## МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

## ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА

## ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Часть І

Ташкент-2018

Теория автоматического управления: Методические указания к выполнению лабораторных работ. Сост.: Ж.У.Севинов, Н.С.Якубова Ташкент: ТашГТУ, 2018. 116 с.

В методических указаниях приведены примеры и задачи по линейных динамических характеристик изучению систем устойчивости линейных управления, структурного метода, непрерывных систем, процессов управления в линейных системах и методов синтеза линейных систем, устойчивости нелинейных систем, динамических процессов в нелинейных системах, синтеза нелинейных систем, систем автоматического поиска экстремума, оптимальных систем.

Методические указания предназначены ДЛЯ студентов 5311000 направления «Автоматизация \_ И управление процессами и производствами», 5330200 технологическими информационные 5312600 «Информатика И технологии», «Обработка «Мехатроника робототехника» 5312700 И И \_ информации и системы управления».

Печатаются по решению научно-методического совета ТашГТУ

Рецензенты: проф., д.т.н, Юсупбеков А.Н.(ТашГТУ); проф., д.т.н, Исмаилов М.А.(ТашГТУ)

© Ташкентский государственный технический университет, 2018

## введение

*Теория автоматического управления* - это научная дисциплина, которая возникла сравнительно недавно, хотя отдельные устройства, работавшие без участия человека, известны с глубокой древности.

Появившиеся в результате первого промышленного переворота в Европе в конце XVIII века регуляторы (1765 г. – регулятор уровня И.И.Ползунова, а в 1784 г. – регулятор скорости паровой машины Д. Уатта) были предназначены стабилизировать работу технических устройств, на которые действуют внешние факторы из окружающей эффективным способом оказалось Очень использование среды. отрицательной обратной связи, которую в XIX веке вводили еще полуинтуитивно, и без соответствующих расчетов это не всегда давало нужный эффект. Часто вместо предполагаемого улучшения работы применение регуляторов с отрицательной обратной связью приводило к неожиданным техническим явлениям: неустойчивости и генерации изучения движений. Для ЭТИХ явлений потребовались новых соответствующие методы, которые не только могли бы объяснить необычные свойства, но и позволили усмотреть общие закономерности поведения регуляторов. Их основы были изложены в появившихся в XIX века первых работах «о регуляторах» конце английского математика-механика Д.Максвелла (1866 г.) и русского механика И.А.Вышнеградского (1876, 1877 гг.). Активное развитие новой теории электротехнических систем, началось с появлением В частности электромашинных, систем радиоавтоматики. Дo И сих пор классическим примером систем автоматического управления является система регулирования скорости электрической машины. Впоследствии оказалось, что методы теории автоматического управления позволяют работу объектов различной физической объяснить природы: В механике, энергетике, радио- и электротехнике, т. е. везде, где можно усмотреть обратную связь. Все методы объединяет одна общая задача: обеспечить необходимую точность и удовлетворительное качество Таким образом, процессов. теория переходных автоматического управления является по существу теорией процессов в системах с отрицательной обратной связью. К настоящему времени теория управления сложившейся автоматического научной является дисциплиной со своим аналитическим аппаратом.

Предметом изучения теории автоматического управления являются свойства, методы расчета и конструирования систем

3

автоматики с обратными связями. При нынешнем уровне развития науки и техники для составления моделей обычно используется аппарат дифференциальных уравнений, на языке которых сформулированы основные законы механики и физики макромира. Итак, предметом теории автоматического управления являются свойства моделей систем автоматики, которые представлены дифференциальными уравнениями, а также их различными преобразованиями и интерпретациями.

## Лабораторная работа № 1

## Исследование разомкнутой линейной системы

## Цель работы

 освоение методов анализа одномерной линейной непрерывной системы с помощью среды MATLAB

## Задачи работы

- ввести модель системы в виде передаточной функции
- построить эквивалентные модели в пространстве состояний и в форме «нули-полюса»
- определить коэффициент усиления в установившемся режиме и полосу пропускания системы
- научиться строить импульсную и переходную характеристики, карту расположения нулей и полюсов, частотную характеристику
- научиться использовать окно LTIViewer для построения различных характеристик
- научиться строить процессы на выходе линейной системы при произвольном входном сигнале

## Инструкция по выполнению работы

Основная часть команд вводится в командном окне среды МАТLAB. Команды, которые надо применять в других окнах, обозначены иконками соответствующих программ.

Этап выполнения задания	Команды МАТLАВ
1. Очистите рабочее пространствоМАТLAB (память).	clearall
2. Очистите окно МАТLАВ.	clc
3. Посмотрите краткую справку по команде <b>tf.</b>	help tf
<ol> <li>Определите адрес файла, который выполняет эту команду.</li> </ol>	which('tf')
5. Введите передаточную	$n = [n2 \ n1 \ n0]$
функцию <sup>1</sup> $F(s) = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}{r_1^3 + r_1 s^2 + r_1 s + r_0}$ как	d = [1 d2 d1 d0]
$s^{2} + a_{2}s^{2} + a_{1}s + a_{0}$ объект <b>tf</b> .	f = tf(n, d)
6. Проверьте, как извлечь из этого	[n1,d1] = tfdata ( f, 'v' )
объекта числитель и знаменатель	
передаточной функции.	
7. Найдите нули и полюса	z = zero (f)
передаточной функции.	p = pole (f)
<ol> <li>Найдите коэффициент усиления звена в установившемся режиме.</li> </ol>	k = dcgain (f)
9. Определите полосу пропускания системы (наименьшую частоту, на	b = bandwidth (f)
которой АЧХ становится меньше, чем –3дБ).	
<ol> <li>Постройте модель системы в пространстве состояния.</li> </ol>	$f_ss = ss(f)$
<ol> <li>Сделайте так, чтобы коэффициент прямой передачи звена был равен 1.</li> </ol>	f_ss.d = 1

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Все коэффициенты надо взять из таблицы в конце файла.

12. Найдите новый коэффициент усиления звена в установившемся режиме.	$k1 = dcgain (f_ss)$
13. Как связаны коэффициенты <i>k</i> и <i>k</i> <sub>1</sub> ? Почему?	
14. Постройте модель исходной системы в форме «нули-полюса».	$f_zp = zpk(f)$
<ol> <li>Проверьте, какие переменные есть в рабочем пространстве.</li> </ol>	who или whos (в чем разница?)
<ol> <li>Постройте на графике расположение нулей и полюсов системы.</li> </ol>	pzmap (f)
<ol> <li>Определите коэффициенты демпфирования и собственные частоты для всех элементарных звеньев (первого и второго порядка).</li> </ol>	[wc,ksi,p] = damp ( f )
18. Запустите модуль LTIViewer.	ltiview
19. Загрузите модель f.	JLTI Viewer File – Import
<ol> <li>Постройте импульсную характеристику (весовую функцию) этой системы.</li> </ol>	<mark>∢LTI Viewer</mark> ПКМ – Plot Types - Impulse
21. Загрузите модель f_ss.	JLTI Viewer File – Import
22. Проверьте, построена ли импульсная характеристика второй системы?	<mark>∢LTI Viewer</mark> ПКМ – Systems
23. Отключите систему f. Почему одинаковы построенные импульсные характеристики разных систем?	<mark>剩 LTI Viewer</mark> ∏KM – Systems

24. Подключите обе системы.	<mark>→LTI Viewer</mark> ПКМ – Systems
25. Постройте переходные характеристики систем.	<mark>∢LTI Viewer</mark> ПКМ – Plot Types – Step
<ul> <li>26. Сделайте, чтобы на графике для каждой функции были отмечены:</li> <li>максимум</li> <li>время переходного процесса<sup>2</sup></li> <li>время нарастания (от 10% до 90% установившегося значения)</li> <li>установившееся значение</li> </ul>	<ul> <li>▶ LTT Viewer</li> <li>ПКМ – Characteristics:</li> <li>Peak Response</li> <li>Settling Time</li> <li>Rise Time</li> <li>Steady State</li> </ul>
27. Щелкая мышью по меткам- кружкам, выведите на экран рамки с численными значениями этих параметров и расположите их так, чтобы все числа были видны.	
<ol> <li>Экспортируйте построенный график в отдельное окно.</li> </ol>	JLTI Viewer File – Print to Figure
<ol> <li>Скопируйте график в буфер обмена в формате векторного метафайла.</li> </ol>	print -dmeta
30. Вставьте график из буфера обмена в отчет ( <i>MicrosoftWord</i> ).	ПКМ - Вставить
31. Закройте окно LTIViewer.	
32. Создайте массив частот для построения частотной характеристики <sup>3</sup> (100 точек в интервале от 10 <sup>-1</sup> до 10 <sup>2</sup> с	w = logspace(-1, 2, 100);

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> По умолчанию в МАТLАВвремя переходного процесса определяется для 2%-ного отклонения от установившегося значения.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Точка с запятой в конце команды подавляет вывод на экран результата выполнения. Это удобно при работе с большими массивами.

равномерным распределением на логарифмической шкале).	
33. Рассчитайте частотную характеристику исходной системы <sup>4</sup> …	r = freqresp ( f, w ); r = r(:);
34 и постройте ее на осях с логарифмическим масштабом по оси абсцисс.	semilogx ( w, abs(r) )
35. Скопируйте график в буфер обмена в формате векторного метафайла.	print -dmeta
36. Вставьте график из буфера обмена в отчет ( <i>MicrosoftWord</i> ). Объясните, где на графике можно найти коэффициент усиления в статическом режиме и как определить полосу пропускания системы.	ПКМ – Вставить
37. Закройте все лишние окна, кроме командного окна MATLAB.	
38. Постройте сигнал, имитирующий прямоугольные импульсы единичной амплитуды с периодом 4 секунды (всего 5 импульсов).	[u,t] = gensig('square',4);
<ol> <li>Выполните моделирование и постройте на графике сигнал выхода системы f при данном входе.</li> </ol>	lsim(f,u,t)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Частотная характеристика возвращается в виде трехмерного массива, в котором каждый элемент имеет 3 индекса: строка, столбец (для многомерных моделей) и номер точки частотной характеристики. Для системы с одним входом и одним выходом команда r = r(:); преобразует эти данные в в обычный одномерныймассив.

40. Скопируйте график в буфер	print -dmeta
обмена в формате векторного	
метафайла.	
41. Вставьте график из буфера	ПКМ – Вставить
обмена в отчет (MicrosoftWord).	

## Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *MicrosoftWord* (шрифт основного текста **TimesNewRoman**, 12 пунктов, через 1,5 интервала, выравнивание по ширине). Он должен включать

- название предмета, номер и название лабораторной работы
- фамилию и инициалы авторов, номер группы
- фамилию и инициалы преподавателя
- номер варианта
- краткое описание исследуемой системы
- результаты выполнения всех пунктов инструкции, которые выделены серым фоном: результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.

При составлении отчета рекомендуется копировать необходимую информацию через буфер обмена из рабочего окна среды МАТLAB. Для этих данных используйте шрифт **CourierNew**, в котором ширина всех символов одинакова.

## Таблица1.1.

Вариант	Вариант n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>		$n_0$	$d_2$	$d_1$	$d_0$
1.	1.0	1.10	0.100	3.0000	3.1600	1.2000
2.	1.1	1.54	0.495	2.8000	2.9200	1.2000

3.	1.2	1.08	0.096	2.3727	2.2264	0.9091
4.	1.3	1.04	0.091	2.1909	2.0264	0.9091
5.	1.4	-1.54	0.252	1.8333	1.5278	0.6944
6.	1.5	-0.90	-0.240	1.6667	1.3611	0.6944
7.	1.6	0.80	-0.224	1.3286	0.8959	0.4592
8.	1.7	1.36	0.204	1.1857	0.7673	0.4592
9.	1.8	-1.98	0.432	1.2000	0.7644	0.3556
10.	1.9	-0.76	-0.399	1.3333	0.8711	0.3556
11.	2.0	0.60	-0.360	1.2000	0.7406	0.2734
12.	2.1	1.68	0.315	1.3250	0.8281	0.2734
13.	2.2	-2.42	0.616	1.3059	0.7696	0.2076
14.	2.3	-0.46	-0.552	1.4235	0.8401	0.2076
15.	2.4	0.24	-0.480	1.3889	0.7531	0.1543
16.	2.5	2.25	0.500	1.5000	0.8086	0.1543
17.	2.6	0.26	-0.780	1.2421	0.6139	0.1108
18.	2.7	-0.27	-0.810	1.1368	0.5717	0.1108
19.	2.8	0.28	-0.840	0.8000	0.3700	0.0500
20.	2.9	3.19	0.870	0.7000	0.3500	0.0500

#### Контрольные вопросы

- 1. Что такое
  - передаточная функция
  - нули и полюса передаточной функции
  - импульсная характеристика (весовая функция)
  - переходная функция
  - частотная характеристика
  - модель в пространстве состояний
  - модель вида «нули-полюса»
  - коэффициент усиления в статическом режиме
  - полоса пропускания системы
  - время переходного процесса
  - частота среза системы
  - собственная частота колебательного звена
  - коэффициент демпфирования колебательного звена
- 2. В каких единицах измеряются
  - коэффициент усиления в статическом режиме
  - полоса пропускания системы
  - время переходного процесса
  - частота среза системы
  - собственная частота колебательного звена
  - коэффициент демпфирования колебательного звена
- 3. Как связана собственная частота с постоянной времени колебательного звена?
- 4. Может ли четверка матриц

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -1 & -3 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix}, D = 0$$

быть моделью системы в пространстве состояний? Почему? Какие соотношения между матрицами должны выполняться в общем случае?

- 5. Как получить краткую справку по какой-либо командеМАТLАВ?
- 6. В чем разница между командами MATLAB who и whos clear all и clc
- 7. Как ввести передаточную функцию  $F(s) = \frac{2s+3}{s^2+4s+5}$ ?
- 8. Как влияет изменение коэффициента прямой передачи (матрицы *D* в модели в пространстве состояний) на статический коэффициент усиления?
- 9. Какие возможности предоставляет модуль LTIViewer?

## Отчет по лабораторной работе № 1

## Исследование разомкнутой линейной системы

Выполнил(а):

Проверила:

Вариант

## 1. Описание системы

Исследуется система, описываемая математической моделью в виде передаточной функции

$$F(s) = \frac{2.9s^2 + 3.19s + 0.87}{s^3 + 0.7s^2 + 0.35s + 0.05}$$

## 2. Результаты исследования

- адрес файла tf.m:
   E:\MAT\LAB\toolbox\control\control\@tf\tf.m
- нули передаточной функции
  - -0.6000
  - -0.5000
- полюса передаточной функции

-0.2500 + 0.4330i

-0.2500 - 0.4330i

-0.2000

- коэффициент усиления звена в установившемся режиме k = 17.4000
- полоса пропускания системы

b = 0.4808 рад/сек

• модель системы в пространстве состояний

a =

• статический коэффициент усиления после изменения матрицы

D

k1 = 18.4000

связь между k и k1 объясняется тем, что ...

• модель в форме «нули-полюса»

2.9 (s+0.6) (s+0.5)

-----

(s+0.2) (s^2 + 0.5s + 0.25)

• коэффициенты демпфирования и частоты среза

Полюс	Собственная	Постоянная	Корфициент	
передаточной	частота,	времени,	демпфирования	
функции	рад/сек	сек		
-0.2000	0.2000	5	1.0000	
-0.2500 + 0.4330i	0.5000	2	0.5000	
-0.2500 - 0.4330i	0.5000	2	0.5000	

- Импульсные характеристики систем f и f\_ss получились, одинаковые, потому что ...
- амплитудная частотная характеристика



- для того, чтобы найти статический коэффициент усиления по АЧХ, надо ...
- для того, чтобы найти полосу пропускания по АЧХ, надо ...
- реакция на сигнал, состоящий из прямоугольных импульсов



## Лабораторная работа № 2

## Исследование временных характеристик системы автоматического управления

#### Цель работы

Изучение временных характеристик типовых звеньев. Исследование временных характеристик при изменении параметров этих звеньев.

#### Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *MicrosoftWord* (шрифт основного текста **TimesNewRoman**, 12 пунктов, через 1,5 интервала, выравнивание по ширине). Он должен включать

- название предмета, номер и название лабораторной работы
- фамилию и инициалы авторов, номер группы
- фамилию и инициалы преподавателя
- номер варианта
- краткое описание исследуемой системы
- результаты выполнения всех пунктов инструкции, которые выделены серым фоном: результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.

При составлении отчета рекомендуется копировать необходимую информацию через буфер обмена из рабочего окна среды МАТLAB. Для этих данных используйте шрифт **CourierNew**, в котором ширина всех символов одинакова.

## Краткие теоретические сведения

Динамические свойства системы могут быть определены по *переходной функции* и *импульсной функции* данной системы. Переходная функция, или переходная характеристика системы h(t) представляет собой кривую переходного процесса или реакции системы на единичное скачкообразное воздействие u(t)=1(t). Изображение по Лапласу входного сигнала

$$U(p) = \frac{1}{p} \tag{2.1}$$

и, следовательно, изображение выходного сигнала

$$Y(p) = \frac{1}{p} \cdot W(p).$$
(2.2)

Переходя от изображения к оригиналу, получаем

$$h(t) = L^{-1} \left[ \frac{W(p)}{p} \right].$$
(2.3)

Импульсная характеристикаk(t) представляет собой реакцию системы на единичную импульсную дельта-функцию (t). Изображение по Лапласу дельта-функции

$$L\left[\delta(t)\right] = 1, \tag{2.4}$$

поэтому изображение выходного сигнала совпадает с передаточной функцией системы

$$Y(p) = W(p). \tag{2.5}$$

Переходя от изображения импульсной характеристики к оригиналу, получаем

$$k(t) = \underline{L}^{-1}[W(p)], \qquad (2.6)$$

- импульсная характеристика системы совпадает с оригиналом передаточной функции системы.

Импульсная характеристика является основной характеристикой системы. Это обусловливается тем, что для произвольного

входного воздействия u(t), прикладываемого в момент времени t=0, переходный процесс при нулевых начальных условиях определяется по импульсной характеристике системы

$$y(t) = \int_{0}^{t} u(\tau)k(t-\tau) d\tau = \int_{0}^{t} k(\tau)u(t-\tau) d\tau.$$
 (2.7)

#### Методичная инструкция по выполнению работы

Для выполнить работы откроем программуMatLAB.



Рис.2.1.Рабочее окно программы MatLAB

Затем откроем окно**Simulink.** Для этогоможно сделать следующие пункты:

- в инструментальной панели MatLABнажимаем кнопку Simulink;

- в рабочем окне**MatLAB**можно написать команду**simulink**и нажатьEnter;

File-Open...и открыть файли моделей (.mdl-файл).



Рис.2.2.Библиотека Simulink.

Использование 1 и 2 пункты открывает библиотека **Simulink** (рис.2.2).

Создать структуру модели.

В пакете Simulinkвыбираем команды File/New/Model (рис. 2.3.)



Рис. 2.3.Окно Создать структуру модели.

В окне создать блоки моделей. Для этого открыть необходимый отдел библиотеки (например, **Sources** – Источники).



Рис.2.4. Окно моделей.

Удалить блоки. Для этого выбираем блок и нажимаем клавишу**Delete.** 

Для преобразования размеров блока начало выбрать блок и нажать левую кнопку мыши.

СохранитьфайлFile/Save As...;

Открыть файл File/Open;

## Получить переходную характеристику системы h(t).

- 1. Для получения переходной характеристикимоделей*h*(*t*) поставить блок **Step,**вход системы и показать график процесса,блок **Scope**, выход системы.
- 2. Для выполнения работы нажать кнопку **Start**. Затем быстро 2 щелчком левую кнопку мыши в блоке**Scope**.

Для получения переходной характеристики моделей h(t) замкнутой системы используем 2 пункта (рис.2.5).



Рис.2.5. Схема замкнутой системы Импульсная характеристика системы.

Для этого открыть SimulinkLTI-Viewer:

1. Simulink-затем выполнить командуTools\LinearAnalysis...апотомоткрытьModel\_Inputs\_and\_OutputsuSimulinkLTI-Viewer(puc.2.6).



## Puc.2.6.SimulinkLTI-Viewer

2. Вход системы поставим в блок **InputPoint**и выход системывблок **OutputPoint**(Puc.2.7).



## Рис.2.7. Установленный блокІприtPointuOutputPoint.

3. BLTI ViewerвыполнитькомандуSimulink\Get Linearized Model.

Затем в окне появляетсяпереходная характеристика моделей h(t). Для получения импульсной характеристики системы в **LTIViewer**нажать левую кнопку мыши и открывается окно. Здесь выбираем пункт**Impulse**(рис.2.8).



## Puc.2.8. ОкноLTIViewer

## Инструкция по выполнению работы

- 1. Основная часть команд вводится в командном окне среды МАТLАВ. Команды, которые надо применять в других окнах, обозначены иконками соответствующих программ.
- 2. Используя программные средства моделирующего пакета *Simulink*, собрать структурную схему,представленную на рис.2.1.
- 3. Установить параметры этого звена заданного варианта.
- 4. Для получения переходной характеристики системы h(t) надо открыть блок **Scope**, затем нажать кнопку**Start**.
- 5. Для полученияреакции по импульсному сигналу надо открыть окно **SimulinkLTI-Viewer.**
- 6. ВокнеLTI ViewerнадовыполнитькомандуSimulink\Get Linearized Model.
- 7. Затем в окне выбираем пункт **Impulse**.
- 8. Затем преобразуем полученный параметр моделей и анализируем характеристики моделей.

## Варианты:



Таблица 2.1.

	Передаточная функция									
	Инер-	Интег-	Про-	Ко	олебате:	пьное	Диффе-	И	нер-	Про-
	циаль-	ральное	пор-		звено	)	рен-	ЦИ	иаль-	пор-
N⁰	ное	звено	циональ-				циальное	ное	звено	циональ-
	звено		ное звено				звено	1	l-го	ное звено
	1-го							ПО	рядка	
	порядка									
				K	d			K,		K W
1	$\mathbf{W}_1$	W 3	W 5	1	$\frac{\mathbf{W}_7}{\mathbf{O}\mathbf{O}\mathbf{O}}$	0.2	<b>W</b> <sub>6</sub>	2	$\mathbf{W}_2$	<b>W</b> <sub>4</sub>
	1 0,1		9	Ι	0,2	0,3	3	2	10	
2	<b>W</b> <sub>3</sub>	<b>W</b> <sub>7</sub>	<b>W</b> <sub>4</sub>	-	<b>W</b> <sub>1</sub>		<b>W</b> <sub>5</sub>		W <sub>6</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>
	1 0.1	0	10	2	0,1	0,6	4	22	7	19
3	$W_7$	$W_5$	$W_4$		$W_6$		$\mathbf{W}_1$	1	$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>
5	2 0.5	2	0	4	0,8	2	2	18	0.7	3
4	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>		<b>W</b> <sub>2</sub>		$W_4$		W <sub>7</sub>	<b>W</b> <sub>5</sub>
	14 10	3	11	1	0,01	0,1	1	1	0.2	5
5	$W_5$	$\mathbf{W}_2$	$W_6$		<b>W</b> <sub>3</sub>		$\mathbf{W}_7$		$\mathbf{W}_1$	$W_4$
5	5 0.9	1	18	3	0,5	1	0	2	0.2	3
6	$\mathbf{W}_1$	$W_3$	$W_5$		$W_7$		$W_6$	, i	$W_2$	$W_4$
0	2 1	4	17	5	0,9	2	6	1	0,1	5
7	$W_3$	$\mathbf{W}_7$	$W_4$		$W_1$		$W_5$		W <sub>6</sub>	$W_2$
/	8 0.4	3	22	2	0,7	3	3	8	9	0
Q	$\mathbf{W}_7$	$W_5$	$W_4$		$W_6$		$\mathbf{W}_1$		$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>
0	9 5	2	0	4	0,4	0,9	4	7	7	10
0	$W_6$	$\mathbf{W}_1$	$W_3$		$W_2$		$W_4$		$W_7$	$W_5$
9	10 8	0	30	6	0,3	1,3	7	9	5	30
10	$W_5$	$W_2$	$W_6$		<b>W</b> <sub>3</sub>		$W_7$	,	$\mathbf{W}_1$	$W_4$
10	1 0,1	5	1	1	0,6	0,8	2	14	10	26
11	<b>W</b> <sub>3</sub>	$W_7$	$W_4$		$W_1$		$W_5$	,	W <sub>6</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>
11	22 9	0	2	3	0,1	2,5	6	11	9	22
12	$W_7$	$W_5$	$W_4$		$W_6$		$\mathbf{W}_1$		$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>
12	24 7	1	0	7	0,55	3	5	15	3	20
12	$W_6$	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>		$W_2$		$W_4$	1	$W_7$	<b>W</b> <sub>5</sub>
13	15 6	2	6	2	1,5	0,5	4	19	7	19
14	$\mathbf{W}_5$	$\mathbf{W}_2$	$W_6$		$\overline{W}_3$		$\mathbf{W}_7$		$W_1$	$W_4$
14	30 4	4	8	6	0,15	2	1	10	5	11

## Продолжение табл.2.1.

15	$W_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$W_5$	<b>W</b> <sub>7</sub>	$W_6$	$W_2$	$W_4$
13	7 3	5	7	5 0,8 1	2	3 1	0.8
16	$W_7$	$W_5$	$W_4$	$W_6$	$\mathbf{W}_1$	$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>
10	9 2	3	9	4 0,65 2,9	7	24 0.8	0
17	<b>W</b> <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	$W_3$	$W_2$	$W_4$	$\mathbf{W}_7$	$W_5$
1/	3 5	2	14	3 0,3 4	1	26 8	21
10	$W_5$	$W_2$	$W_6$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_1$	$W_4$
10	4 0.2	4	0	8 0,5 2	1	29 8	17
10	$\mathbf{W}_1$	$W_3$	$W_5$	$W_7$	$W_6$	$W_2$	$W_4$
19	26 10	2	11	1 0,63 0,7	5	30 2	12
20	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\overline{W}_7$	$\overline{\mathbf{W}}_4$	$\mathbf{W}_1$	$\overline{W}_5$	$\overline{W}_6$	$\overline{W}_2$
20	19 0.8	3	15	2 0,7 0,7	4	2 0,1	16

#### Контрольные вопросы

- 1. Каковы дифференциальные уравнения, описывающие типовые динамические звенья?
- Каким образом связаны дифференциальные уравнения звеньев с их передаточными функциями? Привести пример перехода от дифференциального уравнения к передаточной функции.
- 3. Как по графику переходной функции инерционного звена оценить величину постоянной времени *T*?
- 4. За какой интервал времени переходный процесс инерционного звена можно считать законченным с точностью до 5%?
- 5. Как выглядит переходный процесс на выходе колебательного звена при значении параметра затухания
  - а) 0; б) 0,2; в) 0,5; г) 0,8?
- 6. Как выглядит переходная характеристика двух последовательно соединенных звеньев:

а) интегрирующего и инерционного; б) двух инерционных?

- 7. Как получить передаточную функцию системы, зная ее переходную или импульсную характеристики?
- 8. Как связаны между собой переходная и импульсная функций?
- 9. Каковы импульсная и переходная функции звена запаздывания?
- 10. Как связано расположение полюсов системы с переходными процессами?

## Отчет по лабораторной работе № 2

# Исследование временных характеристик системы автоматического управления

Выполнил(а):

Проверила:

Вариант

1. Описание системы



Получить переходную характеристику системы h(t).



## Рис.2.9. Замкнутая система.

Импульсная характеристика системы.



## Puc.2.10.SimulinkLTI-Viewer

2. Вход системы поставим в блок **InputPoint**и выход системыв блок **OutputPoint**(Puc.2.11.).



*Puc.2.11. Установленный блок InputPointu OutputPoint.* 3. BLTI ViewerвыполнитькомандуSimulink\Get Linearized

Model.

Затем в окне получаетсяпереходная характеристика моделей h(t). для получения импульсной характеристики системы в **LTIViewer**нажать левую копку мыши и отрывается окно. Здесь выбираем пункт**Impulse** (рис.2.12).



Puc.2.12. ОкноLTIViewer

## Лабораторная работа №3

#### Исследование частотных характеристик динамических систем

#### Цель работы

Построить АФХ, АЧХ и ФЧХ. Изучение теоретических и практических методов получения частотных характеристик линейных стационарных систем.

#### Краткие теоретические сведения

Частотные характеристики системы определяются как реакция системы на гармоническое воздействие.

Рассмотрим динамическую систему представленную на рис. 3.1, на вход которой подается гармонический сигнал

$$x(t) = A_{\alpha} \sin \omega t, \qquad (3.1)$$

где  $A_{ex}$  – амплитуда,  $\omega$  – угловая частота этого воздействия.



Рис. 3.1. Динамическая система.

На выходе линейной системы в установившемся режиме будет наблюдаться гармонический сигнал той же частоты  $\omega$ , обладающий другой амплитудой и сдвинутый по фазе на угол  $\varphi$ относительно входного сигнала

$$y(t) = A_{\text{\tiny GbIX}} \sin(\omega t + \varphi). \tag{3.2}$$

Для линейной системы установившаяся реакция на гармоническое входное воздействие определяется выражением

$$A_{\rm Gbix}e^{j(\omega t+\varphi)} = W(j\omega) \cdot A_{\rm ex}e^{j\omega t}.$$
(3.3)

Функция *W*(*j*ω) называется *частотной характеристикой* системы. Эта характеристика представляет собой комплекснозначную функцию частоты

$$W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \qquad (3.4)$$

модуль которой называется *амплитудной частотной* характеристикой (АЧХ) и определяется как отношение выходной амплитуды к входной

$$\mod W(j\omega) = \frac{A_{_{GbLX}}(\omega)}{A_{_{GX}}(\omega)} = A(\omega), \qquad (3.5)$$

а аргумент, или *фазовая частотная* характеристика (ФЧХ), равен сдвигу фаз выходного сигнала по отношению к входному

$$\arg W(j\omega) = \varphi(\omega). \tag{3.6}$$

Частотная характеристика изображается на комплексной плоскости в виде *годографаНайквиста* – геометрического места концов векторов  $W(j\omega)$  при изменении частоты от 0 доф.

Вместо частотной характеристики системы строят отдельно АЧХ, показывающую как изменяет система амплитуду выходного сигнала различной частоты, и ФЧХ, показывающую фазовые сдвиги, вносимые системой в выходной сигнал на различных частотах.

#### 3.5. Методичная инструкция по выполнению работы

ВыбратьSimulinkLTI-ViewerиControlSystemToolbox.



*Puc. 3.2.Окно PlotConfiguration*.

Для получениячастотной характеристики системы выполнить SimulinkLTI-Viewer, затем в окне LTIViewerвыбратькомандуEdit\PlotConfiguration....

- **step** реакция для переходнойхарактеристики;
- impulse реакция для частотной характеристики;
- bode логарифмическая *амплитудная частотная* характеристика (ЛАЧХ);
- **nyquist** диаграмма Найквист;
- **nichols** годографНиколс ;
- **sigma** число Сингуляр ;
- pole/zero ноль и полюсы системы.

А потомоткрываютокно **PlotConfiguration**(рис3.4).

## 3.6. Инструкция по выполнению работы

- 1. Открываем пакетSimulink.
- 2. Надо выполнить модель необходимой системы.
- 3. Надо открытой в пакете **Simulink** окно **LTI-Viewer**для построения частотной характеристики.
- 4. Для входа в систему надо установить блок**InputPoint**и для выхода изсистемыблок **OutputPoint**.
- 5. ВокнеLTI ViewerнадовыполнитькомандуSimulink\Get Linearized Model.
- 6. ВокнеLTI Viewer надовыполнитькомандуEdit\Plot Configuration....
- 7. В окне надо выбрать необходимые характеристики.
- 8. Надо изменить параметры моделей и ещё выбрать новые характеристики и сравнивать все выбранные характеристики.
- 9. Напечатать результаты.

## Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *MicrosoftWord* (шрифт

основного текста **TimesNewRoman**, 12 пунктов, через 1,5 интервала, выравнивание по ширине). Он должен включать:

- название предмета, номер и название лабораторной работы
- фамилию и инициалы авторов, номер группы
- фамилию и инициалы преподавателя
- номер варианта
- краткое описание исследуемой системы
- результаты выполнения всех пунктов инструкции, которые выделены серым фоном (см. ниже): результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.

При составлении отчета рекомендуется копировать необходимую информацию через буфер обмена из рабочего окна среды МАТLAB. Для этих данных используйте шрифт **CourierNew**, в котором ширина всех символов одинакова.

## Варианты:

	Передаточная функция											
	Инер-	Интег	Пропор-	Колебатель	Диффе	Инер-	Про-пор-					
	циаль	ральное	циональ	-ное звено	рен-	циаль-	циональ-					
	ное	звено	ное		циальное	ное	ное звено					
No	звено		звено		звено	звено						
	1-го					1-го						
	поряд-					поряд-						
	ка					ка						
	КТ	К	К	K d T	К	КТ	К					
1	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$W_5$	$W_7$	$W_6$	$\mathbf{W}_2$	$W_4$					
1	1 0,1	1	9	1 0,2 0,3		2 10	1					
2	$W_3$	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_4$	$\mathbf{W}_1$	$W_5$	$W_6$	$W_2$					
Ζ	1 0.1	0	10	2 0,1 0,6		22 7	19					
2	$\mathbf{W}_7$	$W_5$	$\mathbf{W}_4$	$W_6$	$\mathbf{W}_1$	$\mathbf{W}_2$	$W_3$					
3	2 0.5	2	0	4 0,8 2	2	18 0.7	3					
1	$W_6$	$\mathbf{W}_1$	$W_3$	$\mathbf{W}_2$	$\mathbf{W}_4$	$\mathbf{W}_7$	$W_5$					
4	14 10	3	11	1 0,01 0,1	1	1 0.2	5					
5	$W_5$	$W_2$	$W_6$	$W_3$	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_1$	$W_4$					
5	5 0.9	1	18	3 0,5 1	0	2 0.2	3					

Таблица 3.1.

	Продолжение табл.3.1.										
6	$\mathbf{W}_1$	$W_3$	$W_5$	W <sub>7</sub>	$W_6$	$W_2$	$\mathbf{W}_4$				
0	2 1	4	17	5 0,9 2	6	1 0,1	5				
7	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$W_4$	$W_1$	$W_5$	$W_6$	$\mathbf{W}_2$				
/	8 0.4	3	22	2 0,7 3	3	8 9	0				
0	$W_7$	$W_5$	$W_4$	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>				
0	9 5	2	0	4 0,4 0,9	4	7 7	10				
0	$W_6$	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>	$W_4$	$W_7$	$W_5$				
9	10 8	0	30	6 0,3 1,3	7	9 5	30				
1	$W_5$	$\mathbf{W}_2$	$W_6$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_1$	$W_4$				
0	1 0,1	5	1	1 0,6 0,8	2	14 10	26				
1	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$W_4$	$W_1$	$W_5$	$W_6$	$\mathbf{W}_2$				
1	22 9	0	2	3 0,1 2,5	6	11 9	22				
1	$W_7$	$W_5$	$\mathbf{W}_4$	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	$\mathbf{W}_2$	$W_3$				
2	24 7	1	0	7 0,55 3	5	15 3	20				
1	$W_6$	$\mathbf{W}_1$	$W_3$	$W_2$	$\mathbf{W}_4$	$\mathbf{W}_7$	$W_5$				
3	15 6	2	6	2 1,5 0,5	4	19 7	19				
1	<b>W</b> <sub>5</sub>	$\mathbf{W}_2$	$W_6$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_1$	$\mathbf{W}_4$				
4	30 4	4	8	6 0,15 2	1	10 5	11				
1	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$W_5$	<b>W</b> <sub>7</sub>	W <sub>6</sub>	$W_2$	$\mathbf{W}_4$				
5	7 3	5	7	5 0,8 1	2	3 1	0.8				
1	$W_7$	$W_5$	$W_4$	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>2</sub>	<b>W</b> <sub>3</sub>				
6	9 2	3	9	4 0,65 2,9	7	24 0.8	0				
1	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>	$W_4$	$W_7$	$W_5$				
7	3 5	2	14	3 0,3 4	1	26 8	21				
1	<b>W</b> <sub>5</sub>	$W_2$	$W_6$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_1$	$W_4$				
8	4 0.2	4	0	8 0,5 2	1	29 8	17				
1	$W_1$	$W_3$	$W_5$	<b>W</b> <sub>7</sub>	W6	<b>W</b> <sub>2</sub>	$\mathbf{W}_4$				
9	26 10	2	11	1 0,63 0,7	5	30 2	12				
2	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$W_4$	<b>W</b> <sub>1</sub>	<b>W</b> <sub>5</sub>	<b>W</b> <sub>6</sub>	$W_2$				
0	19 0.8	3	15	2 0,7 0,7	4	2 0,1	16				

#### Контрольные вопросы

- 1. Как определяется частотная характеристика системы?
- 2. Как, используя передаточную функцию системы, получить частотную характеристику системы?
- 3. Как аналитически рассчитать значения амплитудной частотной и фазовой частотной характеристик системы?
- 4. Как выглядят частотные характеристики типовых звеньев?
- 5. Как изменяет вид АЧХ каждый из параметров инерционного звена?
- 6. Как строятся логарифмические частотные характеристики?
- 7. Как получить передаточную функцию последовательного соединения звеньев?
- 8. Как определить модуль и аргумент частотной характеристики последовательного соединения звеньев?
- 9. Как строятся логарифмические частотные характеристики соединения типовых звеньев?
- 10. Как строятся годографы соединений типовых звеньев?

## Отчет по лабораторной работе № 3

**Исследование частотных характеристик динамических систем** Выполнил(а):

Проверила:

Вариант



логарифмические частотные характеристики ЛАХ и ЛФХ



Рис.3.3. Расположение элементов Input Point (точка входа) и Output Point (точка выхода) на модели



Рис.3.4. Переходный процесс для системы, изображенной на рис.3.3



Рис.3.5. Логарифмические частотные характеристики для системы, изображенной на рис.3.3



## Рис.3.6. Амплитудно-фазовые частотные характеристики для системы, изображенной на рис.3.3

Лабораторная работа №4.

# Исследование устойчивости систем автоматического управления

Цель работы— изучение особенностей практического использования алгебраических и частотных критериев устойчивости для анализа динамики линейных САУ 3-го порядков в Matlab.

#### 4.1 Краткие теоретические сведения

Устойчивость линейных САУ. Любая система должна быть, прежде всего, работоспособной. Это значит, что она должна нормально функционировать при действии на нее различных внешних возмущений. Иными словами, система должна работать устойчиво, что должно подтверждаться и при анализе ее математической модели.

36
Понятие устойчивости системы управления связано со способностью возвращаться в состояние равновесия после исчезновения внешних воздействий, которые вывели ее из этого состояния. В общем случае устойчивость САУ определяется характером ее свободного движения.

Устойчивость линейной системы определяется только ее собственными характеристиками и не зависит от действующих на систему возмущений.

Необходимым и достаточным условием устойчивости линейной САУ в общемслучае является нахождение всех корней ее характеристического уравнения  $a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n = 0$  в левой половине комплексной плоскости.

Вычисление корней характеристического уравнения высокого порядка затруднительно. Поэтому для исследования устойчивости систем разработаны критерии, позволяющие судить о расположении корней на комплексной плоскости без их расчета. Прежде чем воспользоваться для оценки устойчивости, тем или иным критерием, следует проверить выполнение необходимого условия устойчивости.

Необходимым, но недостаточным условием устойчивости системы является положительность (отрицательность) всех коэффициентов характеристического уравнения системы, т.е.  $a_i > 0$  для всех *i* от 0 до *n*, где *n*- порядок системы.

В ТАУ широко используются алгебраические ичастотные критерии устойчивости. Алгебраические критерии позволяют непосредственно по коэффициентам характеристического уравнения судить об устойчивости систем. В теории управления наибольшее применение из алгебраических критериев устойчивости получили критерий Рауса и критерий Гурвица.

### Алгебраический критерий устойчивости Гурвица.

Линейная система, характеристический полином которой равен

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n, \qquad (4.1)$$

где *a*<sub>0</sub>>0, устойчива, если положительны *n* главных определителей матрицы

Гурвица (4.2):

Для оценки устойчивости системы необходимо вычислить определители Гурвица  $\Delta_i$  (i = 1, 2, ..., n), которые получают из матрицы Гурвица путем вычеркивания равного числа строк и столбцов в левом верхнем углу матрицы.

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

Последний определитель Гурвица, как видно из приведенной выше матрицы, равен  $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$ . 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 требованию положительности коэффициентов  $a_i$ .

Например, для системы третьего порядка характеристическое уравнение, которого имеет вид  $D(s) = a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3$ , матрица Гурвица определяется по выражению:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix}, (a_i > 0).$$
(4.3)

Система устойчива, если все коэффициенты положительны и

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Если определитель  $\Delta_n = 0$ , то система находится на границе устойчивости.

Возможны два случая:

-апериодическая граница устойчивости, если свободный член характеристического уравнения равен нулю;

-колебательная граница устойчивости, если определитель  $\Delta_{n-1} = 0.$ 

Из условия  $\Delta_{n-1} = 0$  можно определить параметры, при которых система находится на границе устойчивости.

#### Частотный критерий устойчивости Найквиста.

Данный критерий применяется при анализе устойчивости замкнутой системы. Предположим, что разомкнутая система устойчива. Тогда для устойчивости замкнутой САУ необходимо и достаточно, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики  $W(j\omega)$  разомкнутой системы не охватывал точку с координатами (-1, j0) на комплексной плоскости.

Частота, на которой  $|W(j\omega)|=1$ , называется *частотой среза*  $(\omega_{cp})$ . Величина  $\Delta \varphi = 180^{\circ} - |\varphi(\omega_{n\delta})|$  называется *запасом устойчивости по фазе*(рис. 4.1). Рассматривают также *запас устойчивости по модулю (по амплитуде)*  $\Delta A$ :

 $\Delta A = 1 - |W(j\omega_{\pi})|, (4.4)$ 

где частота ω<sub>π</sub> определяется из соотношения:

$$\arg W(j\omega_{\pi}) = -\pi .(4.5)$$



Рис. 4.1 Определение запасов устойчивости по АФЧХ

Из критерия Найквиста следует, что устойчивая в разомкнутом состоянии система будет устойчивой и в замкнутом состоянии, если сдвиг по фазе на частоте среза не достигает  $-\pi(-180^{\circ})$ . Выполнение этого условия принято называть критерием устойчивости Найквиста для ЛАЧХ.

По логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой САУ достаточно просто определяются также запасы устойчивости по амплитуде – $\Delta L$  и по фазе – $\Delta \phi$  (рис. 4.2).

В пакете Simulink возможно автоматическое применение трех критериевустойчивости:

1) по корням характеристического уравнения системы;

2) частотные критерии устойчивости Найквиста;

3) критерий устойчивости Никольса.

Чаще применяются в основном первые два.

Устойчивость системы по корням характеристического уравнения определяется с использованием пакета расширения LTI Viewer.



## Рис. 4.2. Определение запасов устойчивости по ЛАЧХ

LTI Viewer может быть вызван следующим образом:

1)Выполнить команду*Tools*\*LinearAnalysis*... окна Simulinkмодели. В результате выполнения команды откроется окно *Model\_Inputs\_and\_Outputs* (рис. 4.3), а также пустое окно Simulink LTI-Viewer;



Рис.4.3 Исследуемая модель и окно Model\_Inputs\_and\_Outputs

2)установить блок InputPoint на входе и блок OutputPoint на выход исследуемой системы (рис. 4.4);



## Рис.4.4 Исследуемая модель с установленными блоками*Input*иOutput

3)вокне LTI-Viewer выполнитькоманд*Simulink\Get Linearized Model*. Данная команда выполняет линеаризацию модели и строит реакцию системы на единичное ступенчатое воздействие;

4) Для получения характеристик необходимо выполнить команду *Edit*\*PlotConfiguration*.... В результате выполнения этой команды откроется окно, показанное на рис. 4.5.



## **Puc.4.5** Окно PlotConfiguration

В данном окне можно выбрать число отображаемых графиков и вид отображаемых графиков.

Устойчивость системы по корням характеристического уравнения определяется выбором в поле *Responsetype*вид графика для представления расположения нулей и полюсов замкнутой системы *Pole/Zero*.

Устойчивость системы по критерию Найквиста определяется с использованием пакета расширения LTI Viewer:

1) дляАФЧХ: *Plot Type>Nyquist*;

2) дляЛЧХ: Plot Type>Bode.

Для определения запасов устойчивости необходимо выбрать пункт контекстного меню *Characteristics>StabilityMargins*(puc.4.6).



Рис.4.6 Определение запасов устойчивости

При этом в появляющихся окошках указаны численные значения запасов и частота в соответствующих точках логарифмических частотных характеристик:

-Gainmargin (dB) – запас устойчивости по амплитуде, дБ;

*–Phasemargin* (deg) – запас устойчивости по фазе, градусы; *–Atfrequency* (rad/sec) – "на частоте", рад/с.

## 4.2 Порядок выполнения работы

Структурная схема линейной САУ представлена на рис. 4.7.



Рис. 4.7 Структурная схема линейной системы

Соответствующие передаточные функции имеют вид:

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1}; \quad W_2(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1}; \quad W_3(s) = \frac{K_3}{s}.$$

Параметры *T*<sub>1</sub>, *T*<sub>2</sub>, *K*<sub>1</sub>, *K*<sub>3</sub> для каждого варианта задания представлены в табл. 4.1.

Величина коэффициента  $K_2$  на начальном этапе принять равной 1. В дальнейшем будет выбираться из условия устойчивости.

1. Записать передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем:  $W(s) = \frac{Y(s)}{V(s)}$  при f = 0, e = v (т. е. разомкнута главная обратная связь);  $\Phi(s) = \frac{Y(s)}{V(s)}$  при f = 0 – главная передаточная функция замкнутой системы. Задать их в командном окне пакета Matlab.

2. Используя критерий Гурвица, записать в общем виде условия устойчивости. При заданных в табл. 4.1 параметрах  $T_1, T_2, K_1, K_3$  найти граничное значение коэффициента передачи  $K_{2kp}$ , при котором система находится на границе устойчивости. В дальнейшем полагать  $K_2 = 0.5K_{2kp}$ .

3. Построить область устойчивости системы в плоскости общего коэффициента передачи  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$  и постоянной времени  $T_2$  при заданном значении $T_1$ . Найти граничное значение  $K_{rp}$  при заданном значении $T_2$ , при котором система выходит на границу устойчивости.

44

4. Проанализировать устойчивость системы по критерию Найквиста при различных значениях коэффициента K, приняв его равным  $0,5K_{\rm rp}, K_{\rm rp}, 5K_{\rm rp}$ .

5. Набрать модель исследуемой системы в инструментальной среде моделирования Simulink, полагая  $K_2 = 0.5K_{2kp}$ . Получить переходные процессы в системе при заданных параметрах. Экспериментально определить критическое значение коэффициента передачи  $K_{rp}$ , т.е. такое значение, при котором система находится на границе устойчивости.

6. Получить переходные процессы в системе при различных значениях коэффициента K, приняв его равным  $K_2 = 0.5K_{2\text{kp}}, K_2 = K_{2\text{kp}}.$ 

7. Установив блоки входа(InputPoint) В схеме И выхода(OutputPoint) из библиотеки ControlSystemToolbox, при помощи встроенного инструмента просмотра – LTI-Viewer график нулей полюсов замкнутой И получить системы. коэффициента Исследовать усиления влияние системы на расположение корней характеристического уравнения. Сделать вывод.

8. При помощи встроенного инструмента просмотра – LTI-Viewer, получить ЛАЧХ разомкнутой системы.Определить запасы устойчивости системы при  $K_2 = 0.5K_{\tilde{a}\delta}$  и  $K_2 = K_{rp}$ .

Таблица	<i>4.1</i>
---------	------------

N⁰	$T_1$	$T_2$	<i>K</i> <sub>1</sub>	<i>K</i> <sub>3</sub>
1	0,01	0,2	16,5	1
2	0,02	0,3	16	1,1
3	0,03	0,4	15,5	1,2
4	0,04	0,5	15	1,3
5	0,05	0,6	14,5	1,4
6	0,06	0,7	14	1,5
7	0,07	0,8	13,5	1,6
8	0,08	0,9	13	1,7
9	0,09	1	12,5	1,8
10	0,05	1,1	12	1,9
11	0,06	1,2	0,2	1,5
12	0,07	1,3	0,25	1,1
13	0,08	1,4	0,3	2,5
14	0,09	1,5	0,35	3,8
15	0,1	1,6	0,4	2,5
16	0,7	1,2	0,2	4,8
17	0,07	1,4	0,3	7,3
18	0,5	1,6	0,1	6,2
19	0,3	1,6	0,5	3,7
20	0,1	1,5	0,4	6
21	1	1,3	0,33	3
22	0,2	1,2	0,65	2

#### Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Структурная схема исследуемой системы и численные значения параметров.

3. Рассчитанные и экспериментально найденные критические значения параметров.

4. График переходных процессов исследуемой системы.

5. График зависимости  $K_{rp}(T_2)$ .

### 4.4 Контрольные вопросы

1. Как формулируется основное условие устойчивости линейных систем?

2. Как по АФХ исследуемой разомкнутой системы найти  $k_{1 \text{кр}}$ ?

3. Как, используя критерий Гурвица для замкнутой системы, найти критическое значение коэффициента разомкнутой системы?

4.Какой вид имеет переходная характеристика системы, находящейся на колебательной границе устойчивости?

5.Каковы условия положения системы на границе устойчивости по критериям Гурвица, Михайлова, Найквиста?

## Отчет по лабораторной работе № 4

# Исследование устойчивости систем автоматического управления

Выполнил(а):

Проверила:

Вариант

Структурная схема линейной САУ



Соответствующие передаточные функции имеют вид:



Исследуемая модель и окно Model\_Inputs\_and\_Outputs

1)установить блок InputPoint на входе и блок OutputPoint на выход исследуемой системы (рис. 4.8);



## Рис.4.8 Исследуемая модель с установленными блоками*InputuOutput*

Для определения запасов устойчивости необходимо выбрать пункт контекстного меню *Characteristics*>*StabilityMargins*(puc.4.9).



Рис.4.9 Определение запасов устойчивости

# Лабораторная работа №5 Исследование устойчивости динамических систем по критериям Найквиста

**Цель работы**– изучение особенностей практического использования критериев устойчивости Найквист для анализа динамики линейных САУ в среде Matlab.

#### 5.1. Постановка задачи.

- 1. Определить устойчивости динамических систем.
- 2. Изучить особенности практического использования критериев устойчивости Найквиста .

#### 5.2. Краткие теоретические сведения

Этот частотный Критерий устойчивости, разработанный в 1932 г. американским ученым Г. Найквистом, позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по виду амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.

Пусть передаточная функция разомкнутой системы

$$W(s) = \frac{R(s)}{Q(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_m}{c_0 s^n + c_1 s^{n-1} + c_n}, \ m \le n$$
(5.1)

Подставляя в (5.1)  $s = j\omega$ , получаем частотную передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W(j\omega) = \frac{R(j\omega)}{Q(j\omega)} = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + b_m}{c_0(j\omega)^n + c_1(j\omega)^{n-1} + c_n} = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\psi(\omega)}$$
(5.2)

где  $U(\omega)$  и  $Y(\omega)$  – действительная и мнимая части частотной передаточной функции соответственно; модуль  $A(\omega)$  и фаза  $\psi(\omega)$  частотной передаточной функции равны  $A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \psi(\omega) = Arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.$ 

Если изменять частоту  $\omega$  от  $-\infty$  до  $\infty$ , то вектор  $W(j\omega)$  будет меняться по величине и фазе. Кривую, описываемую концом этого

вектора в комплексной плоскости, называют амплитудно-фазовой характеристикой разомкнутой системы (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы.

Амплитудно-фазовая характеристика симметрична относительно вещественной оси, поэтому обычно вычерчивают только ту часть ее, которая соответствует положительным частотам  $\omega > 0$  (сплошная линия на рис. 5.1), а ветвь этой характеристики, соответствующая отрицательным частотам  $\omega < 0$  (пунктирная линия на рис. 5.1), может быть найдена как зеркальное отражение ветви, соответствующей положительным частотам, относительно вещественной оси.

Рассмотрим вспомогательную функцию

 $\varphi(s) = 1 + W(s) = 1 + R(s)/Q(s) = [Q(s) + R(s)]/Q(s), = D(s)/Q(s),$  (5.3) ГДе  $D(s) = Q(s) + R(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} \dots + a_n -$  характеристический полином замкнутой системы;  $Q(s) = c_0 s^n + c_1 s^{n-1} + \dots + c_n$ характеристический полином разомкнутой системы;  $R(s) = b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_m -$  полином степени m.

Заметим, что так как в реальных системах степень полинома R(s) не выше степени полинома Q(s), т. е.  $m \le n$ , то степени числителя и знаменателя дроби (5.3) одинаковы и равны n.

Подставляя в (5.3)  $s = j\omega$ , получим

$$\varphi(s) = 1 + W(j\omega) = \left[Q(j\omega) + R(j\omega)\right]/Q(j\omega) = D(j\omega)/Q(j\omega).$$
(5.4)

Пусть характеристическое уравнение замкнутой системы D(s)=0 имеет m правых корней и n-m левых корней, а характеристическое уравнение разомкнутой системы Q(s)=0 имеет l правых и n-l левых корней.

При изменении частоты  $\omega$  от  $-\infty$  до  $\infty$  изменение угла поворота вектора  $\varphi(j\omega)$  на основе принципа аргумента будет

$$\Delta Arg \varphi(j\omega) \bigg|_{\omega = -\infty}^{\omega = \infty} = \Delta Arg D(j\omega) - \Delta Arg Q(j\omega) = \pi [(n-m) - m] - \pi [(n-l) - l] = 2\pi (l-m) (5.5)$$

Для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы все корни ее характеристического уравнения были левыми, т. е. m=0. Отсюда суммарный поворот вектора  $\varphi(j\omega)$ устойчивой системы вокруг начала координат должен быть равен

$$\Delta Arg \varphi(j\omega) \bigg|_{\omega = -\infty}^{\omega = \infty} = 2\pi l$$
(5.6)

где *l* – число правых корней характеристического уравнения разомкнутой системы.

Обычно рассматривают только положительные частоты  $\omega > 0$ , в этом случае угол поворота вектора  $\varphi(j\omega)$  будет вдвое меньше,

т. е.

$$\Delta Arg \varphi(j\omega) \begin{vmatrix} \omega = \infty \\ \omega = 0 \end{vmatrix} = \pi l = 2\pi l/2$$
(5.7)

Таким образом, если разомкнутая система является неустойчивой и имеет l правых корней, то замкнутая система будет устойчива тогда и только тогда, когда амплитудно-фазовая характеристика вспомогательной, функции  $\varphi(j\omega)$  при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$  охватывает начало координат в положительном направлении l/2 раз.

#### 5.4.Инструкция для выполнения работы

Для проверки устойчивой системы по критериям Найквист открываетсяили создаетсянеобходимое окно вструктурной схеме моделей. Затем установим вход в системе блокаInputPointu выход в системе OutputPointв пакете Simulink- Tools\LinearAnalysisкак показано в лаб.3. ВокнеLTI ViewerвыполнитькомандуSimulink\Get Linearized Model. Здесь на экране показываетсяреакция для h(t)- переходной характеристики. Для создания диаграммы Найквист в окне **LTIViewer**нажимаем левую кнопку мыши.Здесь появляется окно преобразования характеристики. (рис.5.2).



Рис.5.2. Переходная характеристика системы.

Здесь выбираем пункт **nyquist** и получим диаграмму Найквист (рис.5.3).



Рис.5.3. Диаграмма Найквиста.

### Порядок выполнения работы

- 1. Открыть программу**MatLAB**.
- 2. Открыть программную часть Simulink.
  - 3. Создать системную модель по вариантам окна.
  - 4. Создать частотную характеристику, открыть SimulinkLTI-Viewer.

- 5. Установить вход в системе блока**InputPoint**ивыход в системе блока**OutputPoint**.
- 6. Вокне**LTI Viewer**выполнитькоманду**Simulink\Get Linearized Model**.
- 7. В окне **LTIViewer**нажать левую кнопку мыши и выбрать диаграмму Найквист.
- 8. Преобразовать параметры модели и преобразованной моделей выбрать диаграмму Найквист.
- 9. Печатать диаграмму.
- 10. По созданной диаграмме проверить устойчивость системы.

## Содержание отчета

- 1.1. Цель работы.
- 1.2. Структурная схема исследуемой системы и численные значения параметров.
- 1.3. Рассчитанные и экспериментально найденные критические значения параметров.
- 1.4. График переходных процессов исследуемой системы.
- 1.5. График зависимости  $K_{rp}(T_2)$ .

## 5.4 Контрольные вопросы

1. Как формулируется основное условие устойчивости линейных систем?

2. Как по АФХ исследуемой разомкнутой системы найти  $k_{1 \kappa p}$ ?

3. Как, используя критерий Найквиста для замкнутой системы, найти критическое значение коэффициента разомкнутой системы?

# Варианты:



# Таблица 5.1.

	Передаточная функция							
	Инер-	Интег-	Пропор-	Колебатель-	Дифферен-	Инерци	Пропор-	
	циаль-	ральное	циональ-	ное звено	циальное	альное	цио-	
No	ное	звено	ное звено		звено	звено	нальное	
	звено					1-го	звено	
	1-го					порядка		
	порядка	TC	TC		TC		TC	
			K W				K W	
1	W <sub>1</sub>	$\mathbf{W}_1$ $\mathbf{W}_3$ $\mathbf{W}_5$ $\mathbf{W}_7$		$\mathbf{w}_{6}$	$\mathbf{w}_2$	<b>W</b> 4		
	1 0,1		9 W	1 0,2 0,3	<u> </u>	2 10		
2	<b>W</b> <sub>3</sub>	<u>W</u> <sub>7</sub>	<b>W</b> <sub>4</sub>	$W_1$	<b>W</b> <sub>5</sub>	W <sub>6</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>	
	1 0.1	0	10	2 0,1 0,6	4	22 7	19	
3	$W_7$	<b>W</b> <sub>5</sub>	$W_4$	<b>W</b> <sub>6</sub>	<b>W</b> <sub>1</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>	<b>W</b> <sub>3</sub>	
5	2 0.5	2	0	4 0,8 2	2	18 0.7	3	
Δ	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>	$W_4$	$W_7$	<b>W</b> <sub>5</sub>	
-	14 10	3	11	1 0,01 0,1	1	1 0.2	5	
5	<b>W</b> <sub>5</sub> <b>W</b> <sub>2</sub>		$W_6$	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_1$	$W_4$	
5	5 0.9 1 18		18	3 0,5 1	0	2 0.2	3	
6	W1         W3         W5         W7		W <sub>6</sub>	$W_2$	$W_4$			
0	2 1	4	17	\$ 0,9 2	6	1 0,1	5	
7	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$W_4$	<b>W</b> <sub>1</sub>	<b>W</b> 5	W6	<b>W</b> <sub>2</sub>	
/	8 0.4	3	22	2 0,7 3	3	8 9	0	
8	$W_7$	$W_5$	$W_4$	W <sub>6</sub>	$W_1$	$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>	
0	9 5	2	0	4 0,4 0,9	4	7 7	10	
0	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>	$W_4$	$W_7$	<b>W</b> <sub>5</sub>	
9	10 8	0	30	¢ 0,3 1,3	7	9 5	30	
10	<b>W</b> <sub>5</sub>	$W_2$	<b>W</b> <sub>6</sub>	<b>W</b> <sub>3</sub>	$W_7$	$\mathbf{W}_1$	$W_4$	
10	1 0,1	5	1	1 0,6 0,8	2	14 10	26	
11	<b>W</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{W}_7$	$\mathbf{W}_4$	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>5</sub>	<b>W</b> <sub>6</sub>	$W_2$	
11	22 9	0	2	3 0,1 2,5	6	11 9	22	
12	$W_7$	$W_5$	$\mathbf{W}_4$	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>	
12	24 7	1	0	1 0,55 3	5	15 3	20	
13	W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	<b>W</b> <sub>3</sub>	<b>W</b> <sub>2</sub>	$W_4$	$W_7$	<b>W</b> 5	
15	15 6	2	6	1,5 0,5	4	19 7	19	
1/	$W_5$	$W_2$	W <sub>6</sub>	<b>W</b> <sub>3</sub>	$W_7$	$\mathbf{W}_1$	$W_4$	
14	30 4	4	8	¢ 0,15   2	1	10 5	11	

							P •,			
15	W	$V_1$	$W_3$	$W_5$	$W_7$		<b>W</b> <sub>6</sub>	$V_6$ W <sub>2</sub>		$W_4$
13	7	3	5	7	5 0,8	1	2	3	1	0.8
16	W	77	$W_5$	$W_4$	W <sub>6</sub>		<b>W</b> <sub>1</sub>		$W_2$	<b>W</b> <sub>3</sub>
10	9	2	3	9	4 0,65	2,9	7	24	0.8	0
17	W	/ <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_1$	$W_3$	W	2	$W_4$		$W_7$	$W_5$
1/	3	5	2	14	3 0,3	4	1	26	8	21
10	W	15	$W_2$	$W_6$	<b>W</b> <sub>3</sub>		$W_7$	<b>W</b> <sub>1</sub>		$W_4$
10	4	0.2	4	0	8 0,5	2	1	29	8	17
10	W	$I_1$	$W_3$	$\mathbf{W}_5$	W	7	W <sub>6</sub>	ſ	$W_2$	$W_4$
19	26	10	2	11	1 0,63	0,7	5	30	2	12
20	W	/3	$\mathbf{W}_7$	$W_4$	$W_1$		<b>W</b> <sub>5</sub>		W <sub>6</sub>	$\mathbf{W}_2$
20	19	0.8	3	15	2 0,7	0,7	4	2	0,1	16

Продолжение табл.5.1.

Отчет по лабораторной работе № 5 Исследование устойчивости динамических систем по критериям Найквиста

Выполнил(а):

Проверила:

Вариант

Для создания диаграммы Найквиста в окне **LTIViewer**нажимаем левую кнопку мыши. Здесь появляется окно преобразования характеристики:



Рис.5.4. Переходная характеристика системы.

Здесь выбираем пункт nyquist и получим диаграмму Найквист:



Рис.5.5. Диаграмма Найквиста.

# Лабораторная работа №6 Качество процессов регулирования

## Цель работы:

- изучение основных качественных показателей системы в переходном и установившемся режимах

- определение статической и астатической ошибок САУ.

### 6.1. Основные теоретические сведения

Численные величины, характеризующие работу системы автоматического управления, носят название показателей качества, которые условно можно разделить на три группы:

a) показатели качества, характеризующие устойчивость системы;

б) показатели качества, характеризующие точность системы;

в) показатели качества, характеризующие качество переходных процессов.

Обеспечение устойчивости является необходимым условием функционирования любой системы управления и гарантирует затухание свободной или переходной составляющей процесса.

К этой первой группе показателей относятся запасы устойчивости по амплитуде  $\Delta L$  и фазе  $\Delta \phi$ .

После затухания свободной составляющей через достаточно большой промежуток времени в системе протекает установившийся процесс, который обуславливает точность системы. Показателями качества в данном случае выступают величины ошибок в установившемся режиме.

К третьей группе относятся показатели качества переходного процесса, которые характеризуют вид процесса для достаточно малых моментов времени после его начала. Эти показатели могут быть вычислены двумя способами. Первый – непосредственно по виду переходного процесса. В этом случае их называют прямыми оценками качества. Второй способ – это использование косвенных оценок показателей качества без построения кривой переходного процесса. На рис. 6.1 представлен наиболее распространенный вид переходной характеристики h(t).Для оценки качества регулирования по виду h(t) вводят следующие показатели качества:

 $t_p$  – время регулирования (время переходного процесса), это время, после которого величина  $|h(t) - h_y| < \Delta$ , где обычно величина  $\Delta = 5 \% h_y$ ;

 $\sigma = [(h_{\text{max}} - h_{\text{ycr}}) * 100\%] / h_{\text{ycr}}$ -перерегулирование в процентах;

 $\omega = 2\pi/T$  – частота колебаний переходного процесса;

М – число колебаний за время переходного процесса.



Рис. 6.1. Переходная характеристика h(t) системы.

Наиболее важными показателями качества являются  $t_p$  и  $_{\sigma}$ . Величина  $t_p$  может изменяться в широких пределах в зависимости от вида системы управления.

Перерегулирование обычно лежит в пределах от 0 до 30%. Число колебаний за время регулирования обычно 1 – 2, а иногда 3 – 4. В некоторых случаях колебания недопустимы.

По виду функции h(t) процессы делятся на три категории (рис. 6.2):

монотонные (1), апериодические (2)и колебательные (3).



#### Рис.6.2 Виды переходных процессов САУ

К косвенным оценкам качества относятся корневые оценки качества, интегральные оценки качества и частотные оценки.

Корни характеристического уравнения несут всю информацию о системе.По положению корней характеристического уравнения определяют:

- степень устойчивости;

- приближенно время переходного процесса;

- показатель колебательности в системе.

Степенью устойчивости η называется наименьшее из абсолютных значений вещественных частей корней характеристического уравнения

 $\eta = \min |\operatorname{Re} \lambda_i|,$ (6.1)

где  $\lambda_i$  – корни характеристического уравнения.

На комплексной плоскости – это расстояние от мнимой оси до ближайшего к ней корня или пары комплексно-сопряженных корней (рис. 6.3).



Рис. 6.3 Определение степени устойчивости

Связи между временем регулирования и степенью устойчивости имеет вид

$$t_p \cong \frac{3}{\eta}$$
. (6.2)

быстродействие Величина пхарактеризует предельное системы, поэтому иногда величину **ηНазывают** еще мерой быстродействия системы. Доминирующее влияние на характер переходного процесса оказывают ближайшие к мнимой оси корни. Если ближайшими являются комплексно-сопряженные корни наряду со степенью устойчивости вводят в  $\lambda_{1,2} = -\eta \pm j\beta$ , то рассмотрение колебательность (колебательность системы переходного процесса)  $\mu = \frac{|\beta|}{1-1}$ 

Возможна оценка качественных показателей системы по виду логарифмических частотных характеристик разомкнутой системы. Всю характеристику можно условно разбить по оси частот на три диапазона, как это показано на рис. 6.4, где НЧ – диапазон низких частот, СЧ – средних и ВЧ – высоких частот.



Рис. 6.4. Области ЛАЧХ системы.

Логарифмическая характеристика  $\Delta L$  в диапазоне НЧ влияет на точностные характеристики системы, так как первая асимптота определяется двумя величинами: *К* – коэффициентом усиления разомкнутой системы и <sub>v</sub> – порядком астатизма.

Область средних частот вблизи частоты среза  $\omega_c$  в значительной степени определяет такие показатели системы, как запасы устойчивости  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta L$ , время регулирования  $t_p$ , перерегулирование<sub> $\sigma$ </sub>, величину показателя колебательности M.

Перерегулирование, запас устойчивости по фазе и показатель колебательности характеризуют колебательные свойства системы и связаны между собой приближенными соотношениями:

$$\sigma \approx 73 - \Delta \varphi(\omega_c); M = \frac{60}{\Delta \varphi(\omega_c)}.$$
 (6.3)

Для определенного вида систем справедлива обратно пропорциональная зависимость времени переходного процесса и частоты среза:



Рис. 6.5. Структурная схема САУ

Точность САУ по отношению к задающему воздействию характеризуется величиной ошибки управления

$$e(t) = u(t) - y(t).(6.5)$$

Если  $e(\infty)=0$ , система называется астатической по отношению к задающему воздействию, в противном случае САУ –статическая. Величину e(t) можно оценить, зная передаточную функцию САУ по отношению к ошибке:

$$\Phi_e(s) = \frac{1}{1 + W(s)}, (6.6)$$

где $W(s) = W_1(s)W_2(s)$  – передаточная функция разомкнутой системы. Для астатической САУ передаточная функция имеет вид

$$W(s) = \frac{A(s)}{s^{\nu}B(s)},$$
(6.7)

где A(s), B(s)-полиномы, а v- порядок астатизма.

Для статической САУ v = 0 при входном сигнале вида v(t) = 1[t] величина статической ошибки  $e_{\hat{n}\hat{o}} = |e(\infty)|$  определяется равенством

$$e_{\rm cr} = \frac{1}{1+K} \cdot 100\%$$
, (6.8)

где К-коэффициент усиления разомкнутой системы.

При v = 1 (система с астатизмом первого порядка) при воздействиях вида v(t) = 1[t] и  $v(t) = v_1 t$  величина ошибки

соответственно для первого и второго типов входного сигнала определяется по формулам

$$e_y^0 = 0, \ e_y^1 = \frac{V_1}{K},$$
 (6.9)

где ошибку  $e_y^1$  будем называть ошибкой по скорости (скоростной ошибкой).

На рис. 6.6 показаны переходные процессы в различных системах при отработке скачка по положению и скорости: кривая 1 – для статической системы, 2 – для системы с астатизмом первого порядка, 3 – для системы с астатизмом второго порядка.



Рис. 6.6. Переходные процессы системы.

Точность САУ по отношению к возмущающему воздействиюf(t)можно оценить, используя соответствующую передаточную функцию по возмущению:

$$\Phi_f(s) = \frac{W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)}.(6.10)$$

Порядок астатизма системы по отношению к возмущению определяется числом интегрирующих звеньев, расположенных на структурной схеме до точки приложения возмущения и не охваченных местными обратными связями.

Выражение для ошибки в исследуемой системе (рис.6.7) имеет вид

$$e(s) = \frac{1}{1 + W_1(s)W_2(s)}V(s) - \frac{W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)}f(s).$$

При u(t)=const,f(t)=constможно найти статическую ошибку

$$e^{0} = \lim_{t \to \infty} e(t) = \lim_{s \to 0} \left( \frac{1}{1 + W_{1}(s)W_{2}(s)} V(s) - \frac{W_{2}(s)}{1 + W_{1}(s)W_{2}(s)} f(s) \right)$$

В статической системе ошибка  $e^0$  не равна нулю, и её абсолютная величина определяется значениями v и f, а также коэффициентом усиления разомкнутой системы: чем он больше, тем меньше ошибка. Однако необходимо помнить, что с увеличением коэффициента усиления уменьшается запас устойчивости системы, т.е. требования точности и устойчивости оказываются противоречивыми.

В астатической системе составляющая ошибки  $e^0$  от действия u=const всегда будет равна нулю, а от f=const обращается в ноль только в том случае, когда точка приложения возмущения «расположена» после интегратора.

#### 6.2 Порядок выполнения работы



# Рис. 6.7. Структурная схема исследуемой системы автоматического управления

Соответствующие передаточные функции имеют вид:

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1s+1}; W_2(s) = \frac{K_2}{s}; W_3(s) = \frac{K_3}{T_2s+1}.$$

Параметры *T*<sub>1</sub>, *T*<sub>2</sub>, *K*<sub>1</sub>, *K*<sub>2</sub>, *K*<sub>3</sub> для каждого варианта задания представлены в табл. 6.1.

На вход системы скачком подается задающее воздействие u(t) = 1[t]. Также имеются возмущающие воздействия  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$ , приложенные в разных точках прямого канала системы.

1.В соответствии с вариантом задания (см. таблицу 6.1) необходимо собрать цифровую модель исследуемой системы в пакете Matlab/Simulink. Подайте на вход модели ступенчатое воздействие  $u(t) = U_0 = \text{солst B}$  соответствии с номером варианта, возмущающие воздействия следует отключить. Получить с

помощью осциллографа Scope переходную характеристику CAУ h(t). Определить прямые показатели качества.

2. Получить графики расположения корней характеристического уравнения, используя LTI-Viewer. Определить косвенные оценки качества.

3.Повторить пункты 1и 2 при удвоенном значении входного сигнала. Сделать вывод о зависимости показателей качества от величины задающего воздействия.

4. Получить графики переходного процесса, расположения корней характеристического полинома при уменьшенном и увеличенном значении коэффициента усиления $K_1$ , а именно  $K_1=1,75$  и  $K_1=7$ . Определить прямые и косвенные показатели качества. Сделать вывод о влиянии коэффициента усиления на показатели качества процесса управления.

5.Получить графики переходного процесса, расположения корней характеристического полинома для следующих значений постоянной времени $T_1$ , а именно  $T_1=0,17$  с и  $T_1=0.25$ . Определить прямые и косвенные показатели качества. Сделать вывод о влиянии постоянной времени на показатели качества процесса управления. Построить ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы для заданного изменения значения  $T_1$  и определить запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

6. Определить показатели качества процесса управления относительно возмущающих воздействий. Снять графики *e*(*t*),*y*(*t*)при

a)  $U_0 = \text{const}, f_1(t) = U_{f1} = \text{const}, f_2(t) = 0;$ 

6)  $U_0 = \text{const}, \quad f_1(t) = 0, \quad f_2(t) = U_{f2} = \text{const}.$ 

7. Определить прямые показатели качества процесса управления. Рассчитать установившиеся ошибки и сравнить их с определенными путем моделирования. Сделать вывод о порядке астатизма системы по отношению к входному и возмущающим воздействиям.

### Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Структурная схема системы управления и ее параметры;

3.Кривые переходных процессов, распределения корней и найденные по ним прямые и косвенные показатели качества;

4. Расчет статических ошибок;

5. Логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы, запасы устойчивости;

6. Анализ результатов исследования по каждому пункту работы и общие выводы по работе.

	Гаолица 0.1							
Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_1$	3,5	4	5	3,8	3,5	5,2	4,8	6
<i>K</i> <sub>2</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>K</i> <sub>3</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>T</i> <sub>1</sub> ,c	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>T</i> <sub>2</sub> ,c	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$U_0$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
$U_{fl}$	2	3	5	1	4	2,5	2	4
$U_{f2}$	2	3	5	1	4	2,5	2	4
Параметр	9	10	11	12	13	14	15	16
$K_1$	3	3,5	4,2	5,3	3,2	6	5,4	3,8
<i>K</i> <sub>2</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>K</i> <sub>3</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
$T_1,c$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>T</i> <sub>2</sub> ,c	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$U_0$	2	3	5	1	4	2,5	2	4
$U_{fl}$	2	3	5	1	4	2.5	2	4
$U_{f2}$	2	3	5	1	4	2,5	2	4

#### Таблица 6.1

#### 6.4 Контрольные вопросы

1. Что понимают под качеством процесса управления?

2. Назовите показатели качества установившегося режима и переходного процесса.

3. Какие вы знаете оценки качества переходного процесса?

4. Чем отличаются прямые методы оценки качества переходного процесса от косвенных?

5. Как рассчитывается установившаяся ошибка относительно воздействия: а) задающего? б) возмущающего?

6. Какая система называется статической? Какая система называется астатической?

7. Как зависит точность системы от порядка ее астатизма? Как по структурной схеме определяется порядок астатизма системы?

## Отчет по лабораторной работе № 6

### Качество процессов регулирования

Выполнил:

Проверил:

Вариант

Структурная схема исследуемой системы автоматического управления



# Рис. 6.8. Структурная схема исследуемой системы автоматического управления

Соответствующие передаточные функции имеют вид:

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1s+1}; W_2(s) = \frac{K_2}{s}; W_3(s) = \frac{K_3}{T_2s+1}$$

С помощью Matlab/Simulink надо составлять модель системе



Рис. 6.9. Структурная схема исследуемой системы автоматического управления.

С помощью **Scope**надо составлять переходную характеристику системы



# Рис. 6.10. Структурная схема исследуемой системы автоматического управления

Для замкнутной системы надо построить ЛАЧХ и ЛФЧХ и определить запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

## Лабораторная работа № 7

### Проектирование регулятора для линейной системы

## Цель работы

 освоение методов проектирования регулятора для одномерной линейной непрерывной системы с помощью среды MATLAB

### Задачи работы

- научиться строить модели соединений линейных звеньев
- научиться использовать модуль **SISOTool**для проектирования простейших регуляторов

#### Описание системы

В работе рассматривается система стабилизации судна на курсе. Ее структурная схема показана на рис.7.1.



измерительная система

Рис.7.1. Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

$$\dot{\phi} = \omega_y$$
$$\dot{\omega}_y = -\frac{1}{T_s}\omega_y + \frac{K}{T_s}\delta$$

где  $_{\phi}$  – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса),  $\omega_{y}$  – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси,  $\delta$  – угол поворота вертикального руля относительно положения равновесия,  $T_{s}$  – постоянная времени,  $\kappa$  – постоянный коэффициент, имеющий

размерность *рад/сек*. Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)} \,.$$

Привод (рулевая машина) приближенно моделируется как интегрирующее звено

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s},$$

охваченное единичной отрицательной обратной связью.

Для измерения угла рыскания используется гирокомпас, математическая модель которого записывается в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией<sup>5</sup>

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1},$$

## Инструкция по выполнению работы

Основная часть команд вводится в командном окне среды МАТLAB. Команды, которые надо применять в других окнах, обозначены иконками соответствующих программ.

Этап выполнения задания	Команды МАТLАВ
1. Введите передаточную функцию модели судна $P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}$ как объект <b>tf</b> .	P = tf ( K, [Ts 1 0] )
2. Введите передаточную функцию интегрирующего звена $R_0(s) = \frac{1}{T_R s}$ .	R0 = tf ( 1, [TR 0] )
<ol> <li>Постройте передаточную функцию рулевого устройства, замкнув интегратор единичной отрицательной обратной связью.</li> </ol>	R = feedback (R0, 1)
<ol> <li>Постройте передаточную функцию последовательного соединения объекта с приводом.</li> </ol>	G = P * R
5. Постройте переходную характеристику для полученной модели и скопируйте ее в отчет через буфер обмена. Объясните, почему функция бесконечно возрастает и стремится к прямой. Каков коэффициент наклона этой прямой? Закройте окно с графиком.	step ( G )
<ol> <li>Постройте передаточную функцию измерительного</li> </ol>	H = tf(1, [Toc 1])
устройства $H(s) = \frac{1}{T_{oc}s+1}$ .	
---	---
<ol> <li>Постройте передаточную функцию разомкнутого контура.</li> </ol>	L = G * H
<ol> <li>Постройте ЛАФЧХ разомкнутой системы.</li> </ol>	bode ( L )
<ol> <li>Отметьте точки, определяющие пересечение ЛАЧХ с прямой 0 дБ и пересечение ЛФЧХ с прямой -180<sup>0</sup>.</li> </ol>	Figure No. 1 ∏KM – Characteristics – Stability (Minimum Crossing)
10. Определите, является ли замкнутая система устойчивой? Каковы запасы устойчивости по амплитуде (Gainmargin) и фазе (Phasemargin)? Какой регулятор неявно используется в этом случае? Скопируйте график ЛАФЧХ в отчет.	<mark>№ Figure №. 1</mark> ЛКМ на метках-кружках
<ol> <li>Найдите максимальный коэффициент усиления разомкнутой системы. Объясните этот результат.</li> </ol>	Figure №. 1 ПКМ – Characteristics – Peak Response
12. Закройте окно с ЛАФЧХ и запустите модуль <b>SISOTool</b> .	sisotool
13. Импортируйте передаточную функцию G как модель объекта ( <i>Plant</i> ) и <i>H</i> как модель датчика ( <i>Sensor</i> ). Блоки <i>F</i> (предфильтр) и <i>C</i> (регулятор) оставьте без изменений (равными 1).	SISO Design Tool File - Import
<ul> <li>Отключите изображение</li> <li>корневого годографа так, чтобы</li> <li>в окне осталась только ЛАФЧХ.</li> </ul>	<mark>∮ 5150 Design Tool</mark> View – Root Locus (отключить)
15. Для того, чтобы сразу видеть изменения переходных процессов, запустите	<b>J 5150 Design Tool</b> Analysis —

LTIViewer из верхнего меню окна SISOTool. Расположите два окна рядом, чтобы они не перекрывали друг друга.	Response to Step Command
16. Оставьте только график переходного процесса на выходе, отключив вывод сигнала управления.	<mark> → LTI Viewer</mark> ПКМ – Systems – Closed loop r to u
<ul> <li>17. Определите перерегулирование σ и время переходного процесса <i>т<sub>p</sub></i>.</li> <li>Скопируйте график в отчет.</li> </ul>	<ul> <li>ITT Viewer</li> <li>ITKM – Characteristics –</li> <li>Peak Response</li> <li>Settling Time</li> </ul>
18. Перейдите в окно SISOTool. Определите коэффициент усиления, при котором перерегулирование примерно равно 10%. Как изменилось время переходного процесса? Каковы запасы устойчивости в этом случае? Скопируйте график в отчет.	✓ 5150 Design Tool перетаскивание мышью ЛАЧХ, редактирование в поле <i>CurrentCompensator</i>
19. Перейдите в окно среды МАТLАВ и введите передаточную функцию пропорционально- дифференциального (ПД) регулятора $C_{pd}(s) = 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1}$ , где $T_v = 1$ сек, а $T_s$ – постоянная времени судна.	Cpd = 1 + tf ( [Ts 0], [Tv 1] )
20. Перейдите в окно <b>SISOTool.</b> Импортируйте регулятор <i>Cpd</i> как базовую модель для блока <i>C</i> .	<mark>J 5150 Design Tool</mark> File − Import, Cpd -> C
21. Определите дополнительный коэффициент усиления, при	✓ 5150 Design Tool перетаскивание мышью

котором перерегулирование примерно равно 10%. Найдите время переходного процесса и запасы устойчивости. Сравните пропорциональный и ПД- регуляторы. Скопируйте в отчет график переходного процесса.	ЛАЧХ, редактирование в поле <i>CurrentCompensator</i>
<ul> <li>Определите дополнительный коэффициент усиления, при котором время переходного процесса минимально.</li> <li>Скопируйте в отчет график переходного процесса.</li> </ul>	✓ 5150 Design Tool перетаскивание мышью ЛАЧХ, редактирование в поле <i>CurrentCompensator</i>
23. Экспортируйте полученный регулятор в рабочую область МАТLAB.	SISO Design Tool File – Export встолбце <i>Export as</i> сменитьимя Cpd на C кнопка <i>Export to workspace</i>
24. Постройте передаточную функцию в полученной замкнутой системе. Подумайте, почему получилось такое громоздкое выражение. Каков должен быть порядок передаточной функции?	W = C*G / (1 + C*G*H)
25. Постройте минимальную реализацию передаточной функции <i>W</i> .	W = minreal(W)
<ul> <li>26. Определите полюса передаточной функции замкнутой системы. Что означает близость некоторых полюсов к мнимой оси? Верно ли, что в этом случае будет малый запас устойчивости?</li> <li>27. Найдите коэффициент</li> </ul>	pole (W) dcgain (W)

усиления системы в установившемся режиме. Объясните результат. Есть ли у такой системы статическая ошибка при отслеживании постоянного сигнала? Почему? А для линейно возрастающего сигнала?	
28. Как изменится статический ко модель датчика примет вид $H(s) = \frac{2I}{T_{oc}}$	эффициент усиления, если <sup>К<sub>ос</sub></sup> +1 ?
29. Постройте минимальную реализацию передаточной функции замкнутой системы от входа к сигналу управления (выходу регулятора).	$Wu = minreal(C/(1 + C^*G^*H))$
30. Постройте изменение сигнала управления при единичном ступенчатом входном сигнале и скопируйте график в отчет. Объясните, почему сигнал управления стремится к нулю.	step ( Wu )

#### Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *MicrosoftWord* (шрифт основного текста **TimesNewRoman**, 12 пунктов, через 1,5 интервала, выравнивание по ширине). Он должен включать

- название предмета, номер и название лабораторной работы
- фамилию и инициалы авторов, номер группы
- фамилию и инициалы преподавателя
- номер варианта
- краткое описание исследуемой системы

 результаты выполнения всех пунктов инструкции, которые выделены серым фоном): результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.

При составлении отчета рекомендуется копировать необходимую информацию через буфер обмена из рабочего окна среды МАТLAB. Для этих данных используйте шрифт **CourierNew**, в котором ширина всех символов одинакова.

Таблица 7.1.

Вариант	$T_s$ , CEK	к, рад/сек	$T_R$ , CCK	<i>Т</i> <sub>oc</sub> , сек
1.	16.0	0.06	1	1
2.	16.2	0.07	2	2
3.	16.4	0.08	1	3
4.	16.6	0.07	2	4
5.	16.8	0.06	1	5
6.	17.0	0.07	2	6
7.	17.2	0.08	1	1
8.	17.4	0.07	2	2
9.	17.6	0.06	1	3
10.	17.8	0.07	2	4
11.	18.0	0.08	1	5
12.	18.2	0.09	2	6
13.	18.4	0.10	1	1
14.	18.6	0.09	2	2
15.	18.8	0.08	1	3
16.	19.0	0.07	2	4
17.	19.2	0.08	1	5
18.	19.4	0.09	2	6
19.	19.6	0.10	1	1
20.	18.2	0.0694	2	6

### Контрольные вопросы к защите

- 1. Как получить передаточную функцию по линейным дифференциальным уравнениям системы?
- 2. Как ввести передаточную функцию в окне MATLAB?
- 3. С помощью каких операций (функций) строятся вМАТLАВ модели параллельного и последовательного соединений, системы с обратной связью?
- 4. Как построить ЛАФЧХ разомкнутой системы?
- 5. Как определяются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе? Что означают эти величины? В каких единицах они измеряются?
- 6. Какие возможности предоставляет модуль **SISOTool**?
- 7. Что такое
  - корневой годограф
  - перерегулирование
  - время переходного процесса
- 8. Как влияет увеличение коэффициента усиления контура на ЛАФЧХ?
- 9. Почему в дифференцирующей части ПД-регулятора используется дополнительный фильтр в виде апериодического звена с постоянной времени *T<sub>v</sub>*?
- 10. Какие преимущества дает использование ПД-регулятора в сравнении с П-регулятором?
- 11. Как влияет увеличение коэффициента усиления контура на перерегулирование и время переходного процесса?
- 12. Как найти порядок передаточной функции замкнутой системы, зная характеристики всех ее блоков?
- 13. передаточной Связана ЛИ близость функции полюсов замкнутой системы мнимой оси С К малым запасом устойчивости?
- 14. Как зависит статический коэффициент усиления замкнутой системы от характеристик измерительного устройства?
- 15. Что такое астатическая система? Что такое порядок астатизма?

### Отчет по лабораторной работе № 7

**Проектирование регулятора** для линейной системы Выполнил(а):

Проверила:

Вариант

### Описание системы

Исследуется система управления судном по курсу, структурная схема которой показана на рис.7.2.



измерительная система

Рис.7.2. Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Движение судна описывается линейной математической моделью в виде передаточной функции

$$P(s) = \frac{K}{s (T_s s + 1)}$$
, где  $K = 0.0694$  рад/сек,  $T_s = 18.2$  сек,

Привод моделируется как интегрирующее звено

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s}, \qquad T_R = 2 \operatorname{cek},$$

охваченное единичной отрицательной обратной связью. Модель измерительного устройства представляет собой апериодическое звено с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1}, \quad T_{oc} = 6 \text{ cek},$$

#### 16. Исследование разомкнутой системы

а. Передаточная функции рулевого устройства

$$R(s) = \frac{1}{2s+1}.$$

 Б. Передаточная функция последовательного соединения объекта с приводом

$$G(s) = \frac{0.0694}{36.4s^3 + 20.2s^2 + s}$$

с. Переходная характеристика этой модели:



График стремится к наклонной прямой, потому что ... Наклон асимптоты равен ...

d. ЛАФЧХ разомкнутой системы



- е. Система с регулятором *C*(*s*) = ... устойчива, запасы устойчивости: по амплитуде 7,12 дБ, по фазе 26 градусов.
- f. Максимальный коэффициент усиления разомкнутой системы равен ... Это объясняется тем, что ...

## 17. Исследование системы с пропорциональным (П-) регулятором

а. Переходная функция замкнутой системы при *C*(*s*) = ...



- b. Время переходного процесса  $T_{ii} = 305 \,\text{сек}$ , перерегулирование  $\sigma = 51\%$ .
- с. Для обеспечения перерегулирования не более 10% требуется уменьшить коэффициент усиления регулятора до значения

C(s) = 0.348

d. Переходная функция скорректированной замкнутой системы при *C*(*s*) = 0.348



- е. Время переходного процесса  $T_{ii}$  =171 сек,
- f. Запасы устойчивости: по амплитуде 16,3 дБ, по фазе 57.9 градуса.

## 18. Исследование системы с пропорциональнодифференциальным (ПД-) регулятором

а. Общий вид передаточной функции регулятора

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_s s}{T_v + 1}\right),$$
 ГДС  $T_s = 18.2 \text{ сек}, T_v = 1 \text{ сек},$ 

а коэффициент *к*<sub>c</sub> должен быть выбран в процессе проектирования в соответствии с требованиями к системе.

## 4.1 Регулятор, обеспечивающий перерегулирование 10%

- b. Для обеспечения перерегулирования 10% требуется выбрать  $K_c = 0.942$
- с. Переходная функция скорректированной замкнутой системы



- d. Время переходного процесса  $T_{ii}$  = 52 сек,
- е. Запасы устойчивости: по амплитуде 15.9 дБ, по фазе 60.2 градусов.
- f. В сравнении с П-регулятором, использование ПД-регулятора позволяет ...

# 4.2 Регулятор, обеспечивающий кратчайший переходный процесс

- g. Для обеспечения минимального времени переходного процесса требуется выбрать  $K_c = 0.704$
- h. Переходная функция скорректированной замкнутой системы



- і. Время переходного процесса  $T_{ii} = 34 \, \text{сек},$
- j. Запасы устойчивости: по амплитуде 18.4 дБ, по фазе 67.3 градуса.
- k. Передаточная функция замкнутой системы

0.025771 (s+0.05208) (s+0.1667)

-----

(s+0.9892) (s+0.5459) (s+0.04826)  $(s^2 + 0.1382s + 0.008584)$ 

- 1. Порядок передаточной функции равен 5, потому что ...
- т. Полюса передаточной функции

-0.9892 -0.5459 -0.0691 + 0.0617i -0.0691 - 0.0617i -0.0483

- n. Близость полюсов к мнимой оси означает, что ... При этом запас устойчивости ...
- о. Коэффициент усиления системы в установившемся режиме равен ... Это объясняется тем, что ...
- р. При постоянном сигнала установившаяся ошибка ..., потому что ...
- q. При линейно возрастающем сигнале установившаяся ошибка ..., потому что ...
- r. При использовании датчика, описываемого моделью  $H(s) = \frac{2K_{oc}}{T_{oc}+1}$ , коэффициент усиления в установившемся

режиме будет равен ..., потому что ...

- s. Полученная система является астатической, то есть, отслеживает без ошибки постоянный входной сигнал. Это определяется тем, что ...
- t. При линейно возрастающем сигнале ...
- u. Передаточная функция замкнутой системы от входа к сигналу управления

13.5168 s (s+0.05208) (s+0.05495) (s+0.1667) (s+0.5)

-----

(s+0.9892) (s+0.5459) (s+0.04826)  $(s^2 + 0.1382s + 0.008584)$ 

v. Изменение сигнала управления при единичном ступенчатом входном сигнале



w. Сигнал управления стремится к нулю, потому что ...

## Лабораторная работа № 8

#### Моделирование систем управления в пакете SIMULINK

### Цель работы

• освоение методов моделирования линейных систем в пакете SIMULINK

#### Задачи работы

- научиться строить и редактировать модели систем управления в пакете SIMULINK
- научиться изменять параметры блоков
- научиться строить переходные процессы
- научиться оформлять результаты моделирования
- изучить метод компенсации постоянных возмущений с помощью ПИД-регулятора

#### Описание системы

В работе рассматривается система управления судном по курсу. Ее структурная схема показана на рис.8.1.



измерительная система

Рис.8.1.Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

$$\dot{\phi} = \omega_y$$
$$\dot{\omega}_y = -\frac{1}{T_s}\omega_y + \frac{K}{T_s}\delta$$

где  $\varphi$  – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса),  $\omega_y$  – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси,  $\delta$  – угол

поворота вертикального руля относительно положения равновесия, *т*<sub>s</sub> – постоянная времени, *к* – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*. Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)} \,.$$

Привод (рулевая машина) приближенно моделируется как интегрирующее звено, охваченное единичной отрицательной обратной связью, так что его передаточная функция равна

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

Для измерения угла рыскания используется гирокомпас, математическая модель которого записывается в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией<sup>6</sup>

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1} \,.$$

Исследуются переходные процессы в системе при использовании ПД-регулятора

$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1} \right),$$

и ПИД-регулятора

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1}\right) + \frac{1}{T_I s}.$$

Этап выполнения задания	Команды MATLAB
<ol> <li>Для запуска пакета SIMULINКщелкните по кнопке</li> <li>в командном окне MATLAВили введите командуsimulinkв командной строке.</li> </ol>	simulink
2. Создайте новую модель с	Simulink Library Browser
помощью верхнего меню	File – New – Model

#### Инструкция по выполнению работы

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Численные значения *K*, *T<sub>s</sub>*, *T<sub>R</sub>* и *T<sub>oc</sub>* надо взять из таблицы в конце файла. Они должны совпадать с данными, которые использовались Вами в лабораторной работе № 2.

	открывшегося окна SimulinkLibraryBrowser.	
3.	Перетащите блок <b>TransferFcn</b> (передаточная функция) из окна <i>SimulinkLibraryBrowser</i> (группа <i>Continuous</i> ) в окно модели и введите числитель и знаменатель передаточной функции модели судна.	Двойной щелчок на блоке a. Numerator [K] b. Denominator [Ts 1 0]
4.	Дайте блоку название Судно.	ЛКМ на имени блока
5.	Аналогично добавьте еще три блог их <b>Привод, Регулятор</b> и <b>Гироком</b> параметры. Заметьте, что передато быть $R(s) = \frac{1}{T_R s + 1}$ с учетом внутренн	ка типа <b>Transfer Fcn</b> , назовите ипас, введите нужные очная функция привода должна ей обратной связи.
6.	Сохраните модель в своей папке под именем <b>lab3.mdl<sup>7</sup></b> .	File – Save
7.	Выделите блок Гирокомпас и разверните его в другую сторону.	Нажать Ctrl+I или дважды нажать Ctrl+R.
8.	Сделайте, чтобы названия блоков Судно, Привод и Регулятор были над блоками.	ПКМнаблоке, Format - Flip name
9.	Выберите цвет блоков на свой вкус.	ПКМнаблоке, Format – Background color
10	<ol> <li>Перетащите в окно модели блок Sum из группы MathOperations и установите его слева от регулятора.</li> </ol>	ЛКМ
11	. Сделайте так, чтобы второй вход учитывался в сумме со знаком минус (отрицательная обратная связь).	Двойной щелчок на блоке, ввести  +- в поле List of signs
12	2. Перетащите в окно модели блок <b>Step</b> из группы <b>Sources</b> и	

установите его слева от сумматора. Дайте ему имя Заданный курс.	
<ol> <li>Установите время подачи сигнала 0 и величину сигнала 10 (исследуем поворот на 10 градусов).</li> </ol>	Двойной щелчок на блоке, 0 в поле Steptime 10 вполе Final value
14. Соедините все блоки нужным способом.	ЛКМ на источнике, удерживать Ctrl и ЛКМ на приемнике, или протащить ЛКМ от выхода одного блока к входу другого
15. Перетащите в окно модели два блока <b>Scope</b> (осциллограф) из группы <b>Sinks</b> и установите их в правой части. Назовите их <b>Руль</b> и <b>Курс</b> .	
16. Сделайте, чтобы на первый блок Scope поступал сигнал управления (угол поворота руля, после блока Привод), а на второй – сигнал выхода (курс судна). Сохраните модель.	Нажать ПКМ на линии в точке отбора сигнала, затем, не отпуская ПКМ, тащить линию к входу блока.
17. Уменьшите окно до минимального размера, при котором видны все элементы, и скопируйте модель в буфер обмена. Затем вставьте ее из буфера обмена в отчет.	Edit – Copy model to clipboard
<ol> <li>Установите время моделирования 100 секунд.</li> </ol>	Simulation – Simulation parameters 100 вполе Stop time
19. Выполните моделирование.	💵 🔤 ЛКМ по кнопке 🕨
20. Посмотрите результаты моделирования, открыв окна для	🙀 lab 8

блоков Курс и Руль.	Двойной щелчок по блоку	
21. Настройте масштаб по осям в окнах обоих блоков,	Курс ЛКМ по кнопке А – установить оптимальный масштаб	
22. Сохраните настройки,	<b>Мкурс</b> ЛКМ по кнопке 🛅	
23. Сделайте так, чтобы результаты моделирования передавались с обоих блоков Scope в рабочую область МАТLАВВ виде матриц, в которых первый столбец – время, а второй – сигнал (курс или угол поворота руля).	<ul> <li>№урс</li> <li>ЛКМ по кнопке </li> <li>вкладка Datahistory</li> <li>Limit data points</li> <li>Save data to workspace</li> <li>Variable name: phi (Курс) или delta (Руль)</li> <li>Format: Array</li> </ul>	
24. Выполните моделирование еще раз.	<b>ы</b> в ЛКМ по кнопке <b>•</b>	
25. Перейдите в командное окно МАТLАВ и создайте новое окно для графика. В одном окне будут построены две кривых на разных осях.	figure(1);	
26. Разбейте окно на 2 части по вертикали и сделайте активным первый график. Первое число в команде subplotозначает количество ячеек с графиками по вертикали, второе – по горизонтали, третье – номер ячейки, которую надо сделать активной <sup>8</sup> .	subplot(2, 1, 1);	
27. Постройте график изменения курса. В команде <b>plot</b> сначала указывают массив абсписс. затем	plot(phi(:,1),phi(:,2));	

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> При вводе этой и следующих команд окно с графиком не появляется на экране. Чтобы увидеть изменения, надо вручную сделать его активным, щелкнув мышью на соответствующей кнопке в панели задач.

<ul> <li>– массив ординат. Двоеточие</li> <li>означает, что используются все</li> <li>строки.</li> </ul>		
28. Введите заголовок графика.	title('Kypc');	
<ul> <li>29. Введите названия осей координат. Внутри апострофов для ввода греческих букв разрешается использовать команды LaTeX, Например, «\phi» означает греческую букву <i>φ</i>, а «\delta» – букву <i>δ</i>.</li> </ul>	xlabel('Время, сек'); ylabel('\phi, градусы');	
30. Аналогично постройте во второй ячейке график изменения угла поворота руля, используя данные из массива <b>delta</b> , полученного в результате моделирования.	subplot(2, 1, 2); plot(delta(:,1),delta(:,2)); title('Уголповоротаруля'); xlabel('Время, сек'); ylabel('\delta, градусы');	
<ol> <li>Скопируйте построенный график в отчет.</li> </ol>	print -dmeta	
<ol> <li>Удалите в окне модели связь между приводом и объектом.</li> </ol>	🕅 Iab8 ЛКМ по линии, нажать Delete.	
33. Добавьте еще один блок Sum из группы MathOperations и установите его на освободившееся место. Настройте расположение входов и выхода так, чтобы первый вход был в верхней части круга	Двойной щелчок по блоку ++  в поле Listofsigns	
34. Исследуем реакцию системы на постоянный сигнал, приложенный непосредственно к входу объекта. Он может моделировать какое-то постоянное возмущающее воздействие, например, влияние ветра.		
35. Скопируйте блок Заданный курс, перетащив его правой кнопкой мыши, и установите для него величину скачка 2 градуса.	<ul> <li>Перетаскивание ПКМ.</li> <li>Двойной щелчок по блоку</li> <li>2 в поле FinalValue</li> </ul>	

Дайте ему название Возмущение. Подключите его выход к новому сумматору. Достройте нужные соединительные линии.	Двойной щелчок по имени	
36. Скопируйте полученную модель в отчет.	Edit – Copy model to clipboard	
<ol> <li>Увеличьте время моделирования до 500 и выполните моделирование.</li> <li>Проверьте, вышло ли судно на заданный курс 10 градусов.</li> </ol>	<b>№lab8</b> Simulation – Simulation parameters - Stop time ЛКМпокнопке	
38. Постройте передаточную функцию по возмущению замкнутой системы с ПД-регулятором. С ее помощью объясните результат, полученный на предыдущем шаге.		
39. Для этой передаточной функции вычислите коэффициент усиления в установившемся режиме. С его помощью рассчитайте установившееся значение сигнала выхода при заданном курсе 10 градусов и постоянном возмущении, эквивалентном 2 градусам поворота руля. Совпадает ли это число с результатами молелирования?		
40. Перейдите в командное окно МАТLАВ и запомните результаты моделирования в новых массивах. Они понадобятся для того, чтобы сравнить исходный и скорректированный варианты системы.	phi0 = phi; delta0 = delta;	
41. Чтобы регулятор компенсировал постоянную составляющую возмущения, надо добавить в него интегральный	Boomyngenne Perynarosp Dputog Sagarnun Sagarnun rypo Tipoxoanao Tipoxoanao Tipoxoanao Tipoxoanao	

канал. Таким образом, получается ПИД-регулятор. Подключите параллельно регулятору интегрирующее звено с передаточной функцией $\frac{1}{T_i s}$ , $T_i = 200$ сек. Сохраните модель и скопируйте ее в отчет.		
<ol> <li>Выполните моделирование.</li> <li>Проверьте, вышло ли судно на заданный курс 10 градусов.</li> </ol>	<b>№ 1</b> аБ8 ЛКМпокнопке	
<ol> <li>43. Постройте передаточную функт системы с ПИД-регулятором. С ее полученный на предыдущем шаге.</li> </ol>	цию по возмущению замкнутой помощью объясните результат,	
44. Для этой передаточной функции вычислите коэффициент усиления в установившемся режиме. С его помощью рассчитайте установившееся значение сигнала выхода. Совпадает ли это число с результатами моделирования?		
45. Постройте в верхней части графика 2 кривых – переходные процессы по курсу для ПД- и ПИД-регуляторов. В команде <b>plot</b> можно перечислять несколько пар массивов – первая пара соответствует первому графику, вторая – второму и т.д. Три точки в конце строки означают перенос команды на следующую строку. Команда <b>legend</b> служит для вывода легенды – символьных строк, описывающих каждый из построенных графиков.	subplot(2, 1, 1); plot(phi0(:,1), phi0(:,2), phi (:,1), phi(:,2)); title('Kypc'); xlabel('Bpeмя, ceк'); ylabel('Phi, градусы'); legend('ПД-регулятор', 'ПИД-регулятор');	
<ul> <li>46. Аналогично постройте в нижней части графика 2 кривых</li> <li>изменение угла перекладки руля для ПД- и ПИД-</li> </ul>		

регуляторов, используя данные из массивов <b>delta0</b> и <b>delta</b> .	
47. Скопируйте построенный графи Сделайте выводы о влиянии интегу процессы в системе.	ик в отчет через буфер обмена. рального канала на переходные
48. Постройте передаточную функцию разомкнутой системы с ПИД-регулятором.	
49. Определите запасы устойчивости системы с ПИД- регулятором. Являются ли они достаточными?	[gm,phim]=margin(W) gm = 20*log10(gm)

## Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *MicrosoftWord* (шрифт основного текста **TimesNewRoman**, 12 пунктов, через 1,5 интервала, выравнивание по ширине). Он должен включать

- название предмета, номер и название лабораторной работы
- фамилию и инициалы авторов, номер группы
- фамилию и инициалы преподавателя
- номер варианта
- краткое описание исследуемой системы
- результаты выполнения всех пунктов инструкции, которые выделены серым фоном (см. ниже): результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.

При составлении отчета рекомендуется копировать необходимую информацию через буфер обмена из рабочего окна среды МАТLAB. Для этих данных используйте шрифт **CourierNew**, в котором ширина всех символов одинакова.

## Таблица.8.1.

Вариант	$T_s$ , CEK	к, рад/сек	$T_R$ , CCK	<i>Т</i> <sub>oc</sub> , сек
1.	16.0	0.06	1	1
2.	16.2	0.07	2	2
3.	16.4	0.08	1	3
4.	16.6	0.07	2	4
5.	16.8	0.06	1	5
6.	17.0	0.07	2	6
7.	17.2	0.08	1	1
8.	17.4	0.07	2	2
9.	17.6	0.06	1	3
10	17.8	0.07	2	4
11	18.0	0.08	1	5
12	18.2	0.09	2	6
13	18.4	0.10	1	1
14	18.6	0.09	2	2
15	18.8	0.08	1	3
16	19.0	0.07	2	4
17	19.2	0.08	1	5
18	19.4	0.09	2	6
19	19.6	0.10	1	1
20	18.2	0.0694	2	6

## Контрольные вопросы к защите

- 10. См. все вопросы к работам № 1 и № 2.
- 11. Как найти передаточную функцию интегратора, охваченного обратной связью?
- 12. Как запуститьпакет SIMULINK?

- 13. Что такое Library Browser?
- 14. Какое расширение имеют файлы модели SIMULINK?
- 15. Как создать новую модель?
- 16. Как соединить два блока, имеющих соответственно свободный выход и свободный вход?
- 17. Как сделать, чтобы один и тот же сигнал поступал на несколько блоков?
- 18. Как передать результаты моделирования в рабочую область МАТLAB? В каком виде они передаются?
- 19. Как удалить блок или связь между блоками?
- 20. Как определить нужные масштабы для осей координат в окнах **Scope** и запомнить их?
- 21. Как скопировать блок в окне модели?
- 22. Как изменить знаки арифметических действий в сумматоре?
- 23. Как скопировать изображение модели в документ *MicrosoftWord*?
- 24. Как изменить время моделирования?
- 25. Как изменить название у блока?
- 26. Как сделать, чтобы название блока было с другой стороны?
- 27. Как изменить цвет фона блока? цвет надписи?
- 28. Как ввести параметры блока **TransferFcn** (передаточная функция)?
- 29. Как найти передаточную функцию системы по возмущению?
- 30. Почему при использовании ПД-регулятора система не компенсирует постоянное возмущение?
- 31. Как, зная статический коэффициент усиления по возмущению, определить установившееся отклонение от заданного курса?
- 32. Какими свойствами должна обладать передаточная функция по возмущению для того, чтобы постоянное возмущение полностью компенсировалось?
- 33. Какими свойствами должен обладать регулятор для того, чтобы постоянное возмущение полностью компенсировалось?
- 34. Какие преимущества дает использование интегрального канала в ПИД-регуляторе?

- 35. Почему порядок передаточной функции замкнутой системы по возмущению с ПИД-регулятором на 1 больше, чем для системы с ПД-регулятором?
- 36. Какие параметры принимает команда **subplot**?
- 37. Что означает двоеточие в записи **phi(:,1**)?
- 38. Как вывести на график заголовок и названия осей?
- 39. Как построить в одном окне два разных графика?
- 40. Как на одном графике построить несколько кривых?
- 41. Что такое легенда? Как вывести легенду на график?
- 42. Как выводить на графике буквы греческого алфавита?

## Отчет по лабораторной работе № 8 Моделирование систем управления в пакете SIMULINK

Выполнил(а):

Проверила:

Вариант

## Описание системы

Движение судна описывается линейной математической моделью в виде передаточной функции

$$P(s) = \frac{K}{s (T_s s + 1)},$$

где K = 0.0694 рад/сек,  $T_s = 18.2 \text{ сек}$ ,

Привод моделируется как интегрирующее звено, охваченное единичной отрицательной обратной связью, так что его передаточная функция равна

$$R(s) = \frac{1}{T_R s + 1}, \qquad T_R = 2 \operatorname{cer},$$

Измерительное устройство (гирокомпас) моделируется как апериодическое звено с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1}, \quad T_{oc} = 6 \text{ cek},$$

#### 3. Исследование системы с ПД-регулятором

• передаточная функция ПД-регулятора, обеспечивающего переходный процесс минимальной длительности

$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1} \right),$$

ГДе  $K_c = 0.7045$ ,  $T_s = 18.2 \,\text{сек}$ ,  $T_v = 1 \,\text{сек}$ ,

• модель системы с ПД-регулятором



• переходные процессы в системе с ПД-регулятором при изменении курса на 10 градусов



• модель системы с ПД-регулятором с учетом внешнего возмущения



• передаточная функция по возмущению для системы с ПД-регулятором

0.003813 s^3 + 0.006355 s^2 + 0.00286 s + 0.0003178

-----

 $s^{5} + 1.722 \ s^{4} + 0.8416 \ s^{3} + 0.1245 \ s^{2} + 0.008877 \ s + 0.0002239$ 

- судно с ПД-регулятором не вышло на заданный курс 10 градусов, потому что ...
- статический коэффициент усиления k<sub>s</sub> = 1.419, установившееся значение сигнала выхода должно быть равно φ<sub>∞</sub> = ..., потому что ...; эти данные согласуются с результатами моделирования

## 4. Исследование системы с ПИД-регулятором

• передаточная функция ПИД-регулятора

$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1} \right) + \frac{1}{T_I s},$$

где  $K_c = 0.7045$ ,  $T_s = 18.2 \text{ сек}$ ,  $T_v = 1 \text{ сек}$ ,  $T_I = 200 \text{ сек}$ ,

• модель системы с ПИД-регулятором с учетом внешнего возмущения



• передаточная функция по возмущению для системы с ПИДрегулятором

 $0.003813 \text{ s}^4 + 0.006355 \text{ s}^3 + 0.00286 \text{ s}^2 + 0.0003178 \text{ s}$ 

s^6 + 1.722 s^5 + 0.8416 s^4 + 0.1245 s^3 + 0.008877 s^2 +

0.0002255 s + 1.589e-006

- при использовании ПИД-регулятора судно выходит на заданный курс, потому что ...
- статический коэффициент усиления k<sub>s</sub> = ..., установившееся значение сигнала выхода должно быть равно φ<sub>∞</sub> = ..., потому что ...; эти данные согласуются с результатами моделирования
- переходные процессы в системах с ПД- и ПИД-регуляторами



- при использовании ПИД-регулятора вместо ПД-регулятора ... (что улучшилось?),
- при этом сигнал управления ... (как изменился?)
- в то же время ... (что ухудшилось?)
- передаточная функция разомкнутой системы с ПИДрегулятором

0.004298 s<sup>2</sup> + 0.0002255 s + 1.589e-006

\_\_\_\_\_

 $s^{6} + 1.722 s^{5} + 0.8416 s^{4} + 0.1245 s^{3} + 0.004579 s^{2}$ 

• запас устойчивости по амплитуде  $g_m = 18.4 \text{ дБ}$ , по фазе  $\varphi_m = 63^\circ$ , запасы являются достаточными

## Лабораторная работа № 9 Моделирование нелинейных систем управления

## Цель работы

• освоение методов моделирования нелинейных систем в пакете SIMULINK

#### Задачи работы

- научиться строить и редактировать модели с подсистемами
- научиться использовать нелинейные звенья типа «насыщение»
- научиться строить несколько графиков одновременно на одном осциллографе
- научиться составлять, редактировать и отлаживать скрипты
- научиться изменять свойства элементов графика (шрифт, толщину линии)

#### Описание системы

В работе рассматривается система управления судном по курсу. Ее структурная схема показана на рис.9.1.



измерительная система

## Рис.9.1.Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

$$\dot{\phi} = \omega_y$$
$$\dot{\omega}_y = -\frac{1}{T_s}\omega_y + \frac{K}{T_s}\delta$$

где  $_{\phi}$  – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса),  $\omega_y$  – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси,  $\delta$  – угол поворота вертикального руля относительно положения равновесия,  $T_s$  – постоянная времени,  $\kappa$  – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*. Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)} \,.$$

Линейная модель привода (рулевой машины) представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s},$$

охваченное единичной отрицательной обратной связью. На угол перекладки руля и скорость перекладки накладываются нелинейные ограничения

$$\left|\dot{\delta}(t)\right| < 3^{\circ}/\tilde{n}\dot{a}\hat{e}, \qquad \left|\delta(t)\right| < 30^{\circ}.$$

Для измерения угла рыскания используется гирокомпас, математическая модель которого записывается в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией<sup>9</sup>

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1},$$

В качестве управляющего устройства используется ПИДрегулятор с передаточной функцией

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_s s + 1}{T_v + 1}\right) + \frac{1}{T_I s}$$
, где  $T_v = 1 \text{ сек } \text{ и } T_I = 200 \text{ сек.}$ 

#### Инструкция по выполнению работы

Этап выполнения задания	Команды МАТLАВ	
<ol> <li>Сделайте свою папку рабочей папкой МАТLАВ.</li> </ol>	ЛКМ по кнопке cправа от поля CurrentDirectory	
2. Откройте окно рабочей папки.	View – Current directory	
3.Откройте модель, построенную в лабораторной	двойной щелчок на lab3.mdl	

работе № 3.	
4.Сохраните модель в своей папке под именем <b>lab4.mdl</b> .	File – Save as
5.Выделите мышью регулятор вместе с интегратором и преобразуйте его в подсистему.	Edit – Create subsystem
6.Дайте подсистеме имя Регулятор, расположите название сверху и выберите фоновый цвет на свой вкус.	Двойной щелчок на имени ПКМ – Format – Flipname ПКМ – Background color
7.Определите для входа и выхода этого блока имена е и <b>и</b> соответственно.	Двойной щелчок на блоке ЛКМ на имени входа или выхода
8.Аналогично постройте подсистему <b>Привод</b> с входом <b>u</b> и выходом <b>delta</b> и подсистему <b>Судно</b> с входами <b>f</b> и <b>delta</b> и выходом <b>phi</b> . Сохраните модель и скопируйте ее через буфер обмена в отчет.	Восмущение Судно Регулатор Принод Заданный куро Гирокомпас Босни Куро
9.Обведите мышью (при нажатой ЛКМ) все блоки, кроме источников сигналов и осциллографов. Создайте подсистему <b>Линейная система</b> с входами <b>r</b> (заданный курс) и <b>f</b> (возмущение) и выходами <b>phi</b> и <b>delta</b> .	Edit – Create subsystem
10.Скопируйте блок Линейная система и измените его имя на Нелинейная система. Подключите к входам нового блока те же сигналы (заданный курс и возмущение), что и для первого блока. Установите для блока линейной системы желтый	Перетащить с помощью ПКМ Format – Background color

фоновый цвет, а для нелинейной – фиолетовый.	
<ul> <li>11.Откройте подсистему</li> <li>Привод в нелинейной системе.</li> <li>Мы построим нелинейную</li> <li>модель привода, учитывая</li> <li>ограничения на угол перекладки</li> <li>руля и скорость его изменения.</li> </ul>	Двойной щелчок на блоке
12.Удалите соединительные линии.	ЛКМ на элементе, нажать Delete.
13.Измените передаточную функцию на $R_0(s) = \frac{1}{T_R s}$ .	Двойной щелчок на блоке • Denominator
14.Откройте окно Library Browser.	View – Library Browser
15.Перетащите в окно модели блок <b>Sum</b> из группы <b>MathOperations</b> . Измените его так, чтобы организовать отрицательную обратную связь.	Двойной щелчок на блоке  +- в поле Listofsigns
16. Перетащите в окно модели (насыщение) из группы <b>Discon</b> и перед интегратором (ограничен второй – после (ограничение на	и два блока <b>Saturation</b> t <b>inuities</b> . Расположите один блок ние на скорость перекладки), а угол перекладки).
17. Введите нужные пределы допустимых значений, так чтобы скорость перекладки руля была не более 3 градусов в секунду, а угол перекладки – не более 30 градусов. В отчете укажите все установленные значения.	Двойной щелчок на блоке • Upper limit • Lower limit
<ul> <li>18. Соедините блоки нужным способом. Сохраните модель.</li> <li>Скопируйте схему нелинейной подсистемы Привод в отчет.</li> <li>19. Закройте пишине окиза и нерей.</li> </ul>	
<ul> <li>соедините олоки нужным способом. Сохраните модель.</li> <li>Скопируйте схему нелинейной подсистемы Привод в отчет.</li> <li>Закройте лишние окна и перейд</li> </ul>	ците в главное окно модели.

Освободите оба осциллографа от связей, перетащив их вправо при нажатой клавише **Shift**.

- 20. Перетащите в окно модели два блока **Мих** (мультиплексор) из группы **Signal Routing**. Эти блоки служат для объединения сигналов в «жгут» (многожильный кабель).
- 21. Соедините входы первого блока с сигналами управления (**delta**) линейной и нелинейной систем, а выход с входом осциллографа **Руль**.
- Аналогично соедините входы второго мультиплексора с сигналами выхода (**phi**) линейной и нелинейной систем, а выход – с входом осциллографа **Курс.**
- Сохраните модель и скопируйте ее через буфер обмена в отчет.



- 24. Установите заданный курс 10 градусов и возмущение 0. Выполните моделирование и посмотрите результаты. Жёлтый график показывает изменение первого входа осциллографов – (линейная система), фиолетовый – второго (нелинейная система).
- 25. Объясните расхождение между результатами моделирования линейной и нелинейной системы. Какое нелинейное звено существенно влияет на результат?

26. Создайте новый М-файл.	File – New – M-file
27. В окне редактора введите команды для вывода графиков переходных процессов по курсу. Теперь массив <b>phi</b> содержит 3 столбца: время и сигналы с двух входов осциллографа (выходы линейной и нелинейной системы). Весь текст справа от знака % считается комментарием. Третий параметр команды <b>plot</b> означает цвет: <b>'b'</b> – синий, <b>'g'</b> – зеленый, <b>'r'</b> –	figure(1); % открытьрис. 1 subplot(2,1,1); plot(phi(:,1),phi(:,2),'b'); hold on; plot(phi(:,1),phi(:,3),'g'); hold off; legend('Линейнаясистема', 'Нелинейная система')

красный и т.д. (см. справку по этой команде). Команда hold onoзначает, что не надо стирать старый график, hold off – надо.				
<ol> <li>Сохраните файл под именем lab4graph.m.</li> </ol>	File - Save			
29. Запустите файл (скрипт) на выполнение. Если график не появился на экране, смотрите сообщения об ошибках в командном окне МАТLAB.	клавиша F5			
30. Увеличьте размер шрифта, вставив эту команду сразу после вызова <b>subplot</b> . Здесь <b>gca</b> означает текущие оси координат ( <i>getcurrentaxis</i> ). Еще раз запустите скрипт.	set(gca,'FontSize',16);			
<ol> <li>Добавьте в скрипт название графика и осей координат, так же, как и в работе № 3.</li> </ol>	title('Поворот на 10 градусов') xlabel('Время, сек'); ylabel('\phi, град');			
32. Увеличьте толщину линий. С помощью функции <b>get</b> мы сначала получаем массив указателей (хэндлов, <i>handle</i> ) на все объекты-линии. Затем с помощью функции set устанавливаем для каждой линии свойство <b>LineWidth</b> (толщина линии), равное 1,5 пункта. Сохраните файл и запустите его на выполнение.	h = get(gca, 'Children') set(h(1),'LineWidth',1.5) set(h(2),'LineWidth',1.5)			
33. Добавьте в скрипт команды, с помощью которых в нижней половине окна на одном графике строятся кривые изменения сигнала управления в линейной и нелинейной системах. Не добавляйте заголовок для этого графика (он будет мешать				

верхнему графику).

34.	Добейтесь,	чтобы скр	ипт работал	правильно.	Скопируйте	текст
скр	рипта в отче	ЭТ.				

35. Запустите скрипт на выполнение. Скопируйте полученный график в отчет.

36. Измените величину заданного курса на 90 градусов и снова проведите моделирование.	Павя Двойной щелчок на блоке Заданный курс ввести 90 в поле Finalvalue
37. Перейдите в окно редактора и измените название графика на «Поворот на 90 градусов». Снова запустите скрипт и скопируйте построенный график в отчет.	title('Поворот на 90 градусов') клавиша F5 print -dmeta
38. Объясните, почему расхождени	е получилось такое

существенное расхождение между линейной и нелинейной моделями? Как теперь нелинейности влияют на результат?

## Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *MicrosoftWord* (шрифт основного текста **TimesNewRoman**, 12 пунктов, через 1,5 интервала, выравнивание по ширине). Он должен включать

- название предмета, номер и название лабораторной работы
- фамилию и инициалы авторов, номер группы
- фамилию и инициалы преподавателя
- номер варианта
- краткое описание исследуемой системы
- результаты выполнения всех пунктов инструкции, которые выделены серым фоном (см. ниже): результаты вычислений, графики, ответы на вопросы.

При составлении отчета рекомендуется копировать необходимую информацию через буфер обмена из рабочего окна среды МАТLAB. Для этих данных используйте шрифт **CourierNew**, в котором ширина всех символов одинакова.

## Таблица.9.1.

Вариант	$T_s$ , CCK	к, рад/сек	$T_R$ , CCK	<i>Т</i> <sub>oc</sub> , сек	
	16.0	0.06	1	1	
16.2		0.07	2	2	
	16.4	0.08	1	3	
4	16.6	0.07	2	4	
	16.8	0.06	1	5	
(	17.0	0.07	2	6	
	17.2	0.08	1	1	
9	17.4	0.07	2	2	
•	17.6	0.06	1	3	
	17.8	0.07	2	4	
	18.0	0.08	1	5	
	18.2	0.09	2	6	
	18.4	0.10	1	1	
	18.6	0.09	2	2	
	18.8	0.08	1	3	
	19.0	0.07	2	4	
	19.2	0.08	1	5	
	19.4	0.09	2	6	
	19.6	0.10	1	1	
	18.2	0.0694	2	6	

#### Контрольные вопросы к защите

- 1. См. все вопросы к работам № 1, № 2 и № 3.
- 2. Как построить подсистему из нескольких существующих блоков модели?
- 3. Сколько входов и выходов может иметь подсистема?
- 4. Как редактировать подсистему?
- 5. Как изменить названия входов и выходов подсистемы?
- 6. Как скопировать существующий блок или подсистему?
- 7. Как удалить блок или соединительную линию?
- 8. Объясните структуру нелинейной модели привода.
- 9. Почему в нелинейной модели нельзя использовать общую передаточную функцию линейной модели привода  $R(s) = \frac{1}{T_{o}s + 1}$ ?
- 10. Как выбираются пределы насыщения для блока, расположенного на входе интегратора?
- 11. Как освободить блок от связей с другими блоками?
- 12. Объясните назначение блока Мих.
- 13. Как разобраться, какой сигнал поступает на первый вход осциллографа (через мультиплексор), какой на второй?
- 14. Что такое скрипт в среде МАТLAВ?
- 15. Что означает знак % внутри скрипта?
- 16. Как вводить несколько команд в одной строке?
- 17. Как правильно перенести длинную команду на следующую строку?
- 18. Что означает третий параметр при вызове функции **plot**?
- 19. Что означают команды hold on и hold off?
- 20. Как запустить скрипт на выполнение?
- 21. Как выполнить только некоторые команды из скрипта?
- 22. Что означает **gca**?
- 23. Для чего служат функции set и get?
- 24. Как узнать и изменить размер шрифта на графике?
- 25. Зачем нужен хэндл (*handle*) графического объекта?
- 26. Как изменить толщину линии на графике?
- 27. Где выводятся сообщения об ошибках в скрипте?

## Отчет по лабораторной работе № 9 Моделирование нелинейных систем управления

Выполнил:

Проверил:

Вариант

### Описание системы

Исследуется нелинейная система управления судном по курсу, структурная схема которой показана на рис.9.1.



измерительная система

Рис.9.1. Структурная схема системы стабилизации судна на курсе Движение судна описывается линейной математической моделью в виде передаточной функции

$$P(s) = \frac{K}{s (T_s s + 1)}$$
, где  $K = 0.0694$  рад/сек,  $T_s = 18.2$  сек,

Линейная модель привода представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s}, \qquad T_R = 2 \operatorname{cer},$$

охваченное единичной отрицательной обратной связью. На угол перекладки руля и скорость перекладки накладываются нелинейные ограничения

$$\left|\dot{\delta}(t)\right| < 3^{\circ}/\tilde{n}\dot{a}\hat{e}, \qquad \left|\delta(t)\right| < 30^{\circ}.$$

Измерительное устройство (гирокомпас) моделируется как апериодическое звено с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1}, \quad T_{oc} = 6 \text{ cek},$$

В качестве управляющего устройства используется ПИДрегулятор с передаточной функцией

$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{T_s s + 1}{T_v + 1} \right) + \frac{1}{T_I s},$$

где  $K_c = 0.7045$ ,  $T_s = 18.2 \text{ сек}$ ,  $T_v = 1 \text{ сек}$ ,  $T_I = 200 \text{ сек}$ ,

#### Построение нелинейной модели

а. модель системы управления с выделенными подсистемами



b. нелинейная модель привода



с. нижний и верхний пределы насыщения блок Saturation: от –6 до 6 блок Saturation1: от –30 до 30

эти величины объясняются тем, что ...

### 39. Сравнение линейной и нелинейной моделей

а. структурная схема системы для сравнения линейной и нелинейной моделей



b. скрипт для построения и оформления графиков

close(1); figure(1); subplot(2,1,1); set(h(1),'LineWidth',1.5) set(h(2),'LineWidth',1.5)

с. переходные процессы при изменении курса на 10 градусов



- d. расхождение между результатами моделирования линейной и нелинейной системы объясняется тем, что ...
- е. наибольшее влияние оказывает ... (какая нелинейность?), потому что ...
- f. в то же время ... (что можно сказать о второй нелинейности?)
- g. переходные процессы при изменении курса на 90 градусов



- h. при больших углах поворота наблюдается существенное расхождение между процессами в линейной и нелинейной системах, потому что ...
- і. в этом случае ... (как влияют нелинейности?)

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Бесекерский В.А., ПоповЕ.П. Теория систем автоматического управления. –СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.
- Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К.А.Пупкова. ТОМ 1-4. - М.:МГТУим. Баумана, 2004.
- 3. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб: Питер, 2005. -333 с.
- 4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Изд-во МЭИ. 2004. -400 с.
- Сборник задач по теории автоматического управления: учебно-методическое пособие для студентов технических специальностей / Сост. В.А. Бороденко. – Павлодар : Кереку, 2009. – 112 с.
- 6. Топчеев Ю.И. Атлас по проектированию систем управления. М:Машиностроение, 1991.
- Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К.А.Пупкова. ТОМ 1–4. – М.:МГТУим. Баумана, 2004.
- Востриков А.С. Теория автоматического регулирования. Учеб. пособие для вузов / А.С.Востриков, Г.А.Французова. – М.: Высш.шк., 2004. – 365 с.
- Власов К.П. Теория автоматического управления (особые, дискретные и нелинейные системы) / К.П.Власов, М.К.Аникин. СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 2006. -99 с.

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа №1	
Исследование разомкнутой линейной системы	4
Отчет по лабораторной работе	13
Лабораторная работа №2	
Исследование временных характеристики системы	
автоматического управления	16
Отчет по лабораторной работе	25
Лабораторная работа №3	
Исследование частотных характеристик динамических	
систем	28
Отчет по лабораторной работе	34
Лабораторная работа №4	
Исследование устойчивости систем автоматического	
управления	36
Отчет по лабораторной работе	48
Лабораторная работа №5	
Исследование устойчивости динамических систем по	
критериям Найквиста	50
Отчет по лабораторной работе	56
Лабораторная работа №6	
Качествопроцессов регулирования	58
Отчет по лабораторной работе	68
Лабораторная работа №7	
Проектирование регулятора для линейной системы	70
Отчет по лабораторной работе	79
Лабораторная работа №8	
Моделирование систем управления в пакете Simulink	85
Отчет по лабораторной работе	97
Лабораторная работа №9	
Моделирование нелинейных систем управления	101
Отчет по лабораторной работе	110

Редактор

Ахметжанова Г.М.