МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



Ташкент-2018

Теория автоматического управления: Методические указания к выполнению лабораторных работ. Сост.: Ж.У.Севинов, Н.С.Якубова Ташкент: ТашГТУ, 2018. 102 с.

В методических указаниях приведены примеры и задачи по изучению линейных динамических характеристик систем устойчивости линейных метода, управления, структурного 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 направления 5311000 - «Автоматизация и управление технологических процессов и производств».

Печатаются по решению научно-методического совета ТашГТУ

Рецензенты: проф., д.т.н. Гулямов Ш.М.(ТашГТУ); доц., к.т.н. Бобоёров Р.О.(ТашХТИ)

© 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 среды. Очень эффективным способом оказалось использование 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 движений. Для изучения генерации новых ЭТИХ явлений потребовались 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 конце XIX века первых работах «о регуляторах» английского математика-механика Д.Максвелла (1866 г.) и русского механика И.А.Вышнеградского (1876, 1877 гг.). Активное развитие новой теории началось с появлением электротехнических систем, в частности электромашинных, и систем радиоавтоматики. До сих пор классическим примером автоматического управления систем является система регулирования скорости электрической машины. Впоследствии оказалось, что методы теории автоматического работу объектов управления позволяют объяснить различной физической 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 переходных процессов. Таким образом, теория автоматического управления является по

3

существу теорией процессов в системах с отрицательной обратной связью. К настоящему времени теория автоматического управления является сложившейся научной дисциплиной со своим аналитическим аппаратом.

Предметом изучения теории автоматического управления являются свойства, методы расчета и конструирования систем автоматики с обратными связями. При нынешнем уровне развития науки и техники для составления моделей обычно используется дифференциальных уравнений, на аппарат языке которых сформулированы основные законы механики и физики макромира. Итак, предметом теории автоматического управления являются автоматики, свойства моделей систем которые представлены дифференциальными уравнениями, a 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.

Таблица 1.1.

Порядок выполнения задания	Команды МАТLАВ
1. Очистите рабочее	clearall
пространствоМАТLAВ (память).	
2. Очистите окно МАТLАВ.	clc

Продолжение табл.1.1

3. Посмотрите краткую справку по команде tf.	help tf
4. Определите адрес файла, который выполняет эту команду.	which('tf')
5. Введите передаточную функцию ¹ $F(s) = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}{s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0}$ как объект tf .	n = [n2 n1 n0] d = [1 d2 d1 d0] f = tf (n, d)
 Проверьте, как извлечь из этого объекта числитель и знаменатель передаточной функции. 	[n1,d1] = tfdata (f, 'v')
 Найдите нули и полюса передаточной функции. 	z = zero (f) p = pole (f)
 Найдите коэффициент усиления звена в установившемся режиме. 	k = dcgain (f)
9. Определите полосу пропускания системы (наименьшую частоту, на которой АЧХ становится меньше, чем – 3 дБ).	b = bandwidth (f)
 Постройте модель системы в пространстве состояния. 	$f_ss = ss(f)$
 Сделайте так, чтобы коэффициент прямой передачи звена был равен 1. 	f_ss.d = 1
 Найдите новый коэффициент усиления звена в установившемся режиме. 	$k1 = dcgain (f_ss)$

¹ Все коэффициенты надо взять из таблицы в конце файла.

Продолжение табл.1.1

13. Как связаны коэффициенты <i>k</i> и <i>k</i>₁? Почему?	
14. Постройте модель исходной системы в форме «нули-полюса».	$f_zp = zpk(f)$
 Проверьте, какие переменные есть в рабочем пространстве. 	who или whos (в чем разница?)
 Постройте на графике расположение нулей и полюсов системы. 	pzmap(f)
 Определите коэффициенты демпфирования и собственные частоты для всех элементарных звеньев (первого и второго порядка). 	[wc,ksi,p] = damp (f)
18. Запустите модуль LTIViewer.	ltiview
19. Загрузите модель f.	JLTI Viewer File – Import
 Постройте импульсную характеристику (весовую функцию) этой системы. 	<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>الا</mark> لا العنومي الالكار المعالمي المعالمي المعالمي المعالمي المعالمي المعالمي المعالمي المعالمين ال معالمين المعالمين مع معالمين مع
23. Отключите систему f. Почему	<mark>الا</mark> لا → MKM – Systems
одинаковы построенные импульсные характеристики разных систем?	
24. Подключите обе системы.	<mark>الا</mark> لا → MKM – Systems

Продолжение табл.1.1

25. Постройте переходные	📣 LTI Viewer				
характеристики систем.	ПКМ – Plot Types – Step				
 26. Сделайте, чтобы на графике для каждой функции были отмечены: максимум время переходного процесса² время нарастания (от 10% до 90% установившегося значения) установившееся значение 	 ▶LTI Viewer NKM – Characteristics: Peak Response Settling Time Rise Time Steady State 				
 27. Щелкая мышью по меткам- кружкам, выведите на экран рамки с численными значениями этих параметров и расположите их так, чтобы все числа были видны. 					
 Экспортируйте построенный график в отдельное окно. 	JLTI Viewer File – Print to Figure				
 Скопируйте график в буфер обмена в формате векторного метафайла. 	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	w = logspace(-1, 2, 100);				

² По умолчанию в МАТLАВвремя переходного процесса определяется для 2%-ного отклонения от установившегося значения.

характеристики ³ (100 точек в интервале от 10 ⁻¹ до 10 ² с равномерным распределением на логарифмической шкале).	
33. Рассчитайте частотную характеристику исходной системы	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
 Закройте все лишние окна, кроме командного окна МАТLAB. 	
38. Постройте сигнал, имитирующий прямоугольные импульсы единичной амплитуды с периодом 4 секунды (всего 5 импульсов).	[u,t] = gensig('square',4);
39. Выполните моделирование	lsim(f,u,t)

³ Точка с запятой в конце команды подавляет вывод на экран результата выполнения. Это удобно при работе с большими массивами.

и постройте на графике сигнал выхода системы f при данном входе.	
 Скопируйте график в буфер обмена в формате векторного метафайла. 	print -dmeta
41. Вставьте график из буфера обмена в отчет (<i>MicrosoftWord</i>).	ПКМ – Вставить

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 1.2.

Вариант	<i>n</i> ₂	<i>n</i> ₁	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 0.7644	0.4592 0.3556 0.3556 0.2734
9.	1.8	-1.98	0.432	1.2000		
10.	1.9	-0.76	-0.399	-0.3991.33330.8711-0.3601.20000.7406	0.8711	
11.	2.0	0.60	-0.360		0.7406	
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

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:
 - $E:\MAT\LAB\control\control\@tf\tf.m$
- 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,	коэффицисни
функции	рад/сек	сек	демпфирования
-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 ...



- Рис.1.1. Амплитудная частотная характеристика
- для того чтобы найти статический коэффициент усиления по АЧХ, надо ...
- для того чтобы найти полосу пропускания по АЧХ надо ...



• Рис.1.2. Реакция на сигнал, состоящий из прямоугольных импульсов

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 команде MATLAB?
- 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. Какие возможности предоставляет модуль LTIViewer?

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 выполнения работы откроем программуMatLAB.



Рис.2.1.Рабочее окно программы MatLAB

Затем откроем окно Simulink. Для этого можно сделать следующие пункты:

- в инструментальной панели MatLAB нажимаем кнопку Simulink;
- в рабочем окне MatLABможно написать команду Simulink и нажать Enter;
- File-Open...и открыть файлы моделей (.mdl-файл).



Рис.2.2.Библиотека Simulink.

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

Создать структуру модели.

В пакете Simulink выбираем 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 с начало выбрать блок и нажать левую кнопку мыши.

Сохранить файл File/Save As...;

Открыть файл File/Open;

Получить переходную характеристику системы h(t).

- 1.Для получения переходной характеристики моделей*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 нажать 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...а потом открыть Model_Inputs_and_Outputs и SimulinkLTI-Viewer(рис.2.6).



Рис.2.6.Simulink LTI-Viewer

2. Вход системы поставим в блок **Input Point** и выход системы в блок **Output Point** (рис.2.7).



Рис.2.7. Установленный блок Input Point и Output Point.

3. В LTI Viewer выполнить команду Simulink\Get Linearized Model.

Затем в окне появляется переходная 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).



Рис.2.8. Окно LTIViewer

Инструкция по выполнению работы

1. Основная часть команд вводится в командном окне среды МАТLAB. 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 получения реакции по импульсному сигналу надо открыть окно **Simulink LTI-Viewer.**
- 6. В окне LTI Viewer надо выполнить команду Simulink\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-	К	олебате	льное	Диффе-	И	нер-	Про-
	циаль-	ральное	пор-	звено			рен-	ци	иаль-	пор-
No	ное	звено	циональ-				циальное	ное звено		циональ-
	звено		ное звено				звено	1-го		ное звено
	1-го							ПО	рядка	
	порядка								1	
	K T	<u> </u>	<u> </u>	К	d	Т	K	К	T	K
1	W ₁	W ₃	W ₅		W_7		W ₆		W_2	W ₄
-	1 0,1	1	9	1	0,2	0,3	3	2	10	1
2	W ₃	W_7	W_4		W_1		W ₅		W ₆	W ₂
	1 0.1	0	10	2	0,1	0,6	4	22	7	19
3	W ₇	W ₅	W_4		W6		W_1		W_2	W ₃
5	2 0.5	2	0	4	0,8	2	2	18	0.7	3
Λ	W_6	\mathbf{W}_1	W ₃		W_2		W_4		W_7	W_5
4	14 10	3	11	1	0,01	0,1	1	1	0.2	5
5	W_5	\mathbf{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
6	\mathbf{W}_1	W ₃	W_5		W_7		W_6		W_2	W_4
	2 1	4	17	5	0,9	2	6	1	0,1	5
7	W ₃	W_7	W_4		W_1		W_5	,	W ₆	W ₂
/	8 0.4	3	22	2	0,7	3	3	8	9	0
8	W ₇	W_5	W_4		W6	-	\mathbf{W}_1	,	W_2	W ₃
0	9 5	2	0	4	0,4	0,9	4	7	7	10
0	W ₆	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		W ₃		W_7		W_1	W ₄
10	1 0,1	5	1	1	0,6	0,8	2	14	10	26
11	W ₃	W_7	W_4		\mathbf{W}_1		W_5		W ₆	W ₂
11	22 9	0	2	3	0,1	2,5	6	11	9	22
12	W ₇	W ₅	W_4		W6		\mathbf{W}_1		W_2	W ₃
12	24 7	1	0	7	0,55	3	5	15	3	20
13	W ₆	W ₁	W ₃		W ₂		W_4	,	W ₇	W ₅
13	15 6	2	6	2	1,5	0,5	4	19	7	19
14	W ₅	W ₂	W ₆		W ₃		W_7		\mathbf{W}_1	W ₄
14	30 4	4	8	6	0,15	2	1	10	5	11

Продолжение табл.2.1.

15	W_1	W ₃	W ₅	W ₇	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	W_3
10	9 2	3	9	4 0,65 2,9	7	24 0.8	0
17	W_6	\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 ₅ W ₂		W_6	W ₃	\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	\mathbf{W}_7	W_6	W_2	W_4
19	26 10	2	11	1 0,63 0,7	5	30 2	12
20	W ₃	\mathbf{W}_7	$\overline{\mathbf{W}}_4$	\mathbf{W}_1	W_5	W_6	\mathbf{W}_2
20	19 0.8	3	15	2 0,7 0,7	4	2 0,1	16

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.



Рис.2.10. Simulink LTI-Viewer

2. Вход системы поставим в блок **Input Point** и выход системы в блок **Output Point**(рис.2.11).



Рис.2.11. Установленный блок Input Point и Output Point.

3. В LTI Viewer выполнить команду Simulink\Get Linearized Model.

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



Рис.2.12. Окно LTIViewer

Контрольные вопросы

1. Каковы дифференциальные уравнения, описывающие типовые динамические звенья?

2. 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?

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

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

где A_{ex} – амплитуда, ω – угловая частота этого воздействия.



Рис. 3.1. Динамическая система.

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

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

Для линейной системы установившаяся реакция на гармоническое входное воздействие определяется выражением

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

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

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 *годографа Найквиста* – геометрического места концов векторов $W(j\omega)$ при изменении частоты от 0 до φ .

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

Выбрать Simulink LTI-Viewer и Control System Toolbox.



Рис. 3.2.Окно PlotConfiguration.

Для получения частотной характеристики системы выполнить Simulink LTI-Viewer, затем в окне LTIViewer выбрать команду Edit\PlotConfiguration....

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

А потом открывают окно Plot Configuration (рис.3.4).

3.6. Инструкция по выполнению работы

1. Открываем пакет**Simulink**.

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 **Input Point** и для выхода из системы блок **Output Point**.

5.В окне LTI Viewer надо выполнить команду Simulink\Get Linearized Model.

6.В окне LTI Viewer надо выполнить команду Edit\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 **Times New Roman**, 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 **Courier New**, в котором ширина всех символов одинакова.

Варианты:

Таблица 3.1.

	Передаточная функция											
	Инер-	Интег	Пропор-	Колебатель	Диффе	Инер-	Пропор-					
	циаль	ральное	циональ	-ное звено	рен-	циаль-	циональ-					
	ное	звено	ное		циальное	ное	ное звено					
Ng	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	W ₃	W_5	W_7	W_6	\mathbf{W}_2	\mathbf{W}_4					
1	1 0,1	1	9	1 0,2 0,3		2 10	1					
\mathbf{r}	W_3	\mathbf{W}_7	\mathbf{W}_4	\mathbf{W}_1	W_5	W_6	\mathbf{W}_2					
2	1 0.1	0	10	2 0,1 0,6		22 7	19					
3	W_7	W_5	\mathbf{W}_4	W_6	\mathbf{W}_1	W_2	W ₃					
5	2 0.5	2	0	4 0,8 2	2	18 0.7	3					
1	W_6	\mathbf{W}_1	W_3	W_2	W_4	W_7	W_5					
4	14 10	3	11	1 0,01 0,1	1	1 0.2	5					
5	W_5	\mathbf{W}_2	W_6	W ₃	W_7	\mathbf{W}_1	\mathbf{W}_4					
J	5 0.9	1	18	3 0,5 1	0	2 0.2	3					

Продолжение табл.3.1.

6	W_1	W ₃	W_5	W	7	W_6	W_2	W_4
0	2 1	4	17	5 0,9	2	6	1 0,1	l 5
7	W ₃	W_7	\mathbf{W}_4	W	1	W_5	W_6	W_2
/	8 0.4	3	22	2 0,7	3	3	8 9	0
Q	W_7	W_5	\mathbf{W}_4	Wa	5	\mathbf{W}_1	W_2	W ₃
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	W	3	\mathbf{W}_7	\mathbf{W}_1	W_4
10	1 0,1	5	1	1 0,6	0,8	2	14 10	26
11	W ₃	\mathbf{W}_7	\mathbf{W}_4	W	1	W_5	W_6	W_2
11	22 9	0	2	3 0,1	2,5	6	11 9	22
12	W_7	W_5	\mathbf{W}_4	We	5	\mathbf{W}_1	W_2	W ₃
	24 7	1	0	7 0,55	3	5	15 3	20
12	W_6	\mathbf{W}_1	W_3	W	2	W_4	W_7	W_5
15	15 6	2	6	2 1,5	0,5	4	19 7	19
11	W_5	W_2	W_6	W	3	\mathbf{W}_7	\mathbf{W}_1	W_4
14	30 4	4	8	6 0,15	2	1	10 5	11
15	\mathbf{W}_1	W ₃	\mathbf{W}_5	W_7		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	\mathbf{W}_4	Wa	5	\mathbf{W}_1	W_2	W ₃
10	9 2	3	9	4 0,65	2,9	7	24 0.8	8 0
17	W_6	\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
18	W_5	W_2	W_6	W	3	\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	W ₃	W_7	W_4	W	1	W ₅	W ₆	W ₂
20	19 0.8	3	15	2 0,7	0,7	4	2 0,1	16

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

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?

36
9. Как строятся логарифмические частотные характеристики соединения типовых звеньев?

10. Как строятся годографы соединений типовых звеньев?

Лабораторная работа №4. 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.4.1.



измерительная система

Рис.4.1. Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

$$\begin{split} \varphi &= \omega_{y}, \\ \dot{\omega}_{y} &= -\frac{1}{T_{s}}\omega_{y} + \frac{K}{T_{s}}\delta, \end{split}$$

где $_{\phi}$ – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса), ω_y – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси, δ – угол поворота вертикального руля относительно положения равновесия, T_s – постоянная времени, κ – 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 функцией⁴

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

Инструкция по выполнению работы

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

Таблица	4.1.
---------	------

Порядок выполнения задания	Команды MATLAB
1. Введите передаточную функцию модели судна $P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}$ как объект tf .	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])
 Постройте передаточную функцию рулевого устройства, замкнув интегратор единичной отрицательной обратной связью. 	R = feedback (R0, 1)

	 Постройте передаточную. функцию последовательного соединения объекта с приводом 	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)
6.	Постройте передаточную функцию измерительного устройства $H(s) = \frac{1}{T_{oc}s+1}$.	H = tf (1, [Toc 1])
7.	Постройте передаточную функцию разомкнутого контура.	L = G * H
8.	Постройте ЛАФЧХ разомкнутой системы.	bode (L)
9.	Отметьте точки, определяющие пересечение ЛАЧХ с прямой 0 дБ и пересечение ЛФЧХ с прямой - 180 ⁰ .	Figure No. 1 ΠKM – Characteristics – Stability (Minimum Crossing)
10.	. Отключите изображение корневого годографа так, чтобы в окне осталась только ЛАФЧХ.	<mark>∮ 5150 Design Tool</mark> View – Root Locus (отключить)

Продолжение табл.4.1

11. Для того, чтобы сразу видеть изменения переходных процессов, запустите LTIViewer из верхнего меню окна SISOTool.	SISO Design Tool Analysis – Response to Step Command
 Оставьте только график переходного процесса на выходе, отключив вывод сигнала управления. 	↓LTI Viewer ПКМ – Systems – Closed loop r to u
 13. Определите перерегулирование σ и время переходного процесса <i>τ_p</i>. Скопируйте график в отчет. 	 ITI Viewer ITKM – Characteristics – Peak Response Settling Time
14. Перейдите в окно SISOTool. Определите коэффициент усиления, при котором перерегулирование	
15. Перейдите в окно среды МАТLAВ 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])
16. Перейдите в окно SISOTool. Импортируйте регулятор <i>Срd</i> как базовую модель для блока <i>С</i> .	J 5150 Design Tool File – Import, Cpd -> C
17. Определите дополнительный коэффициент усиления, при котором	→ 5150 Design Tool перетаскивание мышью ЛАЧХ, редактирование в поле

перерегулирование примерно равно 10%. Найдите время переходного процесса и. запасы устойчивости. Сравните пропорциональный и ПД-регуляторы. Скопируйте в отчет график переходного процесса	CurrentCompensator
18. Определите дополнительный коэффициент усиления, при котором время переходного процесса минимально. Скопируйте в отчет график переходного	∮ 5150 Design Tool перетаскивание мышью ЛАЧХ, редактирование в поле CurrentCompensator
 Экспортируйте полученный регулятор в рабочую область МАТLAB. 	 SI50 Design Tool File – Export в столбце <i>Export as</i> сменить имя Cpd на C кнопка <i>Export to workspace</i>
20. Постройте передаточную функцию в полученной замкнутой системе. Подумайте, почему получилось такое громоздкое выражение. Каков должен быть порядок передаточной функции?	$W = C^*G / (1 + C^*G^*H)$
 Постройте минимальную реализацию передаточной функции W. 	W = minreal(W)
22. Определите полюса передаточной функции замкнутой системы. Что означает близость некоторых полюсов к мнимой оси? Верно	pole (W)

ли, что в этом случае будет малый запас устойчивости?		
23. Найдите коэффициент усиления системы в установившемся режиме.	dcgain (W)	
Есть ли у такой системы статическая ошибка при отслеживании постоянного сигнала? Почему? А для линейно возрастающего сигнала?		
24. Как изменится статический коэффициент усиления, если модель датчика примет вид		
	$T_{oc} + 1$	
25. Постройте минимальную реализацию передаточной функции замкнутой системы от входа к сигналу управления (выходу регулятора).	$Wu = minreal(C/(1 + C^*G^*H))$	
26. 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 *Microsoft Word* (шрифт основного текста **Times New Roman**, 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 **Courier New**, в котором ширина всех символов одинакова.

Таблица 4.2.

Вариант	T_s , CCK	к, рад/сек	T_R , CEK	<i>Т_{ос}</i> , 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

Отчет по лабораторной работе № 4

Проектирование регулятора для линейной системы Выполнил(а):

Проверила:

Вариант

Описание системы

Исследуется система управления судном по курсу, структурная схема которой показана на рис.4.2.



измерительная система

Рис.4.2. 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

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

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

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

1. Исследование разомкнутой системы

а. Передаточная функции рулевого устройства

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

b. Передаточная функция последовательного соединения объекта с приводом



Рис.4.3 Переходная характеристика моделей

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



Рис.4.4 ЛАФЧХ разомкнутой системы

с. Система с регулятором *C*(*s*) = ... устойчива, запасы устойчивости: по амплитуде – 7,12 дБ, по фазе – 26 градусов.

- d. Максимальный коэффициент усиления разомкнутой системы равен ... Это объясняется тем, что ...
- 2. Исследование системы с пропорциональным (П-) регулятором
 - а. Переходная функция замкнутой системы при *C*(*s*) = ...



Рис.4.5 Переходная функция замкнутой системы

- 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



Рис.4.6 Переходная функция скорректированной замкнутой системы

е. Время переходного процесса T_{ii} =171 сек,

f. Запасы устойчивости: по амплитуде 16,3 дБ, по фазе 57.9 градуса.

3. 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*_{*c*} 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 $K_c = 0.942$



Рис.4.7. Переходная функция скорректированной замкнутой системы

- а. Время переходного процесса T_{ii} = 52 сек,
- b. Запасы устойчивости: по амплитуде 15.9 дБ, по фазе 60.2 градусов.
- с. В сравнении с П-регулятором, использование ПДрегулятора позволяет ...

4.2 Регулятор, обеспечивающий кратчайший переходный процесс

d. Для обеспечения минимального времени переходного процесса требуется выбрать $K_c = 0.704$



Рис.4.8. Переходная функция скорректированной замкнутой системы

- е. Время переходного процесса T_{ii} = 34 сек,
- f. Запасы устойчивости: по амплитуде 18.4 дБ, по фазе 67.3 градуса.
- g. Передаточная функция замкнутой системы 0.025771 (s+0.05208) (s+0.1667)

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

- h. Порядок передаточной функции равен 5, потому что ...
- і. Полюса передаточной функции
 - -0.9892
 - -0.5459
 - -0.0691 + 0.0617i
 - -0.0691 0.0617i
 - -0.0483
- j. Близость полюсов к мнимой оси означает, что ... При этом запас устойчивости ...
- k. Коэффициент усиления системы в установившемся режиме равен ... Это объясняется тем, что ...
- 1. При постоянном сигнала установившаяся ошибка ..., потому что ...
- m. При линейно возрастающем сигнале установившаяся ошибка ..., потому что ...

- n. При использовании датчика, описываемого моделью $H(s) = \frac{2K_{oc}}{T_{oc}+1}$, коэффициент усиления в установившемся режиме будет равен ..., потому что ...
- о. Полученная система является астатической, то есть отслеживает без ошибки постоянный входной сигнал.
 Это определяется тем, что ...
- р. При линейно возрастающем сигнале ...
- q. 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) $(s^2 + 0.1382s + 0.008584)$



Рис.4.9. Изменение сигнала управления при единичном ступенчатом входном сигнале

Контрольные вопросы

- 4. Как получить передаточную функцию по линейным дифференциальным уравнениям системы?
- 5. Как ввести передаточную функцию в окне MATLAB?
- 6. С помощью каких операций (функций) строятся в МАТLАВ модели параллельного и последовательного соединений, системы с обратной связью?
- 7. Как построить ЛАФЧХ разомкнутой системы?

- 8. Как определяются запасы устойчивости по амплитуде и по фазе? Что означают эти величины? В каких единицах они измеряются?
- 9. Какие возможности предоставляет модуль SISOTool?
- 10. Что такое
 - корневой годограф
 - перерегулирование
 - время переходного процесса
- 11. Как влияет увеличение коэффициента усиления контура на ЛАФЧХ?
- 12. Почему в дифференцирующей части ПД-регулятора используется дополнительный фильтр в виде апериодического звена с постоянной времени *T_v*?
- 13. Какие преимущества дает использование ПД-регулятора в сравнении с П-регулятором?
- 14. Как влияет увеличение коэффициента усиления контура на перерегулирование и время переходного процесса?
- 15. Как найти порядок передаточной функции замкнутой системы, зная характеристики всех ее блоков?
- 16. Связана ли близость полюсов передаточной функции замкнутой системы к мнимой оси с малым запасом устойчивости?
- 17. Как зависит статический коэффициент усиления замкнутой системы от характеристик измерительного устройства?
- 18. Что такое астатическая система? Что такое порядок астатизма?

Лабораторная работа № 5 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.5.1.



измерительная система

Рис.5.1.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 ϕ – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса), ω_y – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси, δ – угол

поворота вертикального руля относительно положения равновесия, *т*_s – 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 функцией⁵

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

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

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

Инструкция по выполнению работы

Таблица 5.1.

Порядок выполнения задания	Команды MATLAB
1. Для запуска пакета SIMULINK	
щелкните по кнопке 🏛 в	simulink
командном окне MATLAB	
или введите команду	
Simulink в командной	
строке.	

⁵ Численные значения K, T_s , T_R и T_{oc} надо взять из таблицы в конце файла. Они должны совпадать с данными, которые использовались Вами в лабораторной работе № 2.

2. Создайте новую модель с помощью верхнего меню открывшегося окна <i>Simulink Library Browser</i>	Simulink Library Browser File – New – Model	
 3. Перетащите блок TransferFcn (передаточная функция) из окна Simulink Library Browser (группа Continuous) 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 блока типа Transfer Fcn , назовите их Привод, Регулятор и Гирокомпас, введите нужные параметры. Заметьте, что передаточная функция привода должна быть $R(s) = \frac{1}{T_R s + 1}$ с учетом внутренней обратной связи.		
 Сохраните модель в своей папке под именем lab3.mdl⁶. 	File – Save	
7. Выделите блок Гирокомпас и разверните его в другую сторону.	Нажать Ctrl+I или дважды нажать Ctrl+R.	
 Сделайте, чтобы названия блоков Судно, Привод и Регулятор были над блоками. 	ПКМ на блоке, Format - Flip name	
 Перетащите в окно модели блок Sum из группы MathOperations и установите его слева от регулятора. 	ЛКМ на блоке	
10. Сделайте так, чтобы второй вход учитывался в сумме со	Двойной щелчок на блоке, ввести +- в поле	

знаком минус (отрицательная обратная связь).	List of signs
11. Перетащите в окно модели блок Step из группы Sources и установите его слева от сумматора. Дайте ему имя Заданный курс.	
 Установите время подачи сигнала 0 и величину сигнала 10 (исследуем поворот на 10 градусов). 	Двойной щелчок на блоке, 0 в поле Step time 10 в поле Final value
 Соедините все блоки нужным способом. 	ЛКМ на источнике, удерживать Ctrl и ЛКМ на приемнике, или протащить ЛКМ от выхода одного блока к входу другого
14. Перетащите в окно модели два блока Scope (осциллограф) из группы Sinks и установите их в правой части. Назовите их Руль и Курс .	
15. 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.
16. 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
17. Установите время	Simulation – Simulation

моделирования 100 секунд	parameters 100 в поле Stop time
18. Выполните моделирование.	💵 🔤 ЛКМ по кнопке 🕨
 Посмотрите результаты моделирования, открыв окна для блоков Курс и Руль. 	ывы Двойной щелчок по блоку
20. Настройте масштаб по осям в окнах обоих блоков,	Курс ЛКМ по кнопке М – установить оптимальный масштаб
21. Сделайте так, чтобы результаты моделирования передавались с обоих блоков Scope в рабочую область МАТLAB в виде матриц, в которых первый столбец – время, а второй – сигнал (курс или угол поворота руля).	 Журс ЛКМ по кнопке Вкладка Data history Limit data points Save data to workspace Variable name: phi (Курс) или delta (Руль) Format: Array
22. Выполните моделирование еще раз.	Ішы8 ЛКМ по кнопке ▶
23. Перейдите в командное окно МАТLАВ и создайте новое окно для графика. В одном окне будут построены две кривых на разных осях.	figure(1);
24. Разбейте окно на 2 части по вертикали и сделайте активным первый график. Первое число в команде subplot означает количество ячеек с графиками по вертикали, второе – по горизонтали, третье – номер	subplot(2, 1, 1);

ячейки, которую надо сделать активной ⁷ .	
 25. Постройте график изменения курса. В команде plot сначала указывают массив абсцисс, затем – массив ординат. Двоеточие означает, что используются все строки. 	plot(phi(:,1),phi(:,2));
26. Введите заголовок графика.	title('Kypc');
 27. 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>. 	xlabel('Время, сек'); ylabel('\phi, градусы');
28. Аналогично постройте во второй ячейке график изменения угла поворота руля, используя данные из массива delta , полученного в результате моделирования.	subplot(2, 1, 2); plot(delta(:,1),delta(:,2)); title('Угол поворота руля'); xlabel('Время, сек'); ylabel('\delta, градусы');
29. Удалите в окне модели связь между приводом и объектом.	NKM по линии, нажать Delete.
 З0. 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 List of signs

⁷ 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.

31. Исследуем реакцию системы на постоянный сигнал, приложенный непосредственно к входу объекта. Он может моделировать какое-то постоянное возмущающее воздействие, например, влияние ветра.				
 32. Скопируйте блок Заданный курс, перетащив его правой кнопкой мыши, и установите для него величину скачка 2 градуса. Дайте ему название Возмущение. Подключите его выход к новому сумматору. Достройте нужные соединительные линии. 	 Перетаскивание ПКМ. Двойной щелчок по блоку 2 в поле Final Value Двойной щелчок по имени 			
33. Скопируйте полученную модель в отчет.	Edit – Copy model to clipboard			
 34. Увеличьте время моделирования до 500 и выполните моделирование. Проверьте, вышло ли судно на заданный курс 10 градусов. 	Image: Simulation – Simulation parameters - Stop time ЛКМ по кнопке			
35. Постройте передаточную функцию по возмущению замкнутой системы с ПД-регулятором. С ее помощью объясните результат, полученный на предыдущем шаге.				
36. 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 моделирования?				
37. Перейдите в командное окно МАТLAВ и запомните результаты	phi0 = phi; delta0 = delta;			

моделирования в новых массивах. Они понадобятся для того, чтобы сравнить исходный и скорректированный варианты системы.		
38. Чтобы регулятор компенсировал постоянную составляющую возмущения, надо добавить в него интегральный канал. Таким образом, получается ПИД- регулятор. Подключите параллельно регулятору интегрирующее звено с передаточной функцией $\frac{1}{T_is}$, $T_i = 200$ сек. Сохраните модель и скопируйте ее в отчет.	Boomygeone Pennarop Proto Saannual vypo Frepromaso Typo Prepromaso Pre	
 Выполните моделирование. Проверьте, вышло ли судно на заданный курс 10 градусов. 	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	
40. Постройте передаточную функцию по возмущению замкнутой системы с ПИД-регулятором. С ее помощью объясните результат, полученный на предыдущем шаге.		
41. 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?		
42. Постройте в верхней части графика 2 кривых – переходные процессы по курсу для ПД- и ПИД-регуляторов. В команде plot можно перечислять несколько пар массивов – первая пара соответствует первому графику, вторая –	subplot(2, 1, 1); plot(phi0(:,1), phi0(:,2), phi (:,1), phi(:,2)); title('Kypc'); xlabel('Время, сек'); ylabel('\phi, градусы');	

второму и т.д. Три точки в конце строки	legend('ПД-регулятор', 'ПИД-регулятор');
означают перенос команды на следующую строку. Команда legend служит для вывода легенды – символьных строк, описывающих каждый из построенных графиков.	
 43. Аналогично постройте в нижней части графика 2 кривых – изменение угла перекладки руля для ПД- и ПИД- регуляторов, используя данные из массивов delta0 и delta. 	
44. Скопируйте построенный график в отчет через буфер обмена. Сделайте выводы о влиянии интегрального канала на переходные процессы в системе.	
45. Постройте передаточную функцию разомкнутой системы с ПИД-регулятором.	
46. 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: 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.5.2.

Вариант	<i>Т</i> _s , сек	к, рад/сек	<i>T_R</i> , сек	<i>Т</i> _{oc} , 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

Отчет по лабораторной работе № 5 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, $T_s = 18.2$ сек,

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

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

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



Рис.5.2. Исследование системы с ПД-регулятором



Рис.5.3. Переходные процессы в системе с ПДрегулятором при изменении курса на 10 градусов



- Рис.5.4. Модель системы с ПД-регулятором с учетом внешнего возмущения
- передаточная функция по возмущению для системы с ПДрегулятором

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

- судно с ПД-регулятором не вышло на заданный курс 10 градусов, потому что ...
- статический коэффициент усиления k_s = 1.419, установившееся значение сигнала выхода должно быть равно φ_∞ = ..., потому что ...; эти данные согласуются с результатами моделирования
- 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



Рис.5.5.Исследование системы с ПИД-регулятором

• 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_s = ..., установившееся значение сигнала выхода должно быть равно φ_∞ = ..., потому что ...; эти данные согласуются с результатами моделирования



• Рис.5.6. Переходные процессы в системах с ПД- и ПИДрегуляторами

- 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 s² + 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

Контрольные вопросы

1. Как найти передаточную функцию интегратора, охваченного обратной связью?

2. Как запустить пакет SIMULINK?

3. Что такое Library Browser?

4. Какое расширение имеют файлы – модели SIMULINK?

5. Как создать новую модель?

6. Как соединить два блока, имеющих соответственно свободный выход и свободный вход?

7. Как сделать, чтобы один и тот же сигнал поступал на несколько блоков?

8. Как передать результаты моделирования в рабочую область MATLAB? В каком виде они передаются?

9. Как удалить блок или связь между блоками?

10. Как определить нужные масштабы для осей координат в окнах **Scope** и запомнить их?

11. Как скопировать блок в окне модели?

12. Как изменить знаки арифметических действий в сумматоре?

13. Как скопировать изображение модели в документ *MicrosoftWord*?

14. Как изменить время моделирования?

15. Как изменить название у блока?

16. Как сделать, чтобы название блока было с другой стороны?

17. Как изменить цвет фона блока? Цвет надписи?

18. Как ввести параметры блока **TransferFcn** (передаточная функция)?

19. Как найти передаточную функцию системы по возмущению?

20. Почему при использовании ПД-регулятора система не компенсирует постоянное возмущение?

21. Как, зная статический коэффициент усиления по возмущению, определить установившееся отклонение от заданного курса?

68

22. Какими свойствами должна обладать передаточная функция по возмущению для того, чтобы постоянное возмущение полностью компенсировалось?

23. Какими свойствами должен обладать регулятор для того, чтобы постоянное возмущение полностью компенсировалось?

24. Какие преимущества дает использование интегрального канала в ПИД-регуляторе?

25. Почему порядок передаточной функции замкнутой системы по возмущению с ПИД-регулятором на 1 больше, чем для системы с ПД-регулятором?

26. Какие параметры принимает команда **subplot**?

27. Что означает двоеточие в записи **phi(:,1**)?

28. Как вывести на график заголовок и названия осей?

29. Как построить в одном окне два разных графика?

30. Как на одном графике построить несколько кривых?

- 31. Что такое легенда? Как вывести легенду на график?
- 32. Как выводить на графике буквы греческого алфавита?

Лабораторная работа № 6

Программирование в среде Matlab

Цели работы

• освоение методов программирования в среде MATLAB

Задачи работы

- научиться передавать данные из рабочей области MATLAB в модель SIMULINK
- научиться составлять дополнительные функции MATLAB
- освоить некоторые способы автоматизации вычислений

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *Microsoft Word* (шрифт основного текста **Times New Roman**, 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 **Courier New**, в котором ширина всех символов одинакова.

Описание системы

В работе рассматривается система управления судном по курсу. Ее структурная схема показана на рисунке.6.1.



измерительная система

Рис.6.1.Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

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

÷.

где φ – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса), ω_y – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси, δ – угол поворота вертикального руля относительно положения равновесия, T_s – постоянная времени, κ – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*. Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}.$$
 (6.1)

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

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s},$$
 (6.2)

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

$$\left|\dot{\delta}(t)\right| < 3^{\circ}/c$$
, $\left|\delta(t)\right| < 30^{\circ}$.

Для измерения угла рыскания используется гирокомпас, математическая модель которого записывается в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией⁸

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1},$$
 (6.3)

⁸ Численные значения K, T_s , T_R и T_{oc} надо взять из таблицы в конце файла. Они должны совпадать с данными, которые использовались Вами в лабораторных работах № 2–4.

В качестве управляющего устройства используется ПИДрегулятор с передаточной функцией⁹

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

Инструкция по выполнению работы

Таблица 6.1.

Порядок выполнения задания	Команды MATLAB
Сделайте свою папку рабочей папкой Матlaв.	ЛКМ по кнопке cправа от поля Current Directory
Откройте окно рабочей папки.	View – Current directory
Откройте модель, построенную в лабораторной работе № 4.	двойной щелчок на lab4.mdl
Сохраните модель в своей папке под именем lab5.mdl.	File – Save as
Удалите модель линейной системы, оба мультиплексора и лишние соединительные линии. Достройте схему, как показано на рисунке.	Восмущение Нелинейная система f detta r phi Заданный курс Курс
Замените числовые значения постоянного возмущения и заданного курса на символьные: fConst и phiZad соответственно.	№1аь5 Двойной щелчок на блоке Final value
Откройте блок Нелинейная система и замените все числовые значения на имена переменных во всех подсистемах. Через deltaMax обозначим максимальный угол перекладки руля (30°), а через ddMax – максимальную скорость перекладки	Судно, Numerator: К Denominator: [Ts 1 0] ПД-регулятор: Numerator: Kc*[Ts+1 1] И-канал, Denominator: [TI 0] Гирокомпас, Denominator: [Toc 1] Привод, Denominator: [TR 0] Ограничение скорости перекладки руля: ±TR*ddMax Ограничение угла перекладки руля: ±deltaMax

⁹ Значение K_c было определено в лабораторной работе № 2.
Объясните, почему введены именно такие параметры для ПД-регулятора и для блока ограничения угла перекладки руля.			
Вставьте в отчет схемы всех подсистем нелинейной модели. После этого закройте все окна подсистем, кроме главного окна модели.			
Перейдите в командное окно МАТLAB и создайте новый М-файл. File – New – M-file			
Введите численные значения всех параметров модели для <i>своего</i> <i>варианта</i> . Установите заданный курс 30 градусов. Сохраните файл под именем sysdata.m .	clear all; clc; K = 0.0694; Ts = 18.2; TR = 2; Toc = 6; ddMax = 3; deltaMax = 30; phiZad = 30; fConst = 0; TI = 200; Kc = 0.7045;		
Выполните скрипт, после этого запустите модель. Добейтесь, чтобы моделирование было успешно выполнено. Если этого не происходит, сообщения об ошибках надо искать в командном окне МатLAB.	клавиша F5 <mark>∭lab5</mark> ЛКМ по кнопке ▶		
Откройте в редакторе скрипт lab5graph.m и сохраните его под именем lab6graph.m. Добавьте в начало скрипта строку, показанную справа. При этом скрипт становится функцией, принимающей два массива – phi и delta.	двойной щелчок на lab4graph.m File – Save as function lab5graph (phi, delta)		
Эта функция ничего не возвращает, а только строит график в отдельном окне. Она имеет собственное пространство переменных и не может (без специальных приемов) использовать переменные рабочей области МАТLAB.			
Удалите из функции лишние строки, учитывая, что теперь массивы phi и delta имеют только 2 столбца (строятся только процессы в нелинейной системе).			

Измените заголовок на «Переходные процессы при изменении курса». Сохраните файл и скопируйте текст функции в отчет.	title ()
Создайте новый М-файл, введите в первой строчке вызов скрипта sysdata (загрузка параметров модели). Добавьте строки для запуска моделирования (модель lab6.mdl) и вывода результатов на экран. Сохраните скрипт под именем lab6go.m и скопируйте его в отчет.	sysdata; sim ('lab6') lab6graph (phi, delta)

Теперь построим функцию, которая вычисляет перерегулирование и время переходного процесса. Создайте новый М-файл в редакторе и введите в него текст функции¹⁰:

function [sigma,Tpp] = overshoot (t, y)

yInf = y(end);

diff = (y - yInf) / abs (yInf);

sigma = max(diff) * 100;

i = find(abs(diff) > 0.02);

Tpp = t(max(i)+1);

Комментарий:

1 – объявление функции overshoot, которая принимает два параметра-массива (время t и переходный процесс у) и возвращает два значения

(перерегулирование в процентах sigma и время переходного процесса Трр).

2 – вычисление последнего значения массива у, которое принимается за установившееся значение

3 – вычисление относительного отклонения в каждой точке графика

4 – вычисление перерегулирования в процентах

5 – в массив і записываются *номера* всех элементов массива diff, которые по модулю больше 0.02 (для определения времени переходного процесса используется отклонение 2%)

6 – вычисляется время переходного процесса как первый элемент массива t, после которого все элементы массива у отклоняются от установившегося значения не более, чем на 2%.

Сохраните файл с именем overshoot.m и скопируйте его в отчет.

¹⁰ Номера строк отображаются автоматически на полях в окне редактора.

Перейдите в окно скрипта **lab5go**. Удалите последние две строчки, оставив только загрузку исходных данных. Сохраните файл с именем **lab5go1.m**. В последней части работы мы исследуем влияние параметров модели на показатели качества переходных процессов. Сначала посмотрим, как влияет постоянная времени судна T_c^{11} .

```
Добавьте в конец скрипта текст программы (без номеров строк)

Ts0 = Ts;

aTs = linspace(0.8, 1.2, 100) * Ts0;

aSi = []; aTpp = [];

for Ts=aTs

sim ( 'lab5' )

[si,Tpp] = overshoot ( phi(:,1), phi(:,2) );

aSi = [aSi si];

aTpp = [aTpp Tpp];

end;
```

Комментарий:

1 – сохраняем номинальное значение постоянной времени в переменной Ts0 2 – создается массив из 100 постоянных времени, которые изменяются в диапазоне от 80 до 120% от номинального (расчетного) значения3 – создаются пустые массивы aSi (для хранения значений перерегулирования) и аТрр (для хранения значений времени переходного процесса)

4 – начало цикла, переменная

Ts принимает последовательно все значения из массива а

Ts5 – моделирование при новом значении Ts

- вычисление перерегулирования и времени переходного процесса

- в конец массива aSi добавляется новое значение

– в конец массива аТрр добавляется новое значение

9 – конец цикла

Чтобы регулятор не изменялся при	ПД-регулятор:
изменении Ts, необходимо в модели изменить в его числителе Ts на Ts0.	Numerator: Kc*[Ts0+1 1]

¹¹ Свойство системы сохранять устойчивость и существенные показатели качества при малом изменении характеристик объекта управления в сравнении с расчетными значениями называют *грубостью* или *робастностью* (*robustness*). Негрубые системы непригодны доля использования на практике.

Запустите скрипт на выполнение. Если открыть окно осциллографа Курс, можно наблюдать, как изменяется переходный процесс при изменении постоянной времени.	клавиша F5		
Добавьте в конец скрипта строки для построения графика. В верхней част надо построить график изменения перерегулирования, в нижней – измене времени переходного процесса, Здесь удобно использовать элементы из файла lab11graph.m, исправив их соответствующим образом.			
Сохраните скрипт и запустите на выполнение только новые строки. Чтобы не проводить моделирование заново, можно выделить их в редакторе и нажать F9 . Скопируйте отлаженный скрипт в отчет.	выделить строки, клавиша F9		
Если график изменения времени переходного процесса имеет ступенчатый или скачкообразный характер, уменьшите максимально допустимый шаг интегрирования и повторите моделирование (учтите, что время выполнения скрипта увеличится).	Simulation – Simulation parameters – Max step size = 0.2		
Скопируйте полученный график в отчет.			
Сохраните скрипт с именем lab6go2.m . Исправьте его так, чтобы исследовать зависимости показателей качества от угла поворота судна от 1 до 110 градусов с шагом 1 градус.			
Скопируйте отлаженный скрипт и полученный график в отчет. Объясните полученные кривые. Как они должны были бы выглядеть для линейной системы?			

Таблица коэффициентов

Вариант	<i>Т</i> _s , сек	к, рад/сек	<i>T_R</i> , сек	<i>Т</i> _{oc} , сек
1	16.0	0.06	1	1
2	16.2	0.07	2	2
3	16.4	0.08	1	3

Таблица 6.2.

Продолжение табл.6.2

	1	r	_	(
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

Теория автоматического управления Отчет по лабораторной работе № 6 Программирование в среде Matlab

Выполнили:

Проверил:

Вариант

Описание системы

Исследуется нелинейная система управления судном по курсу, структурная схема которой показана на рисунке.6.2.



измерительная система

Рис.6.2. 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, $T_s = 18.2 \text{ сек}$,

Линейная модель привода представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией

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

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

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

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

Модификация нелинейной модели



Рис.6.3. Подсистема «Судно»



Рис.6.4. Подсистема «Привод»

пределы насыщения для блока «**Saturation**», ограничивающего скорость перекладки руля, должны быть введены как ±*TR***ddMax*, потому что ...



Рис.6.5. Подсистема «Регулятор»

Функция для построения графиков переходных процессов

function lab5graph (phi, delta)
figure(1);
subplot(2,1,1);
set(gca,'FontSize',16);
...
h = get(gca, 'Children');
set(h(1),'LineWidth',1.5)

Скрипт sysdata.m для загрузки исходных данных

clear all; clc; K = 0.0694; Ts = 18.2; ... phiZad = 30; fConst = 0;

Скрипт lab5go.m для запуска модели

sysdata; sim ('lab5') lab5graph (phi, delta)

Функция overshoot

function [sigma,Tpp] = overshoot (t, y)
yInf = y(end);
diff = (y - yInf) / abs (yInf);
sigma = max(diff) * 100;
i = find(abs(diff) > 0.02);
Tpp = t(max(i)+1);

Влияние постоянной времени судна на показатели качества

скрипт **lab6go1.m** для проведения расчетов sysdata; Ts0 = Ts; aTs = linspace(0.8, 1.2, 100) * Ts0; ... h = get(gca, 'Children'); set(h(1),'LineWidth',1.5)



Рис.б.б. Графики изменения перерегулирования и времени переходного процесса

при увеличении постоянной времени перерегулирования ... (как изменяется?)

время переходного процесса ... (как изменяется?)

Влияние угла поворота на показатели качества

скрипт lab5go2.m для проведения расчетов

sysdata;

aPhi = linspace(1, 110, 180);

h = get(gca, 'Children');

set(h(1),'LineWidth',1.5)



Рис.6.7. Графики изменения перерегулирования и времени переходного процесса

- при увеличении угла поворота до 60° перерегулирование ... (как изменяется?), время переходного процесса ... (как изменяется?)
- при углах поворота свыше 60° перерегулирование ... (как изменяется?), время переходного процесса ... (как изменяется?); это объясняется тем, что ...
- при дальнейшем увеличении угла поворота ... (что может быть?)
- для линейной системы графики ... (как должны выглядеть?)

Контрольные вопросы к защите

- 1 См. все вопросы к работам № 1-4.
- 2 В параметрах блока модели указано имя переменной. Как задать ее значение?
- 3 Как ввести ограничение на скорость перекладки руля, если известна постоянная времени привода?
- 4 Что такое М-файл?
- 5 Как создать новый М-файл?
- 6 Где выводятся сообщения об ошибках при выполнении скрипта или функции?
- 7 Как строится заголовок функции в М-файле?
- 8 Может ли функция возвращать несколько величин?
- 9 Можно ли обращаться к переменным рабочей области МАТLAB внутри функции?
- 10 Как вызывается функция, записанная в М-файл?
- 11 Как выделить последний элемент массива?
- 12 Чему равен результат операции А-х, где А массив, а х число?
- 13 Как работает функция find?
- 14 Как изменить функцию **overshoot**, чтобы она определяла время переходного процесса с точностью 5%?
- 15 Что такое грубость (робастность) системы?
- 16 Что означает запись

phi(:,1)

phi(1,:)

17 Как выполнить только несколько строк из скрипта?

Лабораторная работа №7 Цифровая реализация непрерывного регулятора Цели работы

• освоение методов переоборудования непрерывных регуляторов для реализации на цифровом компьютере

Задачи работы

- познакомиться с методами переоборудования непрерывных регуляторов в MATLAB
- научиться моделировать системы с цифровыми регуляторами
- научиться выбирать интервал квантования

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *Microsoft Word* (шрифт основного текста **Times New Roman**, 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 **Courier New**, в котором ширина всех символов одинакова.

Описание системы

В работе рассматривается система управления судном по курсу. Ее структурная схема показана на рисунке.7.1.



измерительная система

Рис.7.1.Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

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

где φ – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса), ω_y – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси, δ – угол поворота вертикального руля относительно положения равновесия, T_s – постоянная времени, κ – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*. Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)} \,. \tag{7.1}$$

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

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s},$$
 (7.2)

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 функцией¹²

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc}s + 1},$$
(7.3)

¹² Численные значения *K*, T_s , T_R и T_{oc} надо взять из таблицы в конце файла. Они должны совпадать с данными, которые использовались Вами в лабораторных работах № 2–5.

В непрерывной системе в качестве управляющего устройства используется ПИД-регулятор с передаточной функцией¹³

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

Для компенсации эффекта насыщения, вызванного ограниченным углом перекладки руля, используется схема с внутренней нелинейной обратной связью, охватывающей интегратор в составе регулятора¹⁴.



Рис.7.2. Структурная схема ПИД-регулятора

Для реализации регулятора используется цифровой компьютер с интервалом квантования *т*. Регулятор в расчетной схеме заменяется не последовательное соединение трех звеньев:

- 1) импульсного элемента, который выбирает из непрерывного сигнала e(t) значения $e_k = e(kT)$ в моменты квантования $t_k = kT$ (при целых k); импульсный элемент моделирует аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- линейного цифрового фильтра, который преобразует дискретную последовательность *e_k* в управляющую последовательность *v_k*; передаточная функция этого фильтра определяет закон управления;
- 3) восстанавливающее устройство (экстраполятор), которое непрерывный восстанавливает сигнал управления u(t)ИЗ цифропоследовательности v_{ι} ; экстраполятор моделирует аналоговый преобразователь (ЦАП), чаще всего используется

¹³ Значение K_c было определено в лабораторной работе \mathbb{N} 2.

¹⁴ Значение K_{aw} было определено в лабораторной работе № 6.

фиксатор нулевого порядка, который удерживает постоянное значение *u*(*t*) в течение очередного интервала квантования:

 $u(kT+\varepsilon) = v_k, \quad 0 \le \varepsilon < T.$



Рис.7.3.Схема цифрового регулятора

Блок **ИЭ** обозначает импульсный элемент (АЦП), блок **Э** – экстраполятор (ЦАП). Точечные линии обозначают дискретные сигналы, сплошные линии – непрерывные.

Цифровые регуляторы обладают многими преимуществами в сравнении с классическими (непрерывными):

- отсутствует дрейф параметров элементов;
- в цифровой форме можно реализовать сложные законы управления;
- цифровые регуляторы легко перестраивать, настройка сводится просто к замене алгоритма обработки измеряемых сигналов.

В то же время между моментами квантования (моментами съема измеряемых сигналов и выдачи нового управляющего воздействия) система ведет себя как разомкнутая (неуправляемая). Это может привести к потере устойчивости (при больших интервалах квантования в сравнении с постоянной времени объекта) и скрытым колебаниям (колебаниям непрерывного сигнала, которые не проявляются в моменты квантования).

Для построения дискретной модели ПД-регулятора используется преобразование Тастина

$$s \leftarrow \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1},$$

соответствующее интегрированию по методу трапеций. Для рассматриваемого ПД-регулятора такая замена дает

$$D_{pd}(z) = \frac{K_c[a_1 z + a_0]}{b_1 z + b_0},$$

где коэффициенты равны

 $a_1 = T + 2(T_s + T_v)$, $a_0 = T - 2(T_s + T_v)$, $b_1 = T + 2T_v$, $b_0 = T - 2T_v$.

Для построения дискретной передаточной функции интегрального канала применяется метод интегрирования Эйлера (метод прямоугольников), т.е., замена

$$s \leftarrow \frac{z-1}{T}$$
.

В ходе выполнения работы требуется построить цифровые реализации регулятора при различных интервалах квантования и сравнить переходные процессы в непрерывной и цифровой системе управления.

Инструкция по выполнению работы

Таблица 7.1.

Порядок выполнения задания	Команды Matlab
Сделайте свою папку рабочей папкой Матlab.	ЛКМ по кнопке cправа от поля Current Directory
Создайте новый М-файл, в первой строчке наберите имя скрипта sysdata для загрузки исходных данных. Добавьте в него строчку, которая задает полученное в предыдущей работе значение K_{aw} . Сохраните файл с именем lab7go.m и выполните его.	File – New – M-file sysdata; Kaw = File – Save

Добавьте в скрипт следующие строки (без номеров)

- 2 Cpd = tf(Kc*[Ts+1 1], [1 1]);
- 3 Dpd = c2d (Cpd, T, 'tustin');
- 4 [nD,dD] = tfdata (Dpd, 'v');

Комментарий:

- 1 установление значения интервала квантования 1 с;
- 2 построение передаточной функции ПД-регулятора;
- 3 применение преобразования Тастина к передаточной функции Cpd; в результате будет построен на соответствующая дискретная передаточная функция;

4 – числитель и знаменатель дискретной передаточной функции Dpd записываются в переменные nD и dD.

Продолжение табл.7.1.

Выполните скрипт lab6go.m.	клавиша F5
Откройте окно рабочей папки.	View – Current directory
Откройте модель, построенную в лабораторной работе № 6.	двойной щелчок на lab6.mdl
Сохраните модель в своей папке под именем lab6.mdl .	File – Save as
Удалите блоки Линейная модель, Нелинейная модель, Gain и NCD Outport, а также все линии связи.	выделить ЛКМ, нажать Delete
Измените число входов обоих мультиплексоров на 2.	двойной щелчок 2 в поле Number of inputs
Скопируйте подсистему Система с компенсацией. Первую подсистему назовите Непрерывная система, а вторую – Цифровая система.	перетащить ПКМ ЛКМ на названии
Измените цвет фона подсистем на желтый и фиолетовый соответственно и постройте схему, показанную на рисунке.	ПКМ – Background color Непрерывная оистема руль f delta инфровая оистема f delta r phi Заданный куро
Откройте подсистему Цифровая система - Регулятор. Удалите блоки ПД-регулятор и Интегратор.	ЛКМ выделить ЛКМ, нажать Delete
Откройте окно библиотеки блоков и скопируйте на освободившиеся места два блока Discrete Transfer Fcn (дискретная передаточная функция) из группы Discrete .	View – Library browser перетащить ЛКМ

Назовите новые блоки ПД-регулятор	ПД-регулятор		
и Интегратор и задайте их	Numerator: nD		
параметры.	Denominator: dD		
	Sample time: T		
	Интегратор		
	Numerator: [T]		
	Denominator: TI*[1 -1]		
	Sample time: T		
Добавьте на выход регулятора блок Zero-order hold (фиксатор нулевого порядка) из группы Discrete и установите интервал квантования <i>T</i> .	перетащить ЛКМ из окна Library browser Sample time: T		
Соберите схему, показанную на рисунке. Скопируйте ее в отчет.	1 e HHTERPATOP Anti-windup Kaw +→ +→ Hold HHTERPATOP Saturation Zero-Order Hold		
Установите время моделирования 250 с.	Simulation – Simulation parameters – Stop time		
Выполните моделирование и сравните переходные процессы в непрерывной и цифровой системах (они должны практически совпадать).	двойной щелчок ЛКМ по блокам Курс и Руль		
	_		

Далее мы сравним переходные процессы в цифровых системах при различных интервалах квантования. Добавьте в скрипт следующие строки (без номеров):

- 1 close all;
- 2 figure(1);
- 3 subplot(2,1,1);
- 4 set(gca,'FontSize',16);
- 5 subplot(2,1,2);
- 6 set(gca,'FontSize',16);

Комментарий:

- 1 закрыть все рисунки;
- 2 создать рисунок номер 1;
- 3 разбить его на две части по вертикали (курс и угол перекладки руля) и активизировать первый график;

4 – установить размер шрифта 16 пунктов;

5, 6 – те же операции для второго графика.

В цикле будем изменять интервал квантования *т*, строить новую дискретную модель ПД-регулятора, проводить моделирование и строить очередной график, не стирая существующий. Добавьте в скрипт следующие строки (без номеров):

```
1 aT = [2 3 5];
```

```
2 \text{ col} = 'bgr';
```

3 for i=1:length(aT)

```
4 T = aT(i);
```

```
5 Dpd = c2d (Cpd, T, 'tustin');
```

- 6 [nD,dD] = tfdata (Dpd, 'v');
- 7 sim('lab7')
- 8 subplot(2,1,1);
- 9 plot(phi(:,1),phi(:,3),col(i));
- 10 hold on;
- 11 subplot(2,1,2);
- 12 plot(delta(:,1),delta(:,3),col(i));
- 13 hold on;

```
14 end;
```

Комментарий:

- 1 создается массив интервалов квантования;
- 2 создается символьный массив с обозначениями цветов графиков ('b' синий,
- 'g' зеленый, 'r' красный);
- 3 заголовок цикла, і номер графика;
- 4 выбрать значение интервала квантования из массива;
- 5 построить дискретную модель ПД-регулятора с помощью преобразования Тастина;
- 6 получить числитель и знаменатель этой модели;
- 7 выполнить моделирование;
- 8 перейти к первому графику;
- 9 построить изменение угла курса, цвет линии определяется символом из массива col;
- 10 при выводе следующего графика не стирать существующие кривые;
- 11-13 те же операции для второго графика (угол перекладки руля);

```
14 – конец цикла
```

системе (второй столбец в массивах phi и delta). Добавьте в скрипт следующие

строки (без номеров):

- 1 subplot(2,1,1);
- 2 plot(phi(:,1),phi(:,2),'k--');
- 3 legend('T=2', 'T=3', 'T=5', 'Непрерывная система');
- 4 h = get(gca, 'Children');
- 5 for i=1:4
- 6 set(h(i),'LineWidth',1.5);
- 7 end;

Комментарий:

1 – перейти к первому графику;

2 – строится переходный процесс в непрерывной системе, штриховая линия ('--') черного цвета ('k');

3 – выводится легенда;

4 – получить массив указателей на линии;

5-7 – цикл для изменения толщины линий

6 – установить толщину линий 1,5;

Добавьте самостоятельно аналогичные команды для второго графика (используйте второй столбец массива delta).

Выполните скрипт.	клавиша F5
Скопируйте график в отчет.	print –dmeta ПКМ - Вставить

Таблица коэффициентов

Таблица 7.2.

				I uotiniqui / i=t
Вариант	<i>Т</i> _s , сек	к, рад/сек	T_R , cek	<i>T</i> _{oc} , 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

продолжение таол.				жение таол./.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

П

- -

Теория автоматического управления Отчет по лабораторной работе № 7

Цифровая реализация непрерывного регулятора

Выполнили:

Проверил:

Вариант

4. Описание системы

Исследуется нелинейная система управления судном по курсу, структурная схема которой показана на рисунке.7.4.



измерительная система

Рис.7.4.Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Движение судна описывается линейной математической моделью в виде передаточной функции

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

Линейная модель привода представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией

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

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

$$\left|\dot{\delta}(t)\right| < 3$$
, $\left|\delta(t)\right| < 30^{\circ}$.

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 непрерывной системе в качестве управляющего устройства используется ПИД-регулятор с передаточной функцией

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

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

Переоборудование непрерывного регулятора

Для построения дискретной модели ПД-регулятора используется преобразование Тастина

$$s \leftarrow \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1},$$

соответствующее интегрированию по методу трапеций. Для рассматриваемого ПД-регулятора получаем

$$C_{pd}(s) = \frac{K_c[(T_s+1)s+1]}{T_v s+1} \to D_{pd}(z) = \frac{K_c[a_1 z + a_0]}{b_1 z + b_0},$$

где коэффициенты равны

$$a_1 = T_s + 1 + \frac{T}{2}, \quad a_0 = \frac{T}{2} - T_s - 1, \quad b_1 = T_v + \frac{T}{2}, \quad b_0 = \frac{T}{2} - T_v.$$

Для построения дискретной передаточной функции интегрального канала применяется метод интегрирования Эйлера (метод прямоугольников), т.е., замена

$$s \leftarrow \frac{z-1}{T},$$

что дает $C_I(s) = \frac{1}{T_I s} \rightarrow D_I(z) = \frac{T}{T_I(z-1)}$. При заданных численных

значениях и т = 1 получаем

$$D_{pd}(z) = \frac{9,252z - 8,783}{z - 0,333}, \quad D_I(z) = \frac{0,005}{z - 1}.$$



Рис.7.5. Подсистема «Регулятор» в цифровой системе

- пределы для блока **Saturation** ±30°
- коэффициент компенсации насыщения *K*_{aw} = 3,2084
- модель для сравнения трех типов систем

5. Выбор интервала квантования



Рис.7.6. Переходные процессы при $\varphi_0 = 90^\circ$

• для данной системы рекомендуется выбирать интервал квантования не более ...

Контрольные вопросы

- 1. См. все вопросы к работам № 1-6.
- 2. Что такое переоборудование?
- 3. В чем отличие непрерывной и цифровой систем управления?
- 4. В чем преимущества цифровых систем управления?
- 5. Что такое аналоговые и дискретные сигналы?
- 6. Что такое дискретная передаточная функция?
- 7. Что такое импульсный элемент? Моделью какого реального устройства он служит?
- 8. Что такое экстраполятор? Моделью какого реального устройства он служит?
- 9. Что такое фиксатор нулевого порядка? Почему более сложные экстраполяторы применяются редко?
- 10. Что такое цифровой фильтр?
- 11. Какой оператор используется для построения дискретной передаточной функции цифрового фильтра?

Лабораторная работа № 8 Исследование корреляционной функции и спектра сигналов

Цели работы

• освоение методов первичного анализа корреляционных функций и спектров сигналов с помощью блоков *Auto Correlator* и *Power Spectral Density* среды MATLAB-SIMULINK

Задачи работы

- исследовать (авто)корреляционную функцию и спектральную плотность для гармонических сигналов
- изучить влияние помех измерений на корреляционную функцию и спектр сигнала

Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в виде связного (читаемого) текста в файле формата *Microsoft Word* (шрифт основного текста **Times New Roman**, 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 **Courier New**, в котором ширина всех символов одинакова.

Инструкция по выполнению работы

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

Таблица	8.1.
---------	------

Порядок выполнения задания	Команды и иллюстрации	
Запустите Simulink и создайте новую модель. Установите время моделирования 100 с (меню Simulation – Simulation Parameters – Stop Time).	 на панели инструментов, в окне Simulink 	
Добавьте в модель блоки Sine Wave (гармонический сигнал, синус, группа Sources) и Scope (осциллограф, группа Sinks). Установите для синусоиды частоту 10 рад/с (параметр Frequency).	Sine Wave Scope	
Добавьте блок Auto Correlator (автокорреляционная функция, группа Simulink Extras – Additional Sinks). Запустите модель и посмотрите на корреляционную функцию этого сигнала.	Sine Wave Scope Auto Correlator	
Скопируйте график корреляционной функции в отчет. Используйте клавиши		
<i>Alt+PrintScreen</i> для копирования изображения активного окна в буфер обмена. Затем вставьте рисунок в отчет с помощью клавиш <i>Ctrl+V</i> .		
Подключите к выходу блок <i>Power</i> Spectral Density (спектральная плотность, группа Simulink Extras – Additional Sinks). Запустите модель и посмотрите на спектр этого сигнала. Скопируйте график спектральной плотности в отчет.	Sine Wave Scope Auto Correlator	

Продолжение табл.8.1



Запустите модель и скопируйте в отчет графики корреляционной функции и спектральной плотности. Теперь увеличьте мощность шума до 1 и повторите моделирование. Объясните результаты.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения корреляционной и ковариационной функций СП. Перечислите их основные свойства.

2. Что называется спектральной плотностью мощности СП? Как она связана с амплитудным Фурье-спектром реализации и с корреляционной функцией СП?

3. Приведите известные Вам определения интервала корреляции и ширины спектра СП. Как они связаны между собой?

4. Как связан вид реализаций случайного процесса с его энергетическими характеристиками? Приведите примеры.

5. Какие процессы называют узкополосными? Как аналитически рассчитываются корреляционные функции узкополосных

случайных процессов при известной спектральной плотности мощности? Приведите примеры.

6. Как определить эффективное значение случайного процесса по его корреляционной функции и спектральной плотности мощности?

7. Какой случайный процесс называют "белым" шумом? Каковы его энергетические характеристики?

8. Каковы энергетические характеристики ограниченного по частоте и ограниченного по полосе белого шума ?

9. Как влияет аддитивный широкополосной шум на корреляционную функцию гармонического колебания со случайной начальной фазой? Приведите примеры для нескольких существенно различных отношений сигнал/шум.

10. Можно ли обнаружить факт присутствия периодического сигнала в шуме при отношении сигнал/шум h<1? Предложите способ реализации такого обнаружителя.

11. Как может быть определена экспериментально корреляционная функция и спектральная плотность мощности эргодического процесса?

100

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. –СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.

2. 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.

5. Сборник задач по теории автоматического управления: учебнометодическое 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.

7. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К.А.Пупкова. ТОМ 1–4. – М.:МГТУим. Баумана, 2004.

8. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования. Учеб.
 пособие для вузов / А.С.Востриков, Г.А.Французова. – М.:
 Высш.шк., 2004. – 365 с.

9. 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.

101

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа №1	
Исследование разомкнутой линейной системы	5
Лабораторная работа №2	
Исследование временных характеристик системы управления	17
Лабораторная работа №3	
Исследование частотных характеристик динамических систем	29
Лабораторная работа №4	
Проектирование регулятора для линейной системы	38
Лабораторная работа №5	
Моделирование систем управления в пакете Simulink	53
Лабораторная работа №6	
Программирование в среде Matlab	70
Лабораторная работа №7	
Цифровая реализация непрерывного регулятора	84
Лабораторная работа №8	
Исследование корреляционной функции и спектра сигналов ЛИТЕРАТУРА	97 101
	-

Редактор

Ахметжанова Г.М.