательность системы равна: $M = \frac{33,8}{21,5} = 1,57$. Расчет

колебательности системы по ЛАЧХ замкнутой системы показывает, что система не является оптимальной, а наличия большого числа колебаний на рисунке 32 это только подтверждают.

Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы воспользуемся схемой, изображенной на рисунке 34. Сами частотные характеристики изображены на рисунке 35.

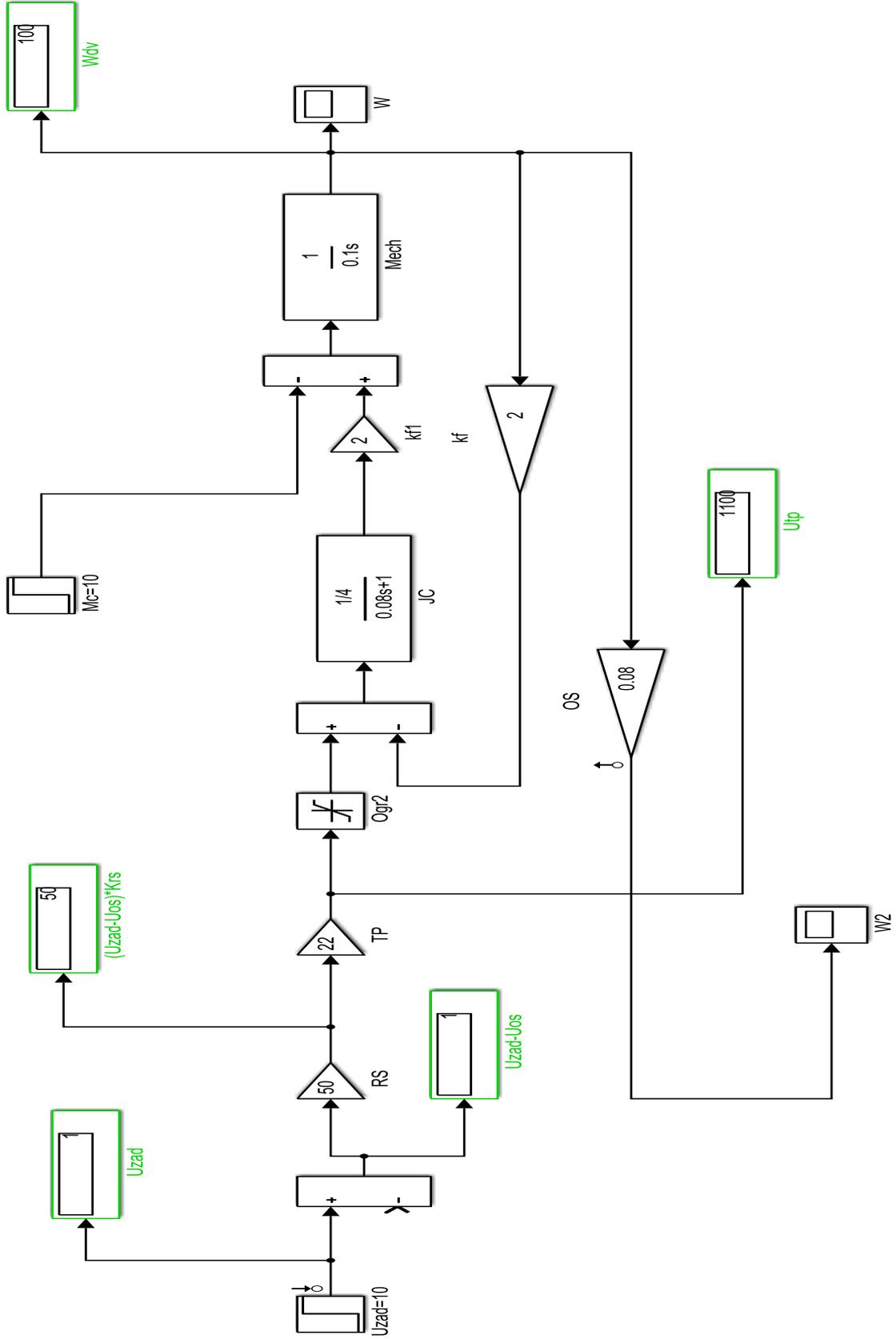


Рисунок 34 – Схема разомкнутой системы к задаче 12

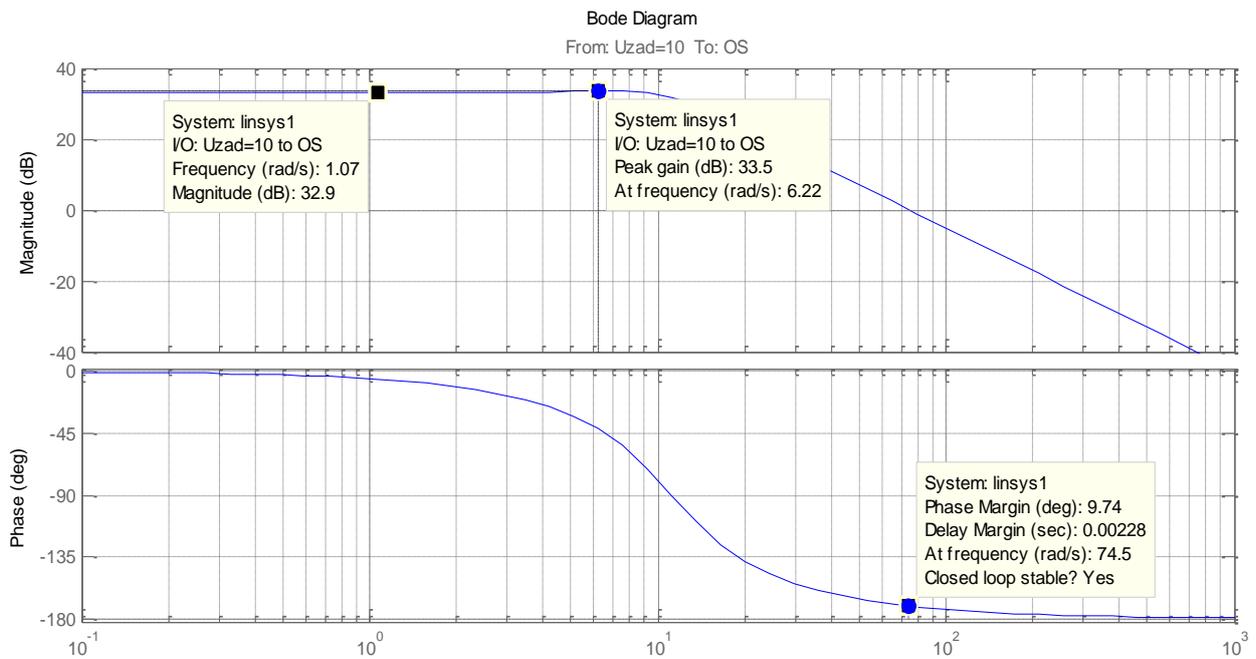


Рисунок 35 – ЛАЧХ, ЛФЧХ разомкнутой системы к задаче 12

По ЛАЧХ разомкнутой системы можно определить коэффициент усиления контура регулирования скорости по соотношению:

$$K_{\text{КРС}} = K_{\text{РС}} \cdot K_{\text{ТП}} \cdot K_{\text{ОС}} \cdot \frac{1}{k \cdot \phi}. \quad (18)$$

Численное значение коэффициента усиления:

$$K_{\text{КРС}} = 50 \cdot 22 \cdot 0,08 \cdot \frac{1}{2} = 44,00$$

Соответствует значению амплитуды при $\omega = 10^0 = 1$ рад/с и равно значению на графике (рисунок 35) : $L(\omega) = 20 \cdot \lg K_{\text{КРС}} = 20 \cdot \lg 44 = 32,869$ дБ .

ГЛОССАРИЙ

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) - зависимость амплитуд выходных и входных колебаний от частоты называется *амплитудно-частотной характеристикой системы*

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) – определяется как годограф комплексного аргумента, построенный на комплексной плоскости при изменении частоты от нуля до бесконечности.

Астатизм – свойство системы автоматического управления устранять ошибку при постоянном внешнем воздействии.

Запас устойчивости системы по модулю - расстояние между точной пересечения амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы с отрицательной вещественной полуосью до точки $(-1, j0)$.

Запас устойчивости системы по фазе - угол, образованный вещественной отрицательной полуосью и лучом, проведенным из начала координат через точку пересечения амплитудно-фазовой характеристики с окружностью единичного радиуса, имеющей центр в начале координат.

Коэффициент усиления – это отношение выходной координаты к входной в установившемся режиме.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) - зависимость модуля коэффициента усиления от частоты в логарифмическом масштабе.

Обратная связь – это канал информации по которому передается в обратном направлении по сравнению с управляющим воздействием.

Отрицательная обратная связь – это вид обратной связи, при котором изменение выходного сигнала передается на вход с целью компенсации.

Разомкнутая система - система содержащая только прямой канал передачи сигналов от устройства управления к объекту управления.

Система автоматического управления (САУ) – комплекс устройств, обеспечивающих автоматическое изменение координат объекта управления с целью установления желаемой динамики.

Статизм – это установившаяся ошибка, отклонение.

Точность систем автоматического управления – это степень приближения реального управляемого процесса к требуемому.

Фазо-частотная характеристика системы - зависимость разности фаз выходных и входных колебаний от частоты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ким, Д. П. Теория автоматического управления [Текст] : учебник и практикум для академического бакалавриата: учебник / Д. П. Ким; Моск. гос. ун-т информ. технологий, радиотехники и электроники. - Москва : Юрайт, 2016. - 276 с. - ISBN 978-5-9916-5406-7
2. Ким, Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Линейные системы : учебное пособие / Д. П. Ким, Н. Д. Дмитриева. - Москва : Физматлит, 2007. - 168 с. - URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=69282>
3. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 5-е изд., испр. и доп. - Санкт-Петербург : Лань, 2019. - 464 с. - ISBN 978-5-8114-4200-3
4. Кузьмин, А. В. Теория систем автоматического управления [Текст] : учеб. для вузов / А. В. Кузьмин, А. Г. Схиртладзе. - Старый Оскол : ТНТ, 2009. - 224 с. - ISBN 978-5-94178-189-8
5. Цветкова, О.Л. Теория автоматического управления : учебник / О. Л. Цветкова. - Москва; Берлин : Директ-Медиа, 2016. - 207 с. - URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=443415>

МАЖИРИНА РАИСА ЕВГЕНЬЕВНА

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Практикум для направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Подписано в печать 16.12.2020 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 205	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,25

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл.. г. Новотроицк. ул. Фрунзе, 8

E-mail: nf@misis.ru

Контактный тел.: 8(3537)679729