

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Анализ САУ с помощью ЭВМ и программного обеспечения MATLAB/Simulink.....	3
Цель работы.....	3
Программа работы.....	3
Ход работы.....	3
1. Построение временных характеристик САУ с помощью пакета Control System.....	3
2. Построение временных характеристик.....	3
3. Сборка модели системы в Simulink и построение ее переходной характеристики.....	5
4. Построение частотных характеристик САУ.....	6
5. Преобразование модели Simulink в модель Control System MATLAB.....	7
Выводы.....	9
Лабораторная работа №2. Исследование устойчивости линейных САУ.....	9
Цель работы.....	9
Программа работы.....	9
Ход работы.....	9
1. Реализация системы.....	9
2. Проверка устойчивости системы по критерию Гурвица.....	10
3. Определение устойчивости системы по корням характеристического уравнения.....	11
4. Определение назначения функций ltview и margin. Получение с их помощью информации о переходной характеристике и запасе устойчивости системы.....	12
6. Проверка системы на устойчивость по критерию Михайлова.....	12
7. Проверка системы на устойчивость согласно критерию Найквиста.....	14
Выводы.....	15
Лабораторная работа №3. Исследование многоконтурной системы автоматического регулирования.....	15
Цель работы.....	15
Программа работы.....	15
Ход работы.....	16
1. Реализация модели «жесткого» спутника Земли в Simulink.....	16
2. Охват модели ЖСЗ обратной связью по положению.....	16
3. Охват модели ЖСЗ обратной связью по скорости и по положению.....	17
4. Оценка влияния изменения коэффициента обратной связи по скорости на переходную характеристику системы.....	19
5. Определение коэффициентов обратных связей САУ при известном времени окончания переходного процесса.....	20
6. Система с чистым запаздыванием. Оценка динамических свойств системы с различными временами задержки.....	21
Выводы.....	21

Лабораторная работа №1. Анализ САУ с помощью ЭВМ и программного обеспечения MATLAB/Simulink

Цель работы

Воспользовавшись математическим программным обеспечением MATLAB и пакетом Simulink, исследовать систему автоматического управления (САУ).

Программа работы

1. Построить временные характеристики САУ с помощью пакета Control System.

- Задать описание системы, имеющую передаточную функцию вида:

$$W(p) = \frac{K_1}{1 + T_1 p} \quad (1)$$

с помощью функции *tf*, если $K_1 = 2$; $T_1 = 0,56 \text{ с}$.

- Задать описание системы (1) в виде нулей, полюсов и коэффициента передачи с помощью функции *zpk*.
 - Задать описание системы (1) в пространстве состояний с помощью функции *ss*.
2. Построить временные характеристики:
- переходную – с помощью функции *step*;
 - импульсную (весовую) – с помощью функции *impulse*.
3. Собрать модель системы в Simulink и определить переходную характеристику САУ.
4. Построить частотные характеристики САУ с помощью пакета Control System, используя функции *bode* и *nyquist*.
5. Преобразование модели Simulink в модель Control System MATLAB.
- Создать структурную схему в Simulink.
 - Извлечь информацию из модели с помощью функции *linmod*.
 - Преобразовать матрицу состояния в модель Control System.

Ход работы

1. Построение временных характеристик САУ с помощью пакета Control System

На рисунке 1. представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображено определение коэффициента передачи системы $K1$ и постоянной времени $T1$ и задание специальной переменной *sys*, содержащей описание системы (1), при помощи функции *tf*.

На рисунке 2. представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс задания описания системы (1) в виде нулей, полюсов и коэффициента передачи при помощи функции *zpk*.

На рисунке 3 представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс задания описания системы (1) в пространстве состояний при помощи функции *ss*. Результатом является специальная переменная описания системы *sys* и матрицы состояний a , b , c , d .

2. Построение временных характеристик

На рисунке 4 изображен график переходной характеристики системы (1), построенный при наличии специальной переменной описания системы *sys* и функции *step*.

На рисунке 5 изображен график весовой функции системы (1), построенный при наличии специальной переменной описания системы *sys* и функции *impulse*.

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> k1=2
k1 =
    2
>> T1=0.56
T1 =
    0.5600
>> sys=tf([k1],[T1 1])
Transfer function:
    2
-----
0.56 s + 1
>>
```

Рисунок 1. Определение САУ при помощи функции *tf*.

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> sys=zpk([], [-1/T1], k1/T1)
Zero/pole/gain:
    3.5714
-----
(s+1.786)
>>
```

Рисунок 2. Определение САУ при помощи функции *zpk*.

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> sys=ss([-1/T1],[k1],[1/T1],[0])
a =
      x1
    x1 -1.786
b =
      u1
    x1  2
c =
      x1
    y1  1.786
d =
      u1
    y1  0
Continuous-time model.
>>
```

Рисунок 3. Определение САУ в пространстве состояний с помощью функции *ss*.

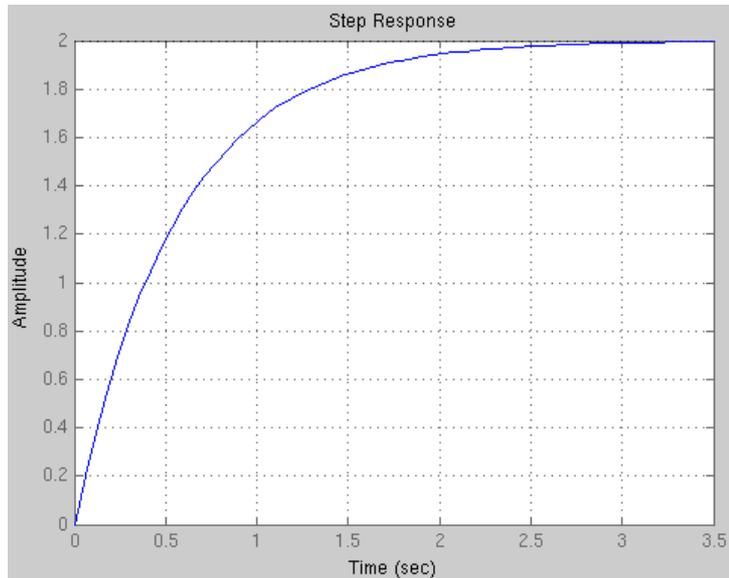


Рисунок 4. График переходной характеристики САУ.

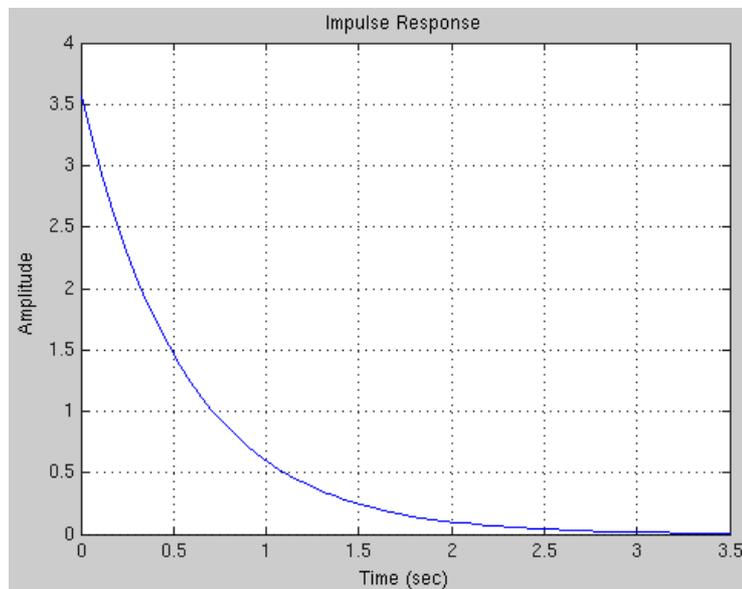


Рисунок 5. График весовой функции САУ.

3. Сборка модели системы в Simulink и построение ее переходной характеристики

На рисунке 6 изображена модельная структура системы (1) для пакета Simulink. На рисунке 7 представлен график переходной функции системы (1), как результат отображения блока *Scope* на интервале 10 с.

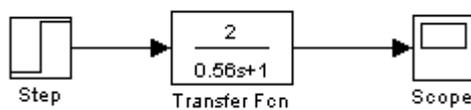


Рисунок 6. Модель САУ в Simulink.

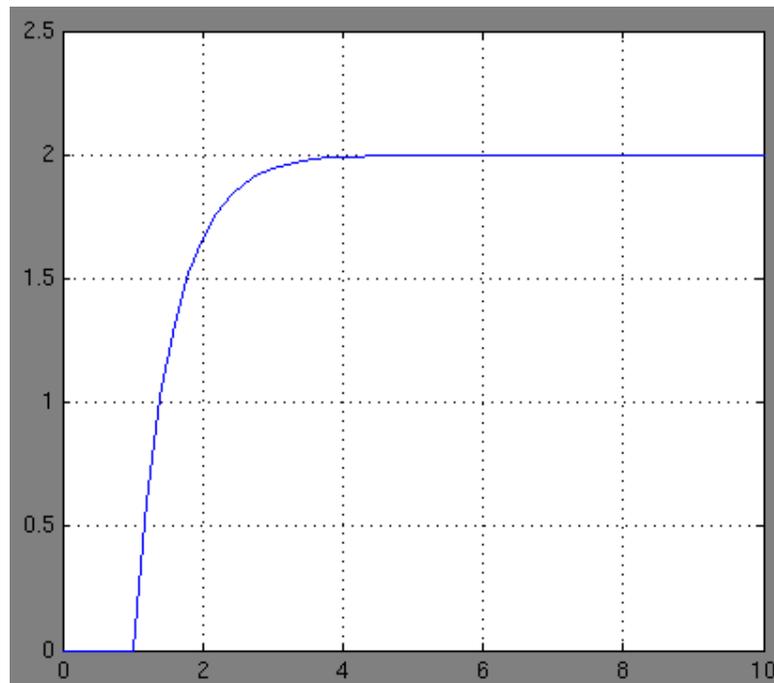


Рисунок 7. Переходная характеристика САУ, моделированной в Simulink.

4. Построение частотных характеристик САУ

На рисунке 8 изображены графические зависимости амплитуды децибелах и фазы в градусах входного сигнала от частоты в логарифмическом масштабе (диаграммы Боде) для заданной САУ. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы построены при помощи функции *bode*.

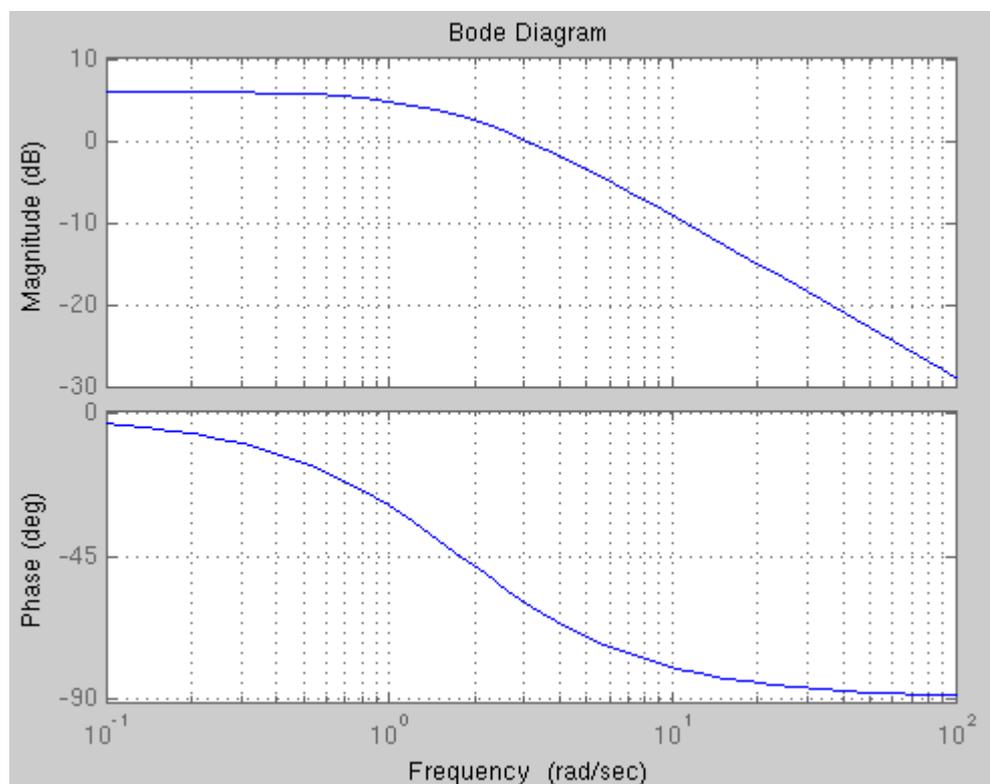


Рисунок 8. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы.

На рисунке 9 изображен график амплитудно-фазовой характеристики (годограф Найквиста) заданной САУ, построенный при помощи функции *nyquist*.

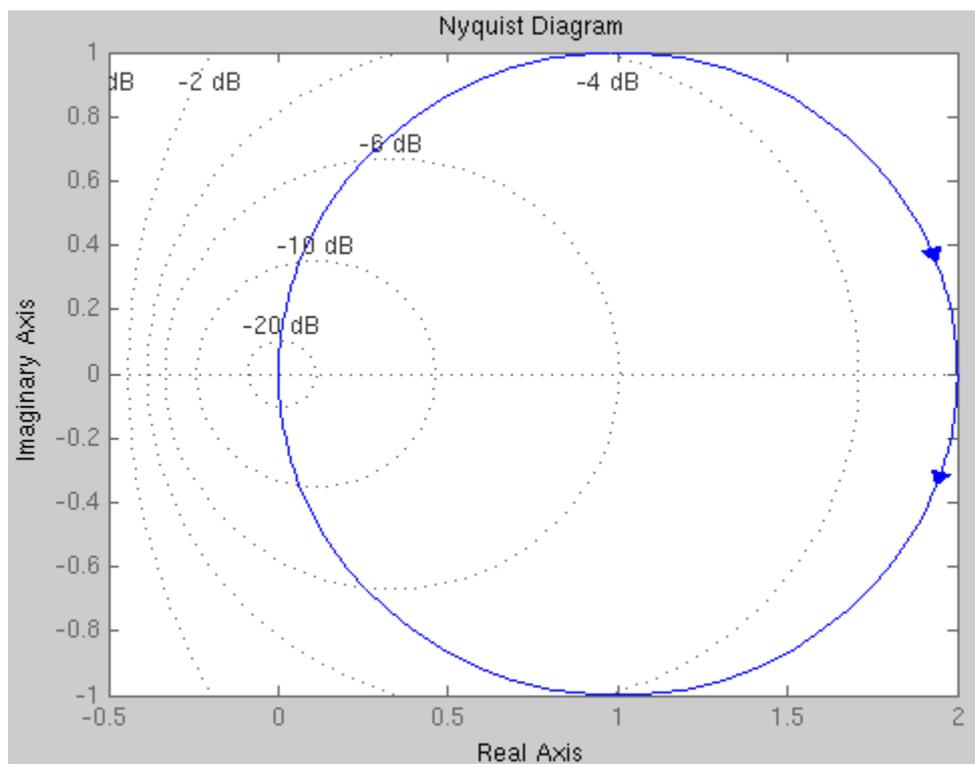


Рисунок 9. Годограф Найквиста для заданной САУ.

5. Преобразование модели Simulink в модель Control System MATLAB

На рисунке 10. изображен структура системы в среде Simulink, предназначенная для извлечения из нее матриц состояния для манипуляций с САУ в Control System MATLAB.

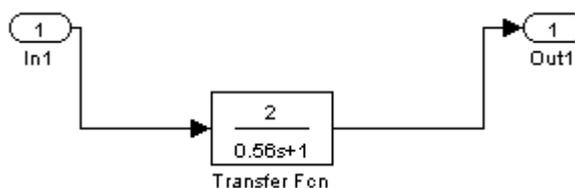


Рисунок 10. САУ в среде Simulink, заданная в виде передаточной функции.

На рисунке 11 представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс извлечения матриц состояния системы при помощи функции *linmod*.

На рисунке 12. представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс получения переменной описания системы в пространстве состояний при помощи функции *sys*.

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [A,B,C,D]=linmod('job1_conv')
Warning: Using a default value of 0.2 for maximum step size. The simulation
step size will be equal to or less than this value. You can disable this
diagnostic by setting 'Automatic solver parameter selection' diagnostic to
'none' in the Diagnostics page of the configuration parameters dialog.
> In dlinmod at 172
   In linmod at 60

A =

    -1.7857

B =

     1

C =

    3.5714

D =

     0

>> |
```

Рисунок 11. Извлечение матриц состояния из САУ, представленной Simulink-моделью; job_conv.mdl – файл модели.

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> sys=ss(A,B,C,D)

a =

      x1
x1  -1.786

b =

      u1
x1   1

c =

      x1
y1  3.571

d =

      u1
y1   0

Continuous-time model.
>> |
```

Рисунок 11. Определение САУ в пространстве состояний после трансформации из Simulink-модели.

Полученная после преобразования модель может применяться для исследования САУ и построения ее временных и частотных характеристик при помощи функций *step*, *impulse*, *bode*, *nyquist*.

Выводы

В работе ознакомились с основными функциональными средствами ПО MATLAB, пакета Control System и среды численного моделирования структур САУ – Simulink.

Выполненная работа показала эффективность использования среды универсального моделирования MATLAB для определения характеристик систем автоматического управления.

Как видно из п.п. 1, описание системы можно представлять различными способами, что характеризует гибкость применяемого программного обеспечения.

Как видно из п.п. 3 и 5, в сочетании с пакетом Simulink, программный комплекс MATLAB является мощным средством для высокоточного цифрового моделирования САУ.

Лабораторная работа №2. Исследование устойчивости линейных САУ

Цель работы

Исследовать замкнутую систему автоматического управления (ЗСАУ) при помощи критериев устойчивости Гурвица, Михайлова и Найквиста. Применить в работе ПО MATLAB.

Программа работы

1. Реализовать систему согласно следующим данным:

$$W1(s) = \frac{1}{1+T1s}; W2(s) = \frac{k0}{s(1+T0s)};$$
$$k0 = 10; k1 = 2; k2 = 1; T0 = 0,1; T1 = 0,56.$$

Структурная схема системы представлена на рисунке 1.

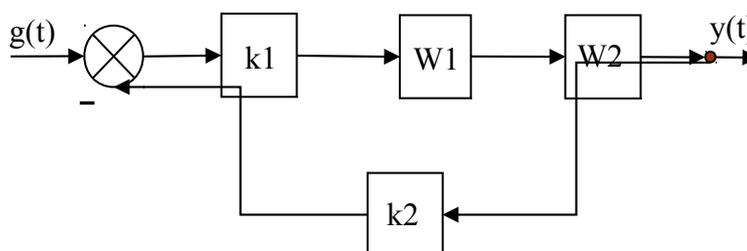


Рисунок 1. Структурная схема замкнутой САУ.

2. Проверить систему на устойчивость по алгебраическому критерию Гурвица. Сделать выводы.
3. Определить устойчивость системы по корням. Сделать выводы.
4. Изучить в MATLAB Help функции *ltview* и *margin* и с их помощью получить информацию о переходной характеристике и оценить запас устойчивости.
5. Проверить систему на устойчивость по частотному критерию Михайлова. Сделать выводы.
6. Проверить систему на устойчивость по частотному критерию Найквиста. Сделать выводы.

Ход работы

1. Реализация системы

Передаточные функции звеньев САУ, представленной на рисунке (1), а также разомкнутой и замкнутой систем запишем в общем виде:

$$W(s) = k_1 \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot k_2 = k_1 \cdot \frac{1}{1+T_1s} \cdot \frac{k_0}{s(1+T_0s)} \cdot k_2 = \frac{k_0 \cdot k_1 \cdot k_2}{s(T_0 \cdot T_1 \cdot s^2 + (T_0 + T_1)s + 1)};$$

$$\Phi(s) = \frac{k_1 \cdot W_1 \cdot W_2}{1 + k_1 \cdot k_2 \cdot W_1 \cdot W_2} = \frac{k_1 \cdot \frac{1}{1+T_1s} \cdot \frac{k_0}{s(1+T_0s)}}{1 + \frac{k_0 \cdot k_1 \cdot k_2}{s(1+T_0s)(1+T_1s)}} = \frac{k_0 k_1}{T_0 T_1 s^2 + (T_0 + T_1)s + s + k_0 k_1 k_2}.$$

На рисунке 2 представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс определения параметров САУ, а на рисунке 3 – представление ее в виде модели в пространстве состояний.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

>> k0=10;k1=2;k2=1;T0=0.1;T1=0.56;
>> W1=tf([1],[T1 1])

Transfer function:
      1
-----
0.56 s + 1

>> W2=tf([k0],[T0 1 0])

Transfer function:
      10
-----
0.1 s^2 + s

>> W=k1*W1*W2*k2

Transfer function:
      20
-----
0.056 s^3 + 0.66 s^2 + s

>> H=tf([k0*k1],[T0*T1 T0+T1 1 k0*k1*k2])

Transfer function:
      20
-----
0.056 s^3 + 0.66 s^2 + s + 20

>> |

```

Рисунок 2. Процесс получения передаточных функций САУ при помощи MATLAB.

2. Проверка устойчивости системы по критерию Гурвица

На рисунке 4 представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс определения устойчивости системы согласно критерию Гурвица. Очевидно, что исследуемая САУ с заданными параметрами не является устойчивой, поскольку главный определитель системы отрицательный.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

>> H=tf([k0*k1],[T0*T1 T0+T1 1 k0*k1*k2])

Transfer function:
          20
-----
0.056 s^3 + 0.66 s^2 + s + 20

>> sys=ss(H)

a =
      x1      x2      x3
x1 -11.79  -2.232  -5.58
x2      8       0       0
x3      0       8       0

b =
      u1
x1      2
x2      0
x3      0

c =
      x1      x2      x3
y1      0       0  2.79

d =
      u1
y1      0

Continuous-time model.
>>

```

Рисунок 3. Процесс задания передаточной функции замкнутой и определения САУ в пространстве состояний.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

>> D3=det([T0+T1 k0*k1*k2 0; T0*T1 1 0; 0 T0+T1 k0*k1*k2])

D3 =

-9.2000

>>

```

Рисунок 4. Процесс определения устойчивости САУ по критерию Гурвица.

3. Определение устойчивости системы по корням характеристического уравнения

На рисунке 5 представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс определения корней характеристического уравнения замкнутой системы. Некоторые корни характеристического уравнения имеют положительные вещественные части, что характеризует систему как неустойчивую.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> pole(H)

ans =

-12.6145
 0.4144 + 5.3047i
 0.4144 - 5.3047i

>>

```

Рисунок 5. Процесс определения корней характеристического уравнения замкнутой системы при помощи функции *pole*.

4. Определение назначения функций *ltiview* и *margin*. Получение с их помощью информации о переходной характеристике и запасе устойчивости системы

Функция *ltiview* запускает так называемый LTI Viewer – графический интерфейс пользователя, который упрощает анализ линейных времязависимых систем. Аргументом функции может быть специальная переменная, которая может содержать передаточную функцию системы, либо же описание в любом другом виде, например в пространстве состояний. При помощи LTI Viewer можно генерировать временные или частотные графические отклики для изучения ключевых параметров этих откликов, таких как время нарастания сигнала, время регулирования, максимальная амплитуда максимальное перерегулирование и др.

На рисунке 6 представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс запуска интерфейса LTI Viewer, а на рисунке 7 – график переходной характеристики системы, по которому однозначно можно судить о неустойчивости последней.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> ltiview(sys)
>> |

```

Рисунок 6. Фрагмент командного окна MATLAB, отображающий выполнение функции *ltiview*.

При помощи функции *margin* можно оценить запас устойчивости системы. Функция выводит диаграмму Боде, на которой отмечает запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

На рисунке 8 представлен фрагмент командного окна MATLAB, на котором изображен процесс выполнения функции *margin*, а на рисунке 9 изображена диаграмма Боде для САУ с заданными параметрами с отметками запасов устойчивости по амплитуде и фазе. Как видим, запас по амплитуде равен *inf* ($G_m = \text{inf}$), а по фазе $-43,9^\circ$ ($P_m = -43,9 \text{ deg}$), что свидетельствует о неустойчивости системы.

6. Проверка системы на устойчивость по критерию Михайлова

Для определения устойчивости по Михайлову проведем следующие манипуляции. Характеристический полином замкнутой системы имеет вид:

$$D(s) = F_0 T_1 s^3 + (F_0 + F_1) s^2 + s + k_0 k_1 k_2$$

Выполним замену переменных $s \rightarrow ja$ и получим частотозависимую функцию следующего вида:

$$M(ja) = F_0 T_1 j a^3 + (F_0 + F_1) a^2 + j a + k_0 k_1 k_2 = k_0 k_1 k_2 - (F_0 + F_1) a^2 + j(a + \omega F_0 T_1 a^3)$$

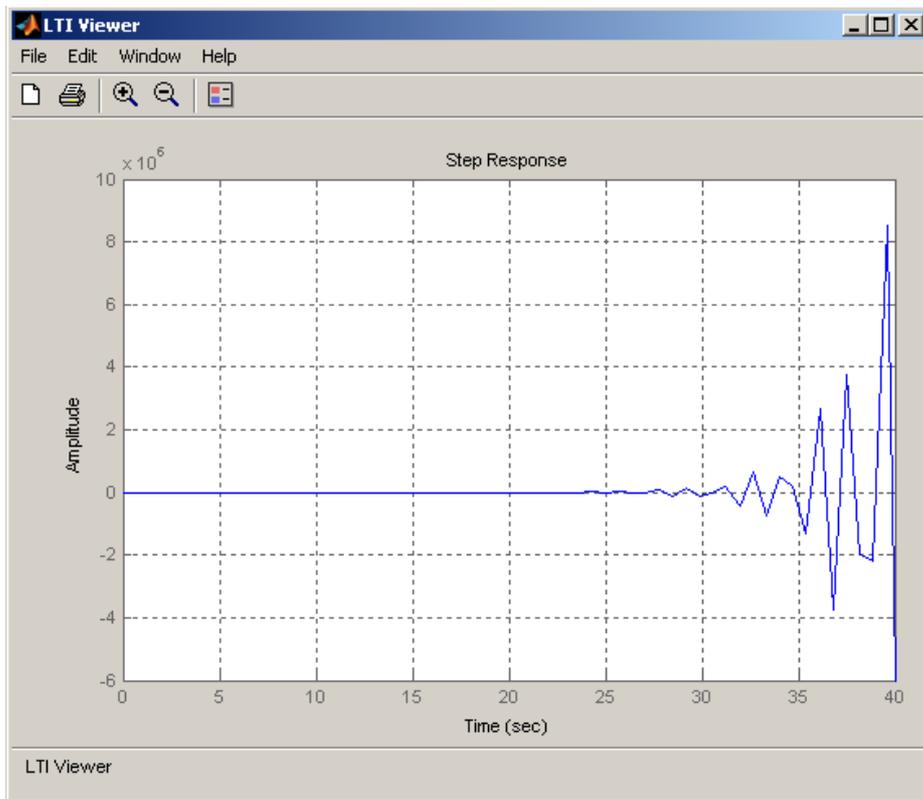


Рисунок 7. График переходной характеристики САУ.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> margin(sys)
>>
..
  
```

Рисунок 8. Фрагмент командного окна MATLAB отображающий выполнение функции *margin*.

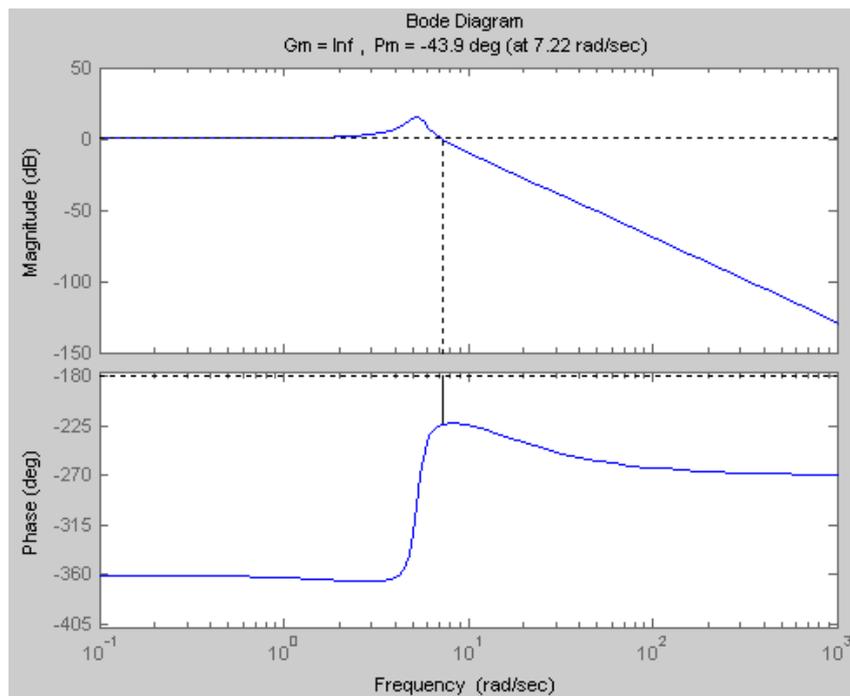


Рисунок 9. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы с отметками запасов устойчивости.

Вещественная часть этой функции имеет вид: $U(s) = k_0 k_1 k_2 - (T_0 + T_1) s^2$, а мнимая: $V(s) = -T_0 T_1 s^3$.

Построим годограф Михайлова при помощи MATLAB, что изображено на рисунке 10. График годографа изображен на рисунке 11.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> w=0:0.5:50;
>> U=k0*k1*k2-(T0+T1)*w.^2;
>> V=w-T0*T1*w.^3;
>> plot(U,V)
>>

```

Рисунок 10. Фрагмент командного окна MATLAB, отображающий процесс определения и построения годографа Михайлова.

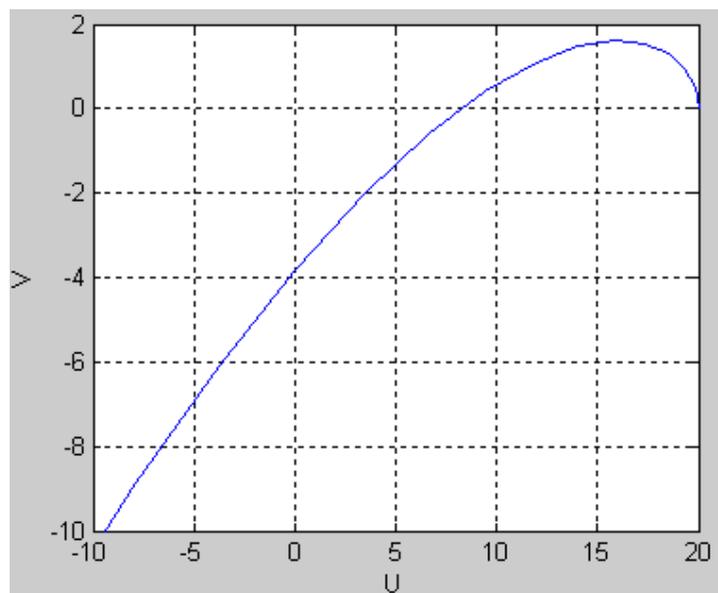


Рисунок 11. Годограф Михайлова.

Как видно из рисунка 11, САУ с заданными параметрами неустойчива, поскольку вектор, начало которого лежит в точке (0, 0), а конец – на кривой Михайлова, вращаясь против часовой стрелки НЕ проходит последовательно количество квадрантов, равное порядку системы – 3.

7. Проверка системы на устойчивость согласно критерию Найквиста

Построение амплитудно-фазовой характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы выполняется в командном окне MATLAB при помощи функции *nyquist*:

```
>> nyquist(W)
```

где *W* – переменная, несущая информацию о передаточной функции разомкнутой системы.

На рисунке 12 построена АФЧХ разомкнутой системы. Поскольку АФЧХ разомкнутой системы охватывает точку с координатами (-1, j0), то, согласно критерию Найквиста САУ с заданными параметрами является неустойчивой.

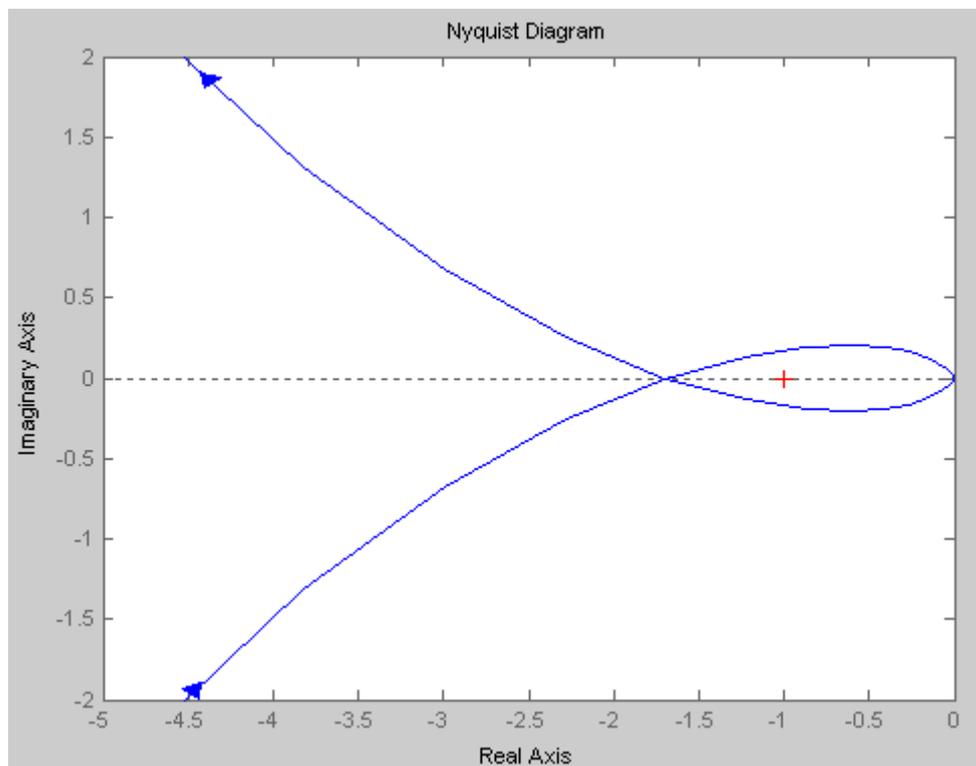


Рисунок 12. АФЧХ разомкнутой системы.

Выводы

В работе был проведен анализ устойчивости замкнутой автоматической системы на основании различных критериев при помощи ПО MATLAB.

Эффективность применения ЭВМ и ПО MATLAB в исследовании САУ высокого порядка на устойчивость очевидна, как при применении алгебраических критериев устойчивости, так и графических, поскольку пакет Control System обладает широким набором функций для расчета и отображения характеристик сколь угодно сложной САУ, что было показано в работе.

Лабораторная работа №3. Исследование многоконтурной системы автоматического регулирования

Цель работы

Реализовать и исследовать модель регулирования «жесткого» спутника Земли.

Программа работы

1. Исследовать переходную характеристику объекта регулирования – «жесткого» спутника Земли (ЖСЗ) в среде структурного моделирования Simulink с моментом инерции объекта $J = 10$.
2. Охватить динамическую модель «жесткого» спутника обратной связью по положению и оценить устойчивость САУ.
3. Охватить динамическую модель «жесткого» спутника обратной связью по скорости и положению. Системе дана команда изменить угловое положение на 30° . Определить это положение по окончанию переходного процесса. Определить коэффициенты регулятора при следующих коэффициентах демпфирования САУ: $\xi=0.707$, $\xi=1$.
4. Оценить влияние на переходную характеристику изменения коэффициента обратной связи по скорости.

5. Оценить коэффициенты регулятора, если переходный процесс должен заканчиваться за 0,3 с, при $g = 0$.
6. Угловая скорость спутника измеряется с помощью гироскопического датчика. Предположим, что датчик вышел из строя (Подобные ситуации действительно имели место). Какой регулятор может обеспечить процесс регулирования САУ?
7. Рассмотреть систему с чистым запаздыванием. Оценить динамические свойства системы при различных временах задержки: $\tau = 0.1$ с, $\tau = 0,4$ с, $\tau = 4$ с.
8. Пронаблюдать фазовую траекторию САУ.

Ход работы

1. Реализация модели «жесткого» спутника Земли в Simulink

На рисунке 1 представлена структура модели «жесткого» спутника Земли для среды Simulink.

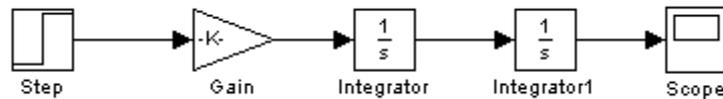


Рисунок 1. Структура модели «жесткого» спутника Земли.

На рисунке 2 изображена переходная характеристика системы, из которой видно, что она не устойчива.

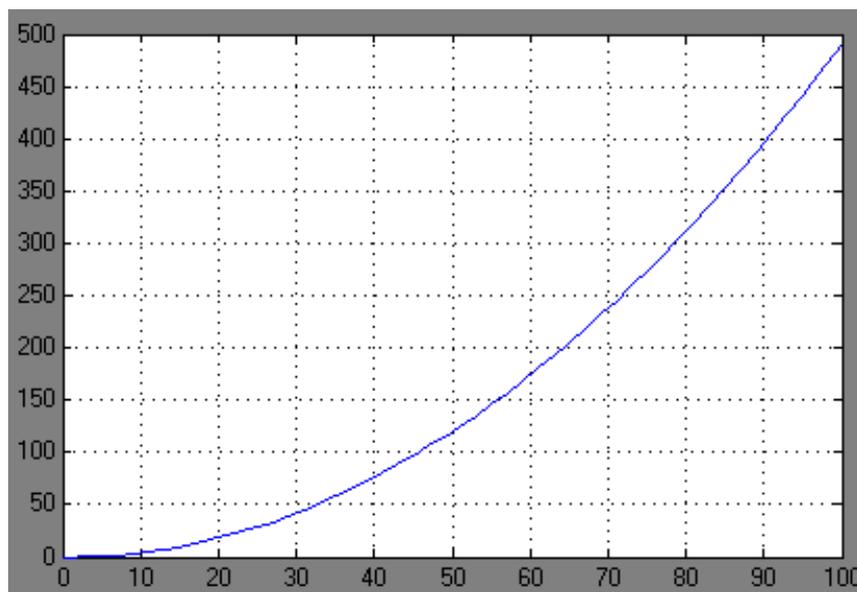


Рисунок 2. Переходная характеристика разомкнутой системы в модели «жесткого» спутника Земли.

2. Охват модели ЖСЗ обратной связью по положению.

Структура модели ЖСЗ с единичной обратной связью по положению представлена на рисунке 3, ее переходная характеристика – на рисунке 4, вид которой соответствует консервативному звену. Такая САУ находится на границе устойчивости и неспособна привести объект в конечное положение.

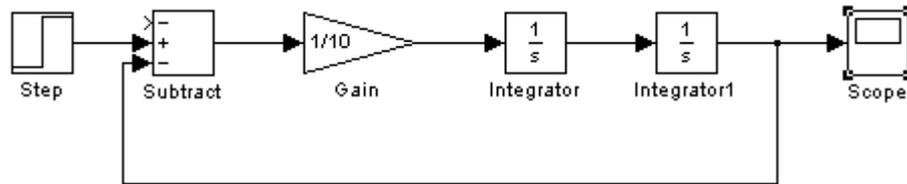


Рисунок 3. Структура модели ЖСЗ с единичной обратной связью по положению.

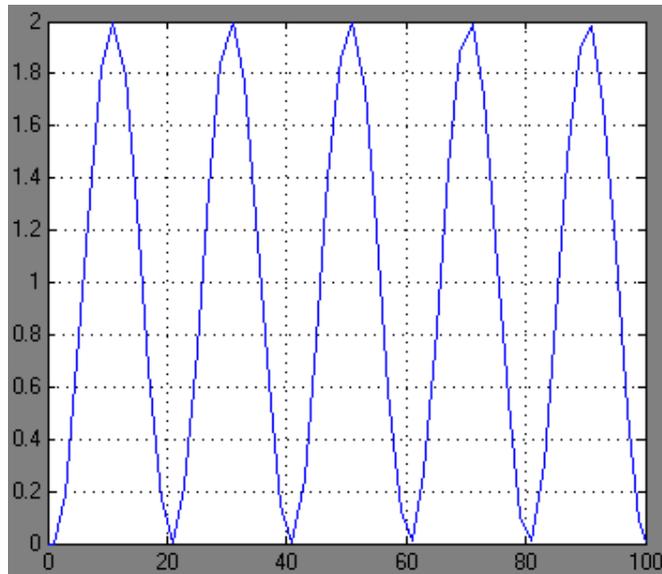


Рисунок 4. Переходная характеристика САУ ЖСЗ с обратной связью по положению.

3. Охват модели ЖСЗ обратной связью по скорости и по положению.

Структура модели ЖСЗ с обратной связью по скорости с фиксированным коэффициентом передачи и единичной обратной связью по положению изображена на рисунке 5. На рисунке 6. представлен график переходной характеристики системы при задающем ступенчатом воздействии в 30° .

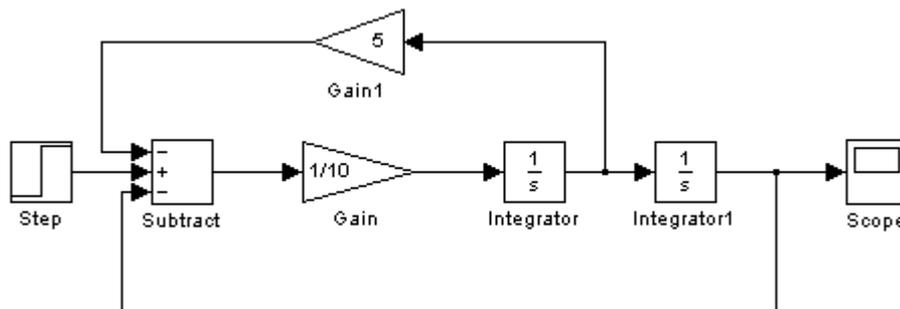


Рисунок 5. Структура модели ЖСЗ с обратной связью по скорости и угловому положению.

Из переходной характеристики видно, что система, охваченная двумя обратными связями, приобретает устойчивость с приемлемыми параметрами регулирования: перерегулирование составляет примерно 3,3 %, а время регулирования – около 17 с. Установившееся значение выходного угла соответствует заданному.

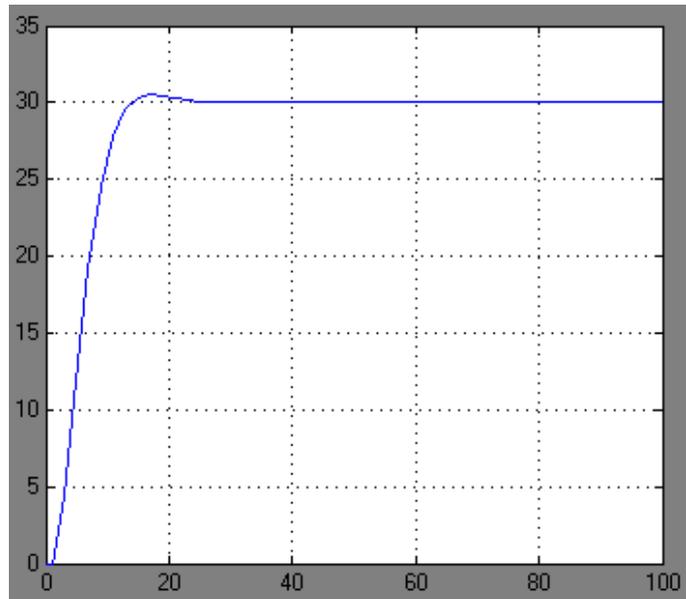


Рисунок 6. Переходная характеристика модели системы ЖСЗ с обратными связями по скорости и положению.

Общее выражение передаточной функции структуры на рисунке 5 имеет вид:

$$\Phi(s) = \frac{1}{J \cdot s + k_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{s(J \cdot s + k_1)}} = \frac{1}{J \cdot s^2 + k_1 \cdot s + 1} = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}$$

Определим величину коэффициента обратной связи по скорости при заданных коэффициентах демпфирования $\xi = 0,707$. Очевидно что:

$$k_1 = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{10}$$

Тогда:

$$\xi = 0,707 \Rightarrow k_1 = 2 \cdot 0,707 \cdot \sqrt{10} = 4,4715;$$

$$\xi = 1 \Rightarrow k_1 = 2 \cdot 1 \cdot \sqrt{10} = 6,3246.$$

Для возможности изменения коэффициента демпфирования в линию местной обратной связи вводится регулятор с изменяемым коэффициентом передачи K и тогда структура модели приобретает вид, изображенный на рисунке 7.

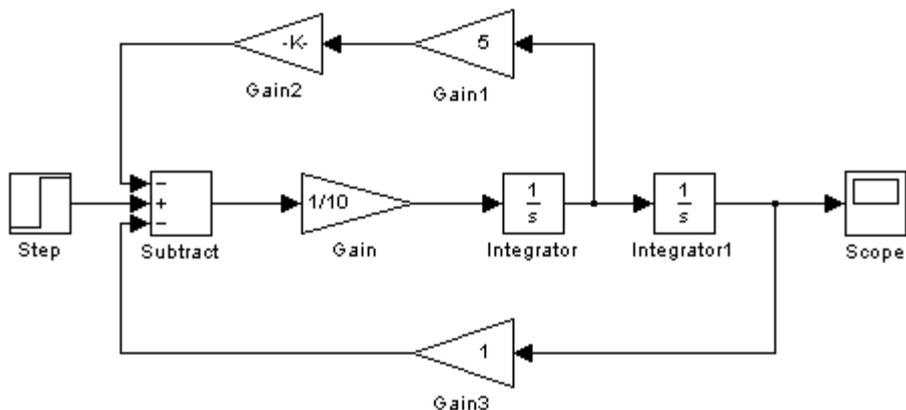


Рисунок 7. Структура модели ЖСЗ с регулятором коэффициента демпфирования.

4. Оценка влияния изменения коэффициента обратной связи по скорости на переходную характеристику системы.

Построим переходные характеристики для двух значений $k1$, определенных в п.п. 3. Графики этих кривых представлены на рисунках 8 и 9.

Как видно из рисунков 8 и 9 увеличение коэффициента передачи сигнала обратной связи по скорости приводит к уменьшению перерегулирования и увеличению времени регулирования системы.

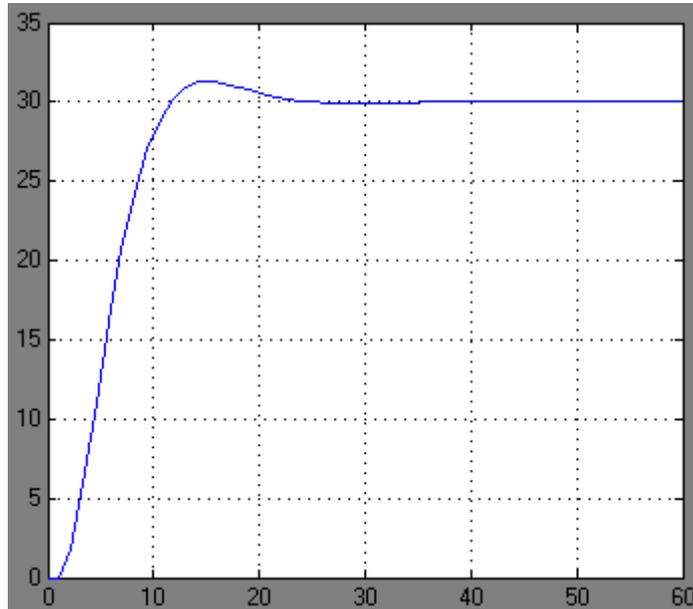


Рисунок 8. Переходная характеристика САУ ЖСЗ при $k1 = 4,4715$.

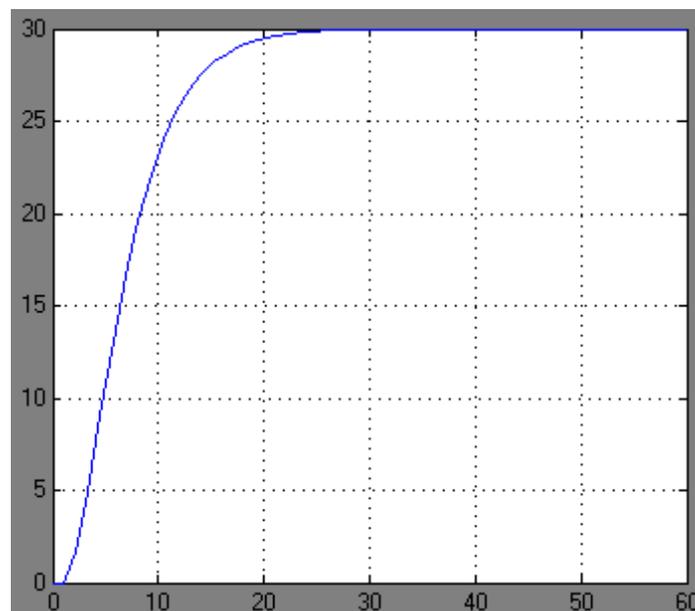


Рисунок 9. Переходная характеристика САУ ЖСЗ при $k1 = 6,3246$.

5. Определение коэффициентов обратных связей САУ при известном времени окончания переходного процесса

Если задано время переходного процесса в системе: 0,3 с, при отсутствии задающего воздействия, то можно определить коэффициенты обратных связей САУ из соображений:

$$\Phi(s) = \frac{A(s)}{Js^2 + k_1s + k_2};$$

$$t_p = 0,3 = \frac{1}{\eta} \ln \frac{1}{\Delta} \approx \frac{3}{\eta};$$

$$\eta = \lambda_1 = 10,$$

где k_1 , k_2 – коэффициенты обратных связей по скорости и положению соответственно; t_p – время регулирования; λ_1 – один из корней характеристического уравнения системы.

Если принять второй корень характеристического уравнения равным: $\lambda_2 = -100$, то получим:

$$Js^2 + k_1s + k_2 = J(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) = J(s + 10)(s + 100) = Js^2 + 110Js + 1000J;$$

$$k_1 = 110J; \quad k_2 = 1000J.$$

На рисунке 10 приведена структура САУ, удовлетворяющей заданным условиям, а на рисунке 11 – ее переходная характеристика. В модели САУ множитель J выделен в отдельный блок.

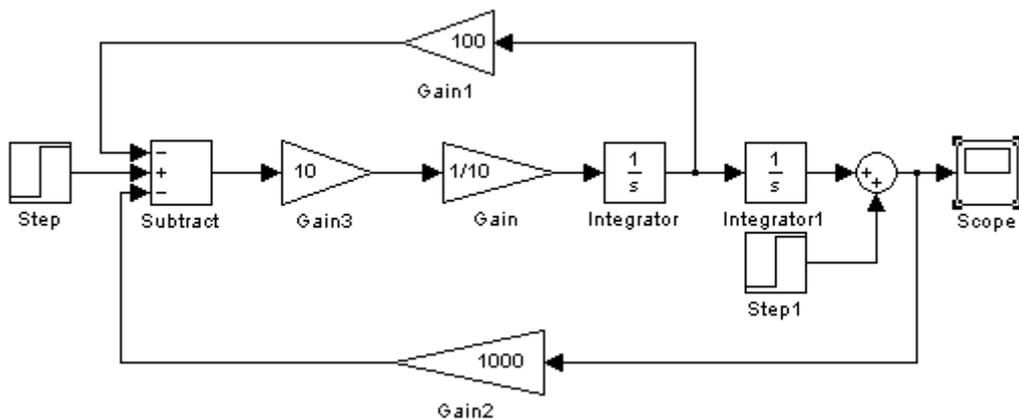


Рисунок 10. Структура САУ с временем регулирования 0,3 с.

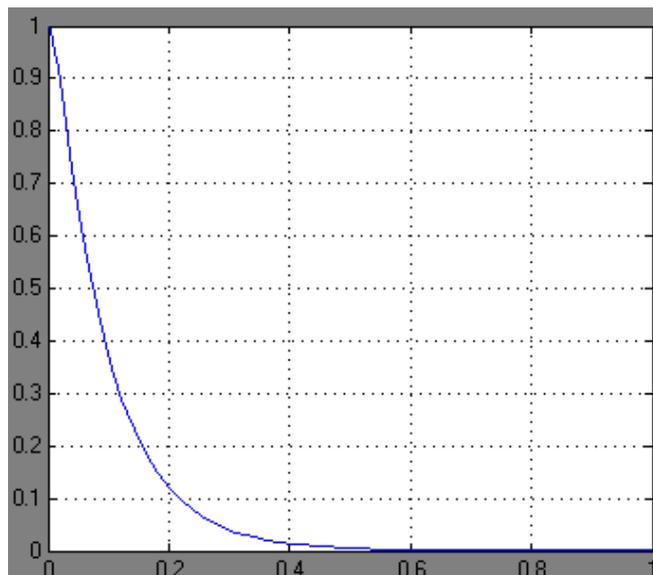


Рисунок 11. Переходная характеристика САУ с временем регулирования около 0,3 с.

6. Система с чистым запаздыванием. Оценка динамических свойств системы с различными временами задержки

Структура модели ЖСЗ со звеном запаздывания изображена на рисунке 12.

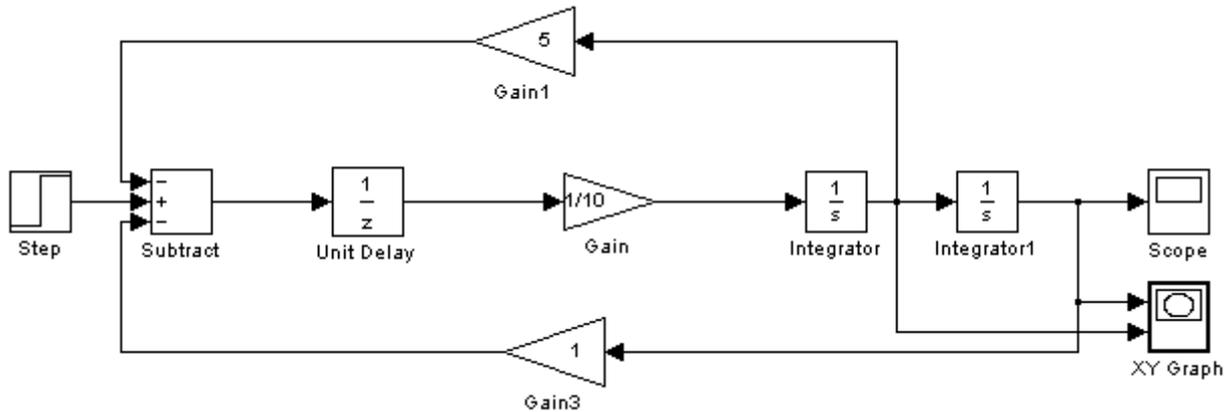
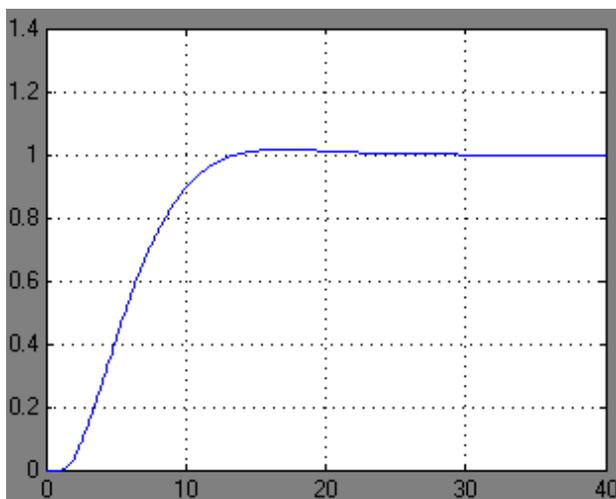
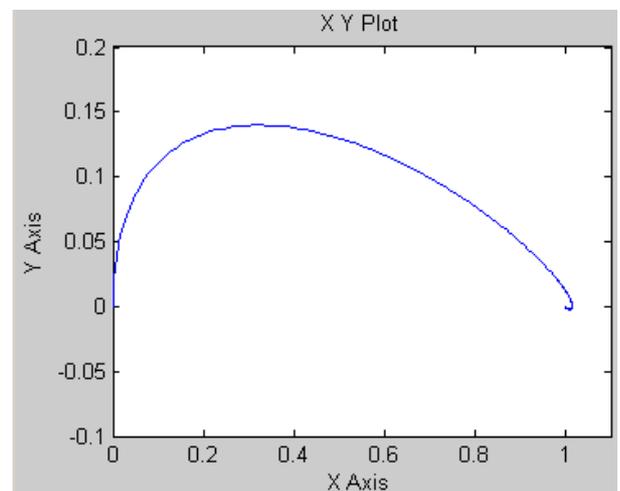


Рисунок 12. Структура модели САУ ЖСЗ со звеном запаздывания.

Ни рисунках 13, 14 и 15 приведены переходные характеристика и фазовые траектории САУ с запаздыванием $0,1\text{c}$, $0,4\text{c}$ и 1c соответственно.



а)



б)

Рисунок 13. Переходная характеристика (а) и фазовый портрет (б) САУ с запаздыванием $0,1\text{c}$.

Очевидно, что запас устойчивости уменьшается и ухудшаются показатели регулирования САУ со звеном запаздывания, вплоть до полной неустойчивости системы при увеличении времени запаздывания (рис. 15).

Выводы

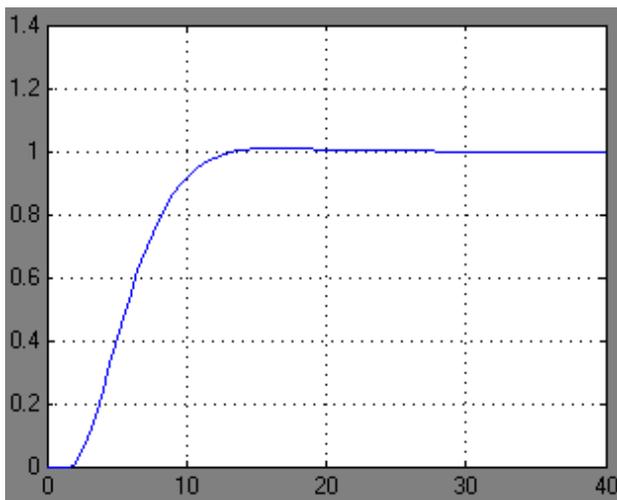
Исследование модели ЖСЗ показало, что САУ ЖСЗ является неустойчивой в разомкнутом состоянии.

Введение единичной обратной связи по положению переводит систему на колебательную границу устойчивости и конечное угловое положение объекта управления не определено.

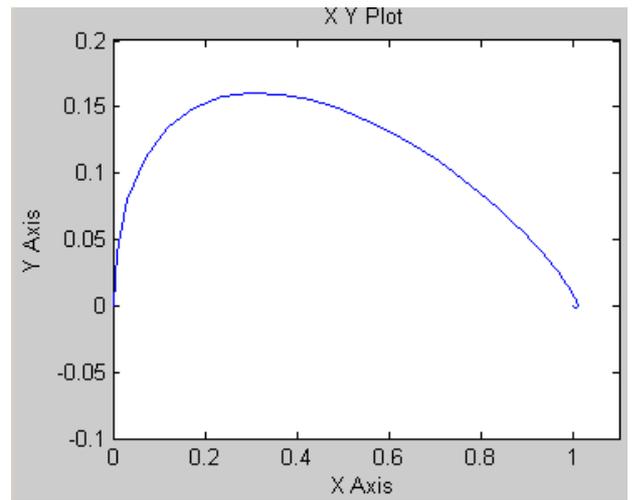
Система становится устойчивой и управляемой при введении местной обратной связи по угловой скорости. Такая система обладает приемлемыми показателями качества регулирования и способна обрабатывать задания на угловые перемещения.

Введение дополнительного регулятора в канал местной обратной связи позволяет управлять демпфированием системы, что было показано.

САУ с чистым запаздыванием может быть как устойчивой с приемлемыми показателями качества регулирования, так и неустойчивой. Увеличение времени запаздывания ведет к усилению колебательных свойств системы и переходу ее в неустойчивое состояние.

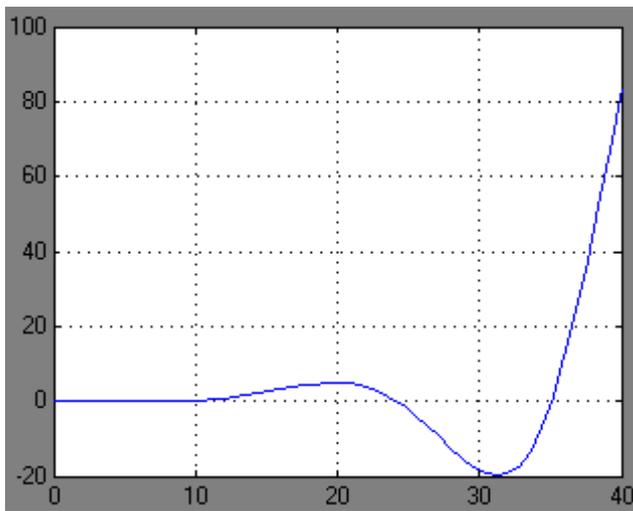


а)

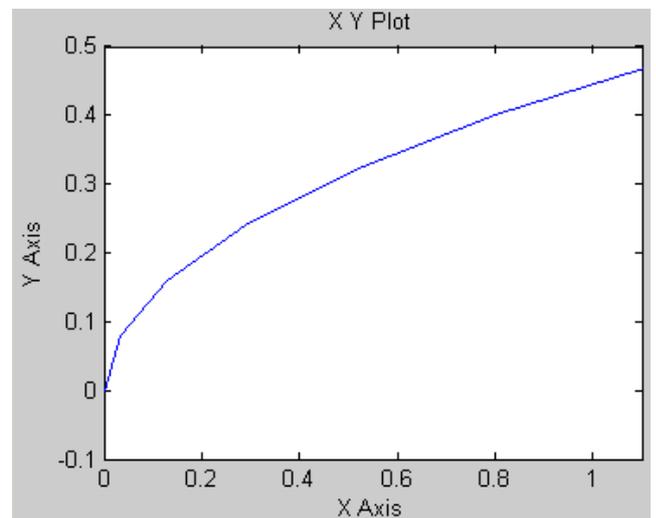


б)

Рисунок 14. Переходная характеристика (а) и фазовый портрет (б) САУ с запаздыванием 0,4 с.



а)



б)

Рисунок 15. Переходная характеристика (а) и фазовый портрет (б) САУ с запаздыванием 4 с.