

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине
для студентов, обучающихся по направлению
09.03.02 – «Информационные системы и технологии»
по учебному плану подготовки бакалавров
дневной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 681.5
О-75

Р е ц е н з е н т:

Е.А. Кожяев - канд. техн. наук, доцент кафедры ИТиКС

Составители : А.Е. Безуглая, С.А. Кузнецов

О-75 Основы теории управления : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине для студентов, обучающихся по направлению 09.03.02 – «Информационные системы и технологии» по учебному плану подготовки бакалавров дневной и заочной форм обучения / Сост. А.Е. Безуглая, С.А. Кузнецов. – Севастополь: СевГУ, 2021. – 44 с. – Текст : электронный

Методические указания предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине «Основы теории управления». Целью методических указаний является углубление и закрепление полученных теоретических знаний в области теории автоматического управления; формирование умений и навыков анализа и синтеза линейных систем автоматического управления; применение полученных знаний для исследования характеристик линейных систем и регуляторов.

УДК 681.5

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Информационные системы», протокол № 9 от 29 апреля 2020 года, и методическом семинаре института информационных технологий и управления в технических системах, протокол № 5 от 17 июня 2020 г.

СОДЕЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. «Исследование типовых динамических звеньев»	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. «Исследование преобразований структурных схем»	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. «Исследование временных и частотных характеристик систем управления».....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. «Исследование способов синтеза ПИД-регулятора»	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. «Исследование САУ с наблюдателем»	38

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

1.1 Цель работы

Исследование типовых динамических звеньев систем автоматического управления путем построения их реакции на типовые входные воздействия. Изучение средств анализа САУ пакета математического моделирования Matlab.

Трудоемкость лабораторной работы: 9 ч (6 ч – аудиторных, 3 ч – самостоятельная работа студента).

1.2 Краткие теоретические сведения

Рассмотрим систему автоматического управления (САУ), описываемую линейным дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $u(t)$ – входной процесс; $y(t)$ – выходной процесс; a_i, b_j постоянные коэффициенты; n, m ($n \geq m$) – постоянные числа.

Если ввести обозначение p для оператора дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$, то можно записать (1) в операторной форме:

$$\begin{aligned} (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) y(t) = \\ = (b^m p^m + b^{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) u(t), \end{aligned} \quad (2)$$

откуда получается:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{B(p)}{A(p)} = W(p),$$

где $A(p)$ и $B(p)$ – полиномы из формулы (2).

Выражение (2) по виду совпадает с определением передаточной функции (ПФ) как отношения преобразования по Лапласу выходной переменной к преобразованию по Лапласу входной переменной при нулевых начальных условиях:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = W(s), \quad (3)$$

где s – комплексная переменная.

Комплексные числа, являющиеся корнями многочлена $B(s)$, называются нулями передаточной функции, а корни многочлена $A(s)$ – полюсами.

Описание типовых динамических звеньев приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Типовые динамические звенья

№	Название звена	ПФ звена
1	Интегрирующее	$W(s) = \frac{K}{s}$
2	Дифференцирующее	$W(s) = Ks$
3	Усилительное (безынерционное)	$W(s) = K$
4	Апериодическое 1-го порядка (инерционное)	$W(s) = \frac{K}{Ts+1}$
5	Апериодическое 2-го порядка (все корни вещественные)	$W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}; T_1 \geq 2T_2$
6	Колебательное	$W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}; T_1 < 2T_2$
7	Консервативное	$W(s) = \frac{K}{Ts^2 + 1}$
8	Интегрирующее с запаздыванием (реальное интегрирующее)	$W(s) = \frac{K}{s(Ts+1)}$
9	Дифференцирующее с запаздыванием (реальное дифференцирующее)	$W(s) = \frac{Ks}{Ts+1}$
10	Форсирующее	$W(s) = K(Ts+1)$
11	Изодомное	$W(s) = \frac{K(Ts+1)}{s}$

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}; \quad T = T_2, \quad \xi = \frac{T_1}{2T_2}.$$

Временные характеристики динамического звена представляют собой зависимость выходного сигнала системы от времени при подаче на ее вход некоторого типового воздействия. Обычно выполняется анализ выхода системы на единичный скачок (функция Хевисайда) и импульсную функцию (функция Дирака или δ -функция). Единичный скачок $1(t)$ определяется условиями:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

Реакция САУ на единичный скачок называется *переходной функцией* системы и обозначается $h(t)$. При неединичном ступенчатом воздействии $g(t) = N1(t)$, где $N = \text{const}$, в соответствии с принципом суперпозиции выходная реакция системы будет

$$y(t) = Nh(t).$$

Импульсная функция $\delta(t)$ определяется условиями:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases}$$

Очевидно:

$$\delta(t) = 1'(t).$$

Реакция САУ на импульсную функцию называется *импульсной переходной функцией системы* (функцией веса) и обозначается $w(t)$.

Импульсная и переходная функции системы связаны соотношением

$$h(t) = \int_0^t w(\tau) d\tau.$$

Для исследования реакции САУ на гармоническое типовое воздействие принято строить не временные, а *частотные характеристики*. Это связано с тем, что вид реакции системы на гармонический сигнал зависит от частоты входного сигнала. Следовательно, исследование системы нужно проводить на всем диапазоне частот.

К частотным характеристикам динамического звена относятся амплитудно-фазо-частотная (АФЧХ) и логарифмическая амплитудная (ЛАХ) и фазовая частотные характеристики (ЛФХ).

Комплексная передаточная функция $W(j\omega)$:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = N(\omega) \cdot e^{j\Psi(\omega)}, \quad (4)$$

$$N(\omega) = \sqrt{U(\omega)^2 + V(\omega)^2}, \quad \Psi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} = \varphi.,$$

где $U(\omega)$ - вещественная часть, $V(\omega)$ - мнимая часть.

Амлитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) собой геометрическое место концов векторов (годограф), соответствующих комплексной передаточной функции $W(j\omega)$ при изменении частоты от 0 до ∞ (рисунок 1).

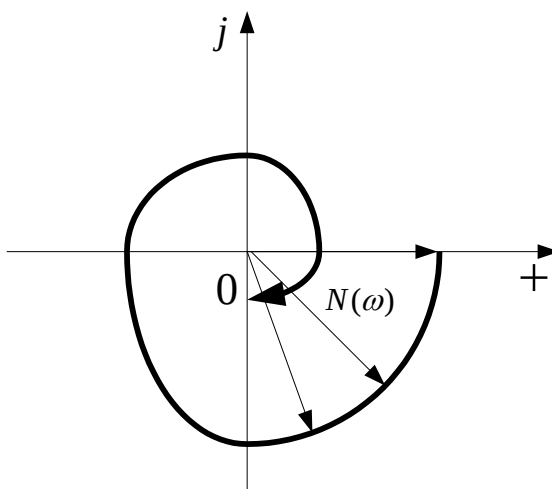


Рисунок 1 - АФЧХ

АЧХ – это кривая зависимости модуля $N(\omega)$ от частоты, и показывает, как пропускает звено сигнал различной частоты. ФЧХ – кривая зависимости $\varphi(\omega)$ от частоты, показывает фазовые сдвиги, вносимые звеном на различных частотах.

При построении частотных характеристик сложных систем алгоритм усложняется, поэтому наиболее просто вычерчивать частотные характеристики в логарифмическом масштабе. Прологарифмируем выражение комплексной передаточной функции (4):

$$\ln(W(j\omega)) = \ln(N(\omega)) + j\Psi(\omega). \quad (5)$$

ЛАЧХ – кривая зависимости логарифма модуля $\ln(N(\omega))$ комплексной передаточной функции от частоты отложенной в логарифмическом масштабе по оси абсцисс. Для построения ЛАХ находится величина (выражаемая в децибелах):

$$L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg N(\omega). \quad (6)$$

ЛФЧХ – зависимость аргумента $\varphi(\omega)$ комплексной передаточной функции от частоты, отложенной в логарифмическом масштабе по оси абсцисс.

1.3 Программа и методика выполнения работы

1. С помощью пакета MatLab построить для каждого типового звена (см. таблицу 1) временные и частотные характеристики.
2. Определить влияние коэффициентов, входящих в описание каждого звена на параметры переходного процесса.
3. Оформить отчет по работе.

1.4 Описание лабораторной установки

В пакете MatLab имеется два основных варианта для исследования передаточных функций и моделирования САУ:

- использование команд пакета расширения Control System Toolbox;
- использование пакета Simulink.

Control System Toolbox [8, 9] предназначен для работы с ЛТИ-моделями (Linear Time Invariant Models – линейные модели с постоянными параметрами) систем управления. Команда, создающая ЛТИ-систему с одним входом и одним выходом в виде передаточной функции, имеет следующий синтаксис:

$$\text{TF}([b_m, \dots, b_1, b_0], [a_n, \dots, a_1, a_0]),$$

где $b_m, \dots, b_1, b_0$ и $a_n, \dots, a_1, a_0$ – значения коэффициентов полиномов В и А в (3). Например, если требуется описать ПФ вида

$$W = \frac{s+1}{2s^2+8s+5}$$

и узнать значения ее нулей и полюсов, то нужно ввести в окне команд MatLab следующие команды:

```
>> w=tf([1 1],[2 8 5])
>> zero(w)
>> pole(w)
```

Исследовать реакцию ЛТИ-модели на типовые входные воздействия можно с помощью команд

```
>> step(w)
>> impulse(w)
>> bode(w)
>> nyquist(w)
```

Функция bode предназначена для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ системы. Функция nyquist позволяет строить годограф Найквиста (АФЧХ). Можно полу-

чить на одном графике реакцию сразу нескольких динамических звеньев, если использовать команды вида:

```
>> step(w,w1,w2)
>> impulse(w, w1,w2)
```

В приведенных примерах время моделирования выбирается автоматически. При необходимости его можно явно указать в команде

```
>> step(w, w1, w2, t),
```

где t – время моделирования в секундах.

На рисунке 2 показан пример моделирования динамики колебательного звена при различных параметрах:

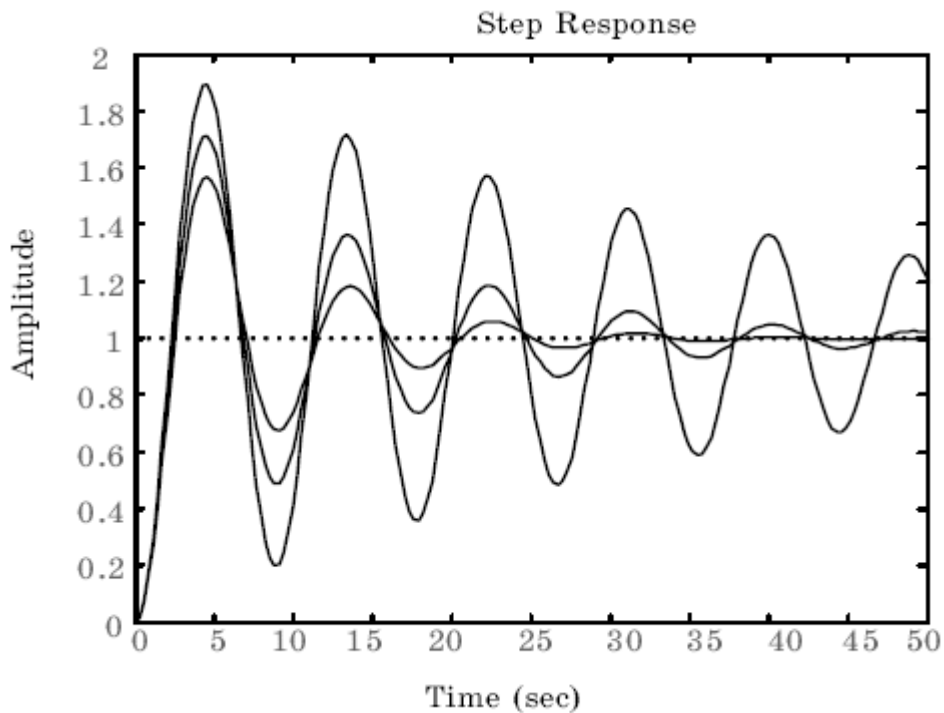


Рисунок 2 – Исследование реакции колебательного звена

```
>> w=tf([1],[2 0.3 1]);
>> w1=tf([1],[2 0.5 1]);
>> w2=tf([1],[2 0.1 1]);
>> step(w,w1,w2,50).
```

В Simulink MatLab ПФ можно описать с помощью блока Transfer fcn в разделе библиотеки Continuous. Для подачи типовых воздействий надо использовать блок Step из раздела Sources. Импульсную переходную характеристику звена можно получить, подавая на вход импульс маленькой длительности и большой амплитуды (приближение δ -функции) при нулевых начальных условиях.

1.5 Результаты экспериментальных исследований

Результаты исследований оформить в виде графиков. Сравнить полученные результаты и сделать выводы по каждому виду графика каждого звена.

1.6 Содержание отчета

Отчет по выполняемой лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально на листах формата А4 в рукописном или машинном варианте исполнения и должен содержать:

- название работы;
- цель и задачи исследований;
- передаточные функции и схемы моделирования исследуемых звеньев;
- экспериментально полученные временные и частотные характеристики при вариации параметров каждого звена;
- выводы, обобщающие проделанные эксперименты по каждому звену.

1.7 Контрольные вопросы

1. Что такое САУ?
2. Что такое передаточная функция САУ?
3. Какие воздействия относятся к типовым?
4. Какие динамические звенья относятся к типовым?
5. С помощью каких характеристик исследуется реакция системы на типовые воздействия?
6. Какому типовому воздействию соответствует переключение регулятора с одного значения на другое?
7. Приведите пример входного воздействия, которое можно описать прямоугольным импульсом, близким к функции Дирака.
8. Приведите пример гармонического входного воздействия.
9. Чем отличается реакция «идеальных» и «реальных» типовых динамических звеньев?
10. В чем отличие апериодического звена 1-го порядка от звена 2-го порядка?
11. При каких условиях звено 2-го порядка становится апериодическим или колебательным?
12. Почему не для всех типовых звеньев есть возможность построить временные характеристики?

1.8 Библиографический список рекомендуемой литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – СПб. : Профессия, 2007. - 752 с.

2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы : учеб. пособие для студ. вузов. - М.: Питер, 2006. - 336 с.
3. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. для студ. вузов М. Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2000 - 735 с.
4. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем - СПб. : БХВ - Петербург, 2004.
<http://www.znaniyum.com/catalog.php?bookinfo=356672>
5. Ким Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. - М. : Физматлит, 2008. - 328 с. <http://www.iprbookshop.ru/17429.html>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

2.1 Цель работы

Исследование правил преобразования структурных схем САУ. Изучение способов приведения сложной структурной схемы к эквивалентной передаточной функции.

Трудоемкость лабораторной работы: 6 ч (4 ч – аудиторных, 2 ч – самостоятельная работа студента).

2.2 Краткие теоретические сведения

Для наглядного представления сложной системы как совокупности элементов и связей между ними используются структурные схемы.

Структурной схемой называется схема САУ, изображенная в виде соединения ПФ составляющих ее звеньев.

Структурная схема показывает строение автоматической системы, наличие внешних воздействий и точки их приложения, пути распространения воздействий и выходную величину. Динамическое или статическое звено изображается прямоугольником, в котором указывается ПФ звена или ее математическое выражение. Воздействия на систему и влияние звеньев друг на друга (сигналы) изображаются стрелками. В каждом звене воздействие передается только от входа звена к его выходу.

На динамическое звено может воздействовать лишь одна входная величина, поэтому используются блоки суммирования и сравнения сигналов. Суммироваться и сравниваться могут лишь сигналы одной и той же физической природы.

Структурная схема может быть составлена по уравнению системы в пространстве состояний или по дифференциальным уравнениям системы. При составлении структурной схемы удобно начинать с изображения задающего воздействия и располагать динамические звенья, составляющие прямую цепь системы, слева направо до регулируемой величины. Тогда основная обратная связь и местные обратные связи будут направлены справа налево.

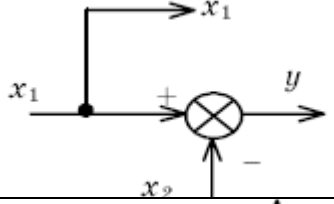
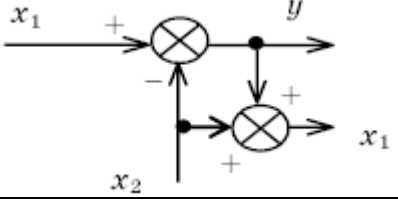
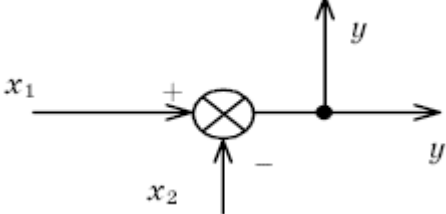
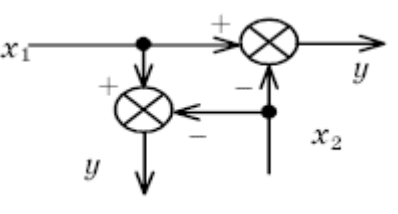
Различные способы преобразования структурных схем облегчают определение ПФ сложных САУ и дают возможность привести многоконтурную систему к эквивалентной ей одноконтурной схеме. Преобразование структурной схемы должно осуществляться на основании правил. Правила преобразования структурных схем можно найти в справочной литературе, основные из них приведены в таблице 2.

При выполнении преобразований следует каждое имеющееся в схеме типовое соединение заменить эквивалентным звеном. Затем можно выполнить пе-

ренос точек разветвления и сумматоров, чтобы в преобразованной схеме образовались новые типовые соединения звеньев. Эти соединения опять заменяются эквивалентными звеньями, затем вновь может потребоваться перенос точек разветвления и сумматоров и т. д.

Таблица 2 – Основные правила преобразования структурных схем

Преобразование	Структурная схема	
	Исходная	Эквивалентная
Свертывание последовательного соединения		 $W = W_1 W_2 \dots W_n$
Свертывание параллельного соединения		 $W = W_1 + W_2 + \dots + W_n$
Свертывание обратной связи		 $W = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2}$
Перенос узла через звено вперед		 $W_1 = \frac{1}{W}$
Перенос узла через звено назад		
Перенос сумматора через звено вперед		
Перенос сумматора через звено назад		 $W_1 = \frac{1}{W}$
Перенос прямой связи через звено		

Преобразование	Структурная схема	
	Исходная	Эквивалентная
Перенос узла через сумматор вперед		
Перенос узла через сумматор назад		

Пример. Пусть необходимо получить эквивалентное представление для структуры, приведенной на рисунке 3.

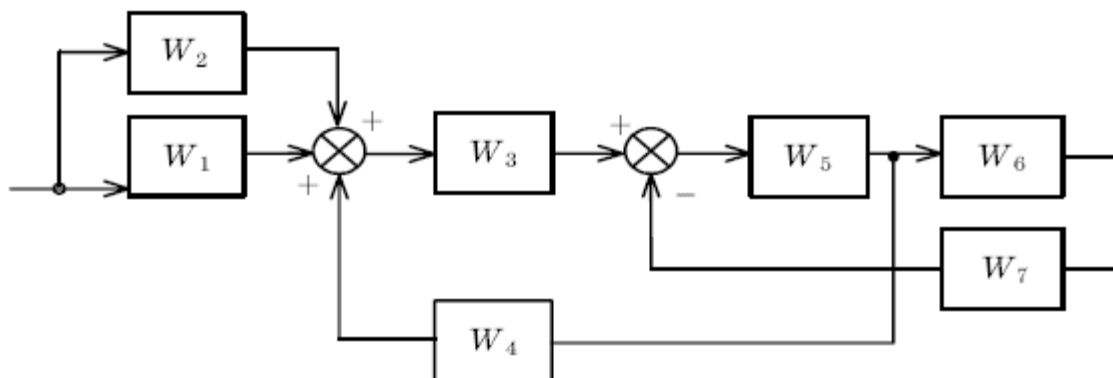


Рисунок 3 – Исходная структура САУ

Преобразование включает несколько этапов, показанных на рисунках 2–5

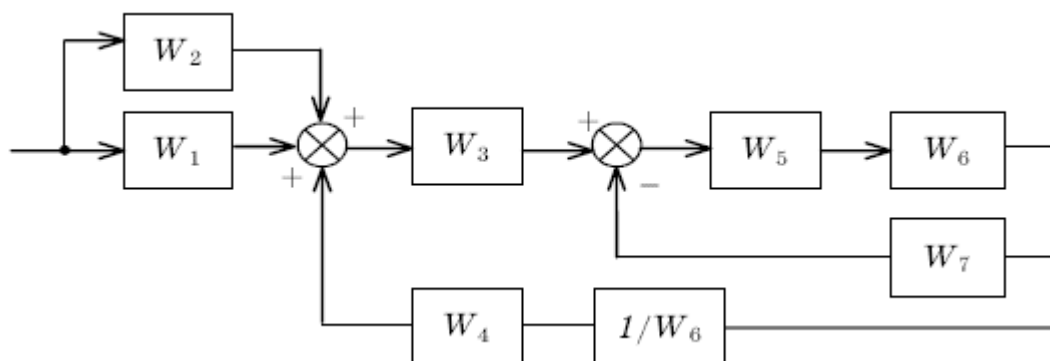


Рисунок 4 – Перенос узла через сумматор

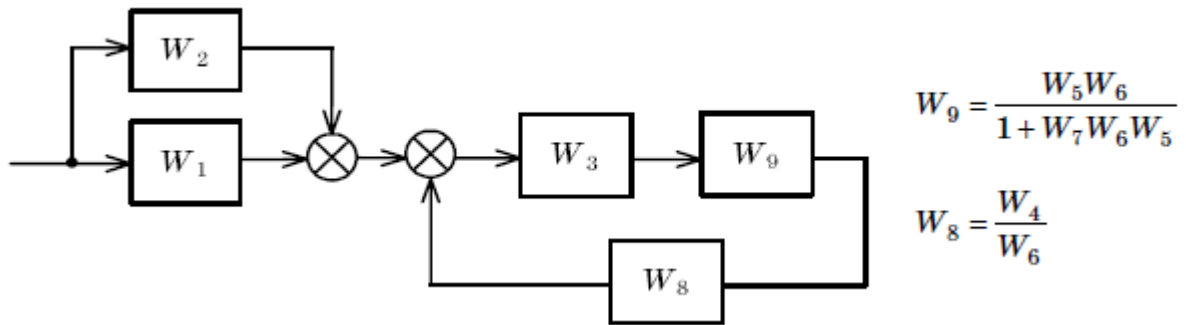


Рисунок 5 – Свертывание обратной связи и последовательного соединения

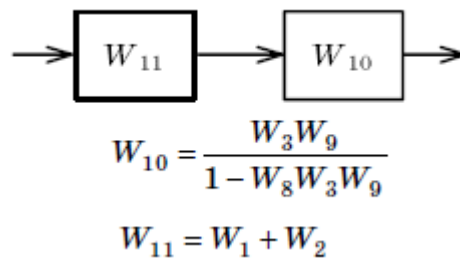


Рисунок 6 – Свертывание обратной связи и параллельного соединения

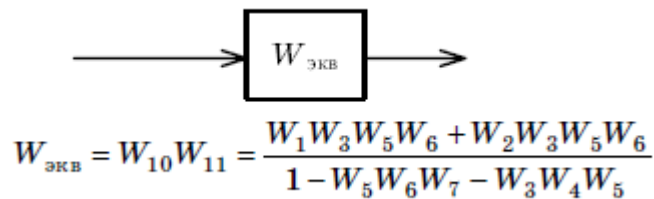


Рисунок 7 – Свертывание последовательного соединения

Таким образом, преобразование структурных схем к эквивалентной передаточной функции заключается в непосредственном использовании правил, приведенных в таблице 2. При этом следует учесть, что порядок применения формул здесь достаточно произволен, возможны ошибочные шаги, усложняющие поиск решения.

2.3 Программа и методика выполнения работы

1. Выполнить преобразование заданного варианта структурной схемы САУ в эквивалентную ПФ (таблица 3).
2. Оформить отчет по работе.

Таблица 3 – Варианты задания

Вариант	Структурная схема
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Вариант	Структурная схема
7	
8	
9	
10	
11	

Вариант	Структурная схема
12	
13	
14	

2.4 Описание лабораторной установки

В пакете MatLab имеется ряд функций, с помощью которых можно выполнять структурные преобразования:

`series(w1,w2)` – последовательное соединение динамических звеньев;

`parallel(w1,w2)` – параллельное соединение динамических звеньев;

`feedback(w1,w2)` – включение звена `w2` в контур отрицательной обратной связи к `w1`;

`feedback(w1,w2)` – включение звена `w2` в контур отрицательной обратной связи звена `w1`;

`feedback(w1,w2,sign)` – включение звена `w2` в контур обратной связи звена `w1` с указанием знака `+` или `-` (очевидно, `feedback(w1,w2)==feedback(w1,w2,1)`);

Пример:

```
>> w=tf([1 2],[1 2 2])
```

Transfer function:

$s + 2$

15

$s^2 + 2s + 2$

```
>> w1=tf([1 2 3],[1 2 2])
```

Transfer function:

```


$$\frac{s^2 + 2s + 3}{s^2 + 2s + 2}$$

>> w2=series(w,w1)
Transfer function:

$$\frac{s^3 + 4s^2 + 7s + 6}{s^4 + 4s^3 + 8s^2 + 8s + 4}$$

>> w3=parallel(w,w1)
Transfer function:

$$\frac{s^4 + 5s^3 + 13s^2 + 16s + 10}{s^4 + 4s^3 + 8s^2 + 8s + 4}$$

>> w4=feedback(w,w1)
Transfer function:

$$\frac{s^3 + 4s^2 + 6s + 4}{s^4 + 5s^3 + 12s^2 + 15s + 10}$$


```

2.5 Результаты экспериментальных исследований

Для проверки правильности проведенных преобразований необходимо собрать схему исходной САУ и соответствующую ей эквивалентную схему в MatLab Simulink. Задача считается решенной, если при подаче на вход обеих схем одинаковых типовых воздействий наблюдаются одинаковые выходные сигналы.

2.6 Содержание отчета

Отчет по выполняемой лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально на листах формата А4 в рукописном или машинном варианте исполнения и должен содержать:

- название работы;
- цель и задачи исследований;
- вариант задания;
- пошаговое преобразование заданной структурной схемы с описанием действий на каждом шаге;
- имитационные модели, построенные в MatLab Simulink;
- графики реакций исходной и преобразованной структурных схем на типовые входные воздействия;
- выводы по работе.

2.7 Контрольные вопросы

1. Какие математические модели применяются для описания САУ?
2. Что такое структурная схема, чем она отличается от функциональной?
3. Какие элементы могут присутствовать на структурной схеме?
4. Каким образом производится перестановка элементов на схеме?

5. Как перенести сумматор, узел на звено вперед/назад на схеме?
6. Какой эквивалентной передаточной функцией заменяются два звена, соединенных последовательно?
7. Какой эквивалентной передаточной функцией заменяются два звена, соединенных параллельно?
8. Какой эквивалентной передаточной функцией заменяется положительная/отрицательная обратная связь?
9. Как построить структурную схему непосредственно по дифференциальным уравнениям линейной системы?
10. Как построить структурную схему системы в пакете Simulink?
11. Какие элементы используются при построении простой одноконтурной АСУ в пакете Simulink?

2.8 Библиографический список рекомендуемой литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – СПб. : Профессия, 2007. - 752 с.
2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы : учеб. пособие для студ. вузов. - М.: Питер, 2006. - 336 с.
3. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. для студ. вузов М. Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2000 - 735 с.
4. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем - СПб. : БХВ - Петербург, 2004. <http://www.znaniyum.com/catalog.php?bookinfo=356672>
5. Ким Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. - М. : Физматлит, 2008. - 328 с. <http://www.iprbookshop.ru/17429.html>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Цель работы

Изучение методов анализа линейных САУ с помощью среды Matlab. Исследование устойчивости и качества САУ.

Трудоемкость лабораторной работы: 6 ч (4 ч – аудиторных, 2 ч – самостоятельная работа студента).

3.2 Краткие теоретические сведения

Временные характеристики

Динамические свойства звена могут быть определены по его переходной и импульсной (весовой) характеристикам.

Переходная характеристика $h(t)$ представляет собой процесс на выходе звена, возникающий при подаче на его вход скачкообразного воздействия при величине скачка, равной единице (рисунок 8).

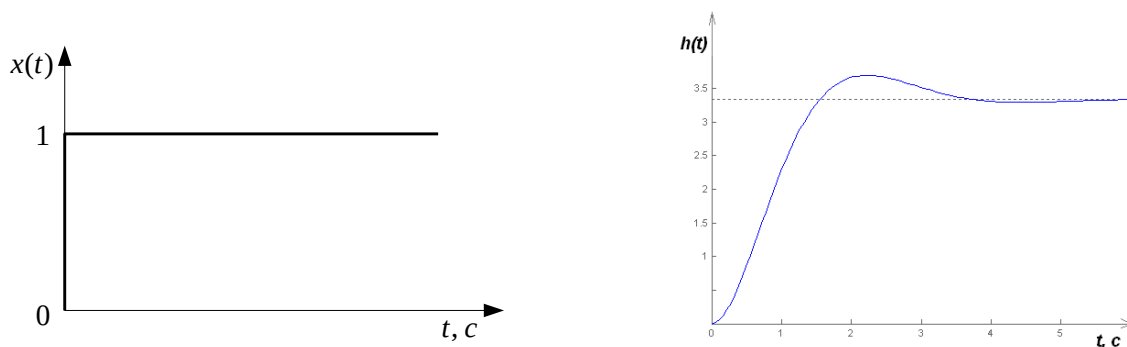


Рисунок 8 – Переходная характеристика звена

С помощью переходной характеристики находят показатели качества системы, перечисленные ниже.

1. **Время установления** (отрезок времени, за который переходная характеристика достигла первый раз своего установившегося значения) - t_y , установившееся значение выходной величины $h_{уст}$.

2. **Время регулирования** или **время переходного процесса** t_{nn} (время, по истечению которого отклонения управляющей величины относительно установившегося значения становится и остаётся по абсолютной величине меньше напередзаданной величины 2δ , где $\delta = (1 \div 5)\% h_{уст}$)

3. **Перерегулирование** (характеризует размах системы). Склонность системы к колебаниям, а следовательно, и запас устойчивости могут быть оха-

рактированы максимальным значением регулируемой величины - $h_{\max}$, или так называемым перерегулированием:

$$\partial = \frac{h_{\max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% .$$

Импульсная (весовая) характеристика $K(t)$ представляет собой реакцию звена на единичную импульсную функцию, поданную на его вход. Единичная импульсная функция, или дельта-функция (функция Дирака) тождественно равна нулю повсюду, кроме точки $t = 0$, где она стремится к бесконечности (рисунок 9).

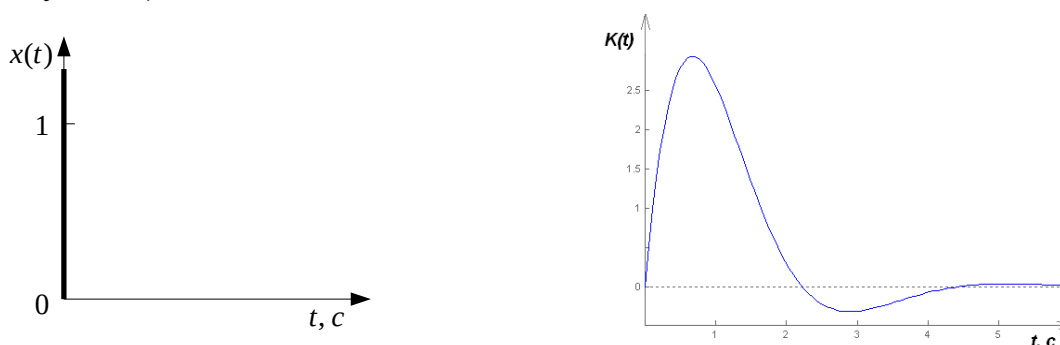


Рисунок 9 – Импульсная характеристика звена

Импульсная функция представляет собой распространенный вид входного воздействия и в автоматических системах, например, кратковременный удар нагрузки на валу двигателя, кратковременный ток короткого замыкания генератора, отключаемый плавкими предохранителями, и т.п.

К частотным характеристиками динамического звена относятся амплитудно-фазо-частотная (АФЧХ) и логарифмическая амплитудная (ЛАХ) и фазовая частотные характеристики (ЛФХ).

С помощью частотных характеристик проводят анализ устойчивости методами Михайлова и Найквиста, а также синтез САУ методом желаемых ЛАХ.

Общее условие устойчивости: чтобы непрерывная система была устойчиво необходимо и достаточно, чтобы вещественные части корней характеристического уравнения лежали в левой полуплоскости комплексной плоскости, т.е. были отрицательными.

Критерий Михайлова.

Рассмотрим характеристический полином:

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n . \quad (7)$$

Подставим в этот полином чисто мнимое значение $s = j\omega$. При этом получим характеристический комплекс

$$D(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega) = N(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (8)$$

где вещественная часть будет содержать четные степени ω :

$$X(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + \dots, \quad (9)$$

а мнимая - нечетные степени ω :

$$Y(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + \dots \quad (10)$$

1-я формулировка: система управления будет устойчива, если полное приращение фазы или аргумента $\varphi(\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ равно $n\frac{\pi}{2}$, где n - степень полинома $D(s)$. Если полное приращение аргумента $\varphi(\omega)$ окажется меньше $n\frac{\pi}{2}$, то система неустойчива.

Если значение частоты ω менять непрерывно от нуля до бесконечности, то вектор с модулем $N(j\omega)$ будет изменяться по величине и по направлению, описывая своим концом некоторую кривую (годограф), которая называется кривой Михайлова (рисунок 10).

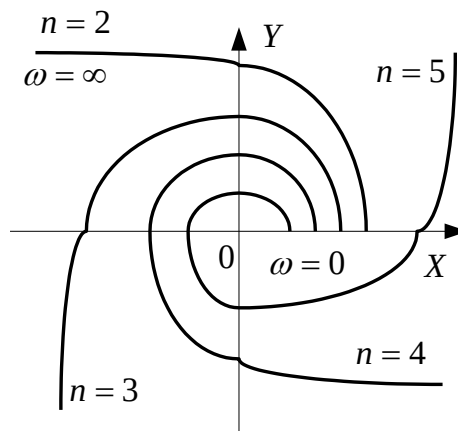


Рисунок 10 – Годографы Михайлова

2-я формулировка: для устойчивой системы годограф Михайлова проходит последовательно n квадрантов.

3-я формулировка: чтобы система управления была устойчива корни уравнений $X(\omega)=0$ (2.6) и $Y(\omega)=0$ (2.7) должны чередоваться.

3.3 Программа и методика выполнения работы

1. Ввести модель системы в виде передаточной функции.
2. Построить эквивалентные модели в пространстве состояний и в форме «нули-полюса».

3. Определить коэффициент усиления в установившемся режиме и полосу пропускания системы.

4. Научиться строить импульсную и переходную характеристики, карту расположения нулей и полюсов, частотную характеристику.

5. Научиться использовать окно LTIViewer для построения различных характеристик.

6. Научиться строить процессы на выходе линейной системы при произвольном входном сигнале.

7. Оформить отчет по работе.

Таблица 4 – Варианты задания

Вариант	n_2	n_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	0.4592
9.	1.8	-1.98	0.432	1.2000	0.7644	0.3556
10.	1.9	-0.76	-0.399	1.3333	0.8711	0.3556
11.	2.0	0.60	-0.360	1.2000	0.7406	0.2734
12.	2.1	1.68	0.315	1.3250	0.8281	0.2734
13.	2.2	-2.42	0.616	1.3059	0.7696	0.2076
14.	2.3	-0.46	-0.552	1.4235	0.8401	0.2076
15.	2.4	0.24	-0.480	1.3889	0.7531	0.1543
16.	2.5	2.25	0.500	1.5000	0.8086	0.1543
17.	2.6	0.26	-0.780	1.2421	0.6139	0.1108
18.	2.7	-0.27	-0.810	1.1368	0.5717	0.1108
19.	2.8	0.28	-0.840	0.8000	0.3700	0.0500
20.	2.9	3.19	0.870	0.7000	0.3500	0.0500

3.4 Описание лабораторной установки

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

Таблица 5 – Ход работы

Этап выполнения задания	Команды MATLAB
1. Очистите рабочее пространство MATLAB (память).	clear all
2. Очистите окно Matlab.	clc
3. Посмотрите краткую справку по команде tf.	help tf
4. Определите адрес файла, который выполняет эту команду.	which('tf')
5. Введите передаточную функцию $F(s) = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}{s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0}$ как объект tf. Значения коэффициентов следует взять из таблицы вариантов.	n = [n2 n1 n0] d = [1 d2 d1 d0] f = tf (n, d)
6. Проверьте, как извлечь из этого объекта числитель и знаменатель передаточной функции.	[n1,d1] = tfdata (f, 'v')
7. Найдите нули и полюса передаточной функции.	z = zero (f) p = pole (f)
8. 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)
10. Постройте модель системы в пространстве состояния.	f_ss = ss (f)
11. Сделайте так, чтобы коэффициент прямой передачи звена был равен 1.	f_ss.d = 1
12. Найдите новый коэффициент усиления звена в установившемся режиме.	k1 = dcgain (f_ss)
13. Как связаны коэффициенты k и k_1 ? Почему?	

Этап выполнения задания	Команды MATLAB
14. Постройте модель исходной системы в форме «нули-полюса».	$f_{zp} = zp(k, f)$
15. Проверьте, какие переменные есть в рабочем пространстве.	who или whos (в чем разница?)
16. Постройте на графике расположение нулей и полюсов системы.	pzmap (f)
17. 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.	 File – Import
20. Постройте импульсную характеристику (весовую функцию) этой системы.	 ПКМ – Plot Types - Impulse
21. Загрузите модель f_ss.	 File – Import
22. Проверьте, построена ли импульсная характеристика второй системы?	 ПКМ – Systems
23. Отключите систему f. Почему одинаковы построенные импульсные характеристики разных систем?	 ПКМ – Systems
24. Подключите обе системы.	 ПКМ – Systems
25. Постройте переходные характеристики систем.	 ПКМ – Plot Types – Step
26. Сделайте, чтобы на графике для каждой функции были отмечены: • максимум • время переходного процесса • время нарастания (от 10% до 90% установившегося значения) • установившееся значение	 ПКМ – 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.	
28. Экспортируйте построенный график в отдельное окно.	 File – Print to Figure

Этап выполнения задания	Команды MATLAB
29. Скопируйте график в буфер обмена в формате векторного метафайла.	<code>print -dmeta</code>
30. Вставьте график из буфера обмена в отчет (Microsoft Word).	 ПКМ - Вставить
31. Закройте окно LTIViewer.	
32. Создайте массив частот для построения частотной характеристики (100 точек в интервале от 10^{-1} до 10^2 с равномерным распределением на логарифмической шкале).	<code>w = logspace(-1, 2, 100);</code>
33. Рассчитайте частотную характеристику исходной системы. Частотная характеристика возвращается в виде трехмерного массива, в котором каждый элемент имеет 3 индекса: строка, столбец (для многомерных моделей) и номер точки частотной характеристики. Для системы с одним входом и одним выходом команда <code>r = r(:);</code> преобразует эти данные в обычный одномерный массив.	<code>r = freqresp (f, w);</code> <code>r = r(:);</code>
34. Постройте частотную характеристику на осях с логарифмическим масштабом по оси абсцисс.	<code>semilogx (w, abs(r))</code>
35. Скопируйте график в буфер обмена в формате векторного метафайла.	<code>print -dmeta</code>
36. Вставьте график из буфера обмена в отчет (Microsoft Word). Объясните, где на графике можно найти коэффициент усиления в статическом режиме и как определить полосу пропускания системы.	 ПКМ – Вставить
37. Закройте все лишние окна, кроме командного окна Matlab.	
38. Постройте сигнал, имитирующий прямоугольные импульсы единичной амплитуды с периодом 4 секунды (всего 5 импульсов).	<code>[u,t] = gensig('square',4);</code>
39. Выполните моделирование и постройте на графике сигнал выхода системы f при данном входе.	<code>lsim (f, u, t)</code>
40. Скопируйте график в буфер обмена в формате векторного метафайла.	<code>print -dmeta</code>

Этап выполнения задания	Команды MATLAB
41. Вставьте график из буфера обмена в отчет (Microsoft Word).	 ПКМ – Вставить

3.5 Результаты экспериментальных исследований

Результаты исследования оформить согласно таблицам 4, 5.

3.6 Содержание отчета.

Отчет по выполняемой лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально на листах формата А4 в рукописном или машинном варианте исполнения и должен содержать:

- название работы;
- цель и задачи исследований;
- текст программ;
- графики согласно таблице 5;
- выводы по работе.

3.7 Контрольные вопросы

1. Что такое: 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 постоянным времени колебательного звена?

4. Может ли четверка матриц

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

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

5. Как ввести передаточную функцию $F(s) = \frac{2s + 3}{s^2 + 4s + 5}$?

6. Как влияет изменение коэффициента прямой передачи (матрицы D в модели в пространстве состояний) на статический коэффициент усиления?
7. Как найти: коэффициент усиления в установившемся режиме по АЧХ, полосу пропускания системы по АЧХ?
8. Какие величины откладываются по осям на графике АЧХ?

3.8 Библиографический список рекомендуемой литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – СПб. : Профессия, 2007. - 752 с.
2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы : учеб. пособие для студ. вузов. - М.: Питер, 2006. - 336 с.
3. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. для студ. вузов М. Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2000 - 735 с.
4. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем - СПб. : БХВ - Петербург, 2004.
<http://www.znanium.com/catalog.php?bookinfo=356672>
5. Ким Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. - М. : Физматлит, 2008. - 328 с. <http://www.iprbookshop.ru/17429.html>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СИНТЕЗА ПИД-РЕГУЛЯТОРА

4.1 Цель работы

Исследование синтеза ПИД-регулятора с помощью инструментов пакета Matlab: Sisotool и Pidtool.

Трудоемкость лабораторной работы: 6 ч (4 ч – аудиторных, 2 ч – самостоятельная работа студента).

4.2 Краткие теоретические сведения.

Структурная схема ПИД-регулятора для непрерывной системы имеет вид:

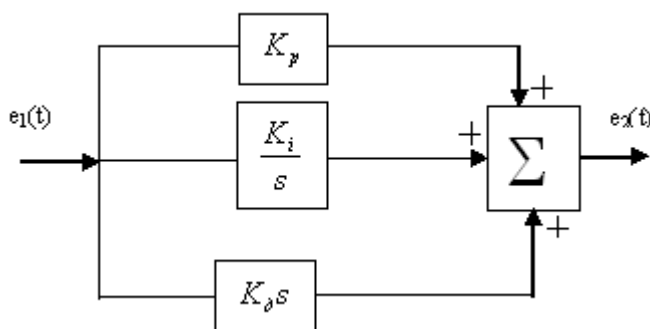


Рисунок 11 – структурная схема ПИД-регулятора

Передаточную функцию можно переписать в виде:

$$W_{\text{пид}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s},$$

где K_i , K_d и K_p – параметры интегральной, дифференциальной и пропорциональной составляющих закона регулирования.

Тогда передаточная функция разомкнутой системы с коррекцией будет иметь вид:

$$W_{\text{ск}}(s) = W_{\text{пид}}(s) \cdot W_o(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \cdot W_o(s),$$

где $W_o(s) = \frac{K(s+A)}{(s-s_1)(s-s_2)}$;

K , A , s_1 , s_2 – значения конкретного объекта управления.

Для того, чтобы синтезировать ПИД – регулятор, необходимо найти три параметра K_i , K_d и K_p .

Выбирая два нуля регулятора так, чтобы они компенсировали полюсы процесса, получаем:

$$s^2 + \frac{K_p}{K_\delta} s + \frac{K_i}{K_\delta} = (s - s_1)(s - s_2) = s^2 - s(s_1 + s_2) + s_1 s_2$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях s , получаем систему уравнений, с которой, подбирая вольным образом один из коэффициентов, находим 2 остальных. Таким образом, получаем все 3 параметра составляющих непрерывного ПИД-регулятора.

4.3 Программа и методика выполнения работы

В работе рассматривается система стабилизации судна на курсе. Ее структурная схема показана на рисунке 12.

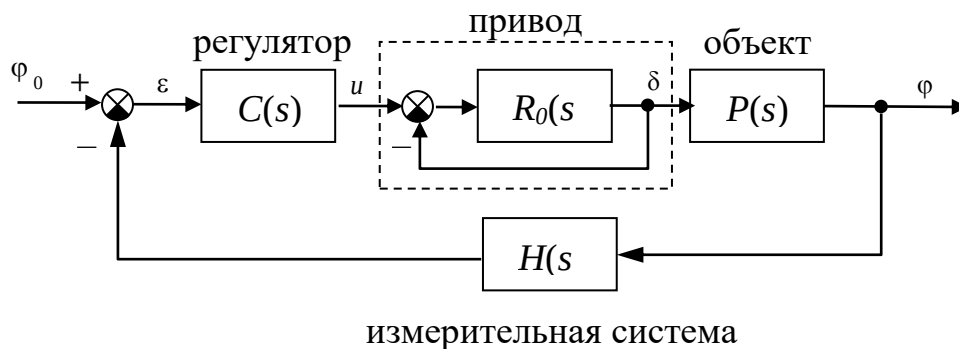


Рисунок 12 - Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

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

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, K – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*. Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

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

Привод (рулевая машина) приближенно моделируется как интегрирующее звено

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

охваченное единичной отрицательной обратной связью.

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

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

Таблица 6 – Варианты заданий

Вариант	T_s , сек	K , рад/сек	T_R , сек	T_{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

4.4 Описание лабораторной установки

Таблица 7 – Ход работы

Этап выполнения задания	Команды Matlab
1. Введите передаточную функцию модели судна $P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}$ как объект tf .	$P = \text{tf} (K, [T_s \ 1 \ 0])$
2. Введите передаточную функцию интегрирующего звена $R_0(s) = \frac{1}{T_R s}$.	$R0 = \text{tf} (1, [TR \ 0])$
3. Постройте передаточную функцию рулевого устройства, замкнув интегратор единичной отрицательной обратной связью.	$R = \text{feedback} (R0, 1)$
4. 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.	$\text{step} (G)$
6. Постройте передаточную функцию измерительного устройства $H(s) = \frac{1}{T_{oc} s + 1}$.	$H = \text{tf} (1, [Toc \ 1])$
7. Постройте передаточную функцию разомкнутого контура.	$L = G * H$
8. Постройте ЛАФЧХ разомкнутой системы.	$\text{bode} (L)$
9. Отметьте точки, определяющие пересечение ЛАЧХ с прямой 0 дБ и пересечение ЛФЧХ с прямой -180° .	 Figure No. 1 ПКМ – Characteristics – Stability (Minimum Crossing)
10. Определите, является ли замкнутая система устойчивой? Каковы запасы устойчивости по амплитуде (<i>Gain margin</i>) и фазе (<i>Phase margin</i>)? Какой регулятор неявно используется в этом случае? Скопируйте график ЛАФЧХ в отчет.	 Figure No. 1 ЛКМ на метках-кружках
11. Найдите максимальный коэффициент усиления разомкнутой системы. Объясните этот результат.	 Figure No. 1 ПКМ – Characteristics – Peak Response
12. Закройте окно с ЛАФЧХ и запустите модуль SISOTool (Single Input Single Output, система с одним входом и выходом).	sisotool

Этап выполнения задания	Команды Matlab
13. Импортируйте передаточную функцию G как модель объекта (<i>Plant</i>) и H как модель датчика (<i>Sensor</i>). Блоки F (предфильтр) и C (регулятор) оставьте без изменений (равными 1).	 SISO Design Tool File - Import
14. Отключите изображение корневого годографа так, чтобы в окне осталась только ЛАФЧХ.	 SISO Design Tool View – Root Locus (отключить)
15. Для того, чтобы сразу видеть изменения переходных процессов, запустите LTIViewer (Linear Time-Invariant, линейная стационарная система) из верхнего меню окна SISOTool . Расположите два окна рядом, чтобы они не перекрывали друг друга.	 SISO Design Tool Analysis – Response to Step Command
16. Оставьте только график переходного процесса на выходе, отключив вывод сигнала управления.	 LTI Viewer ПКМ – Systems – Closed loop r to u
17. Определите перерегулирование σ и время переходного процесса T_p . Скопируйте график в отчет.	 LTI Viewer ПКМ – Characteristics – • Peak Response • Settling Time
18. Перейдите в окно SISOTool . Определите коэффициент усиления, при котором перерегулирование примерно равно 10%. Как изменилось время переходного процесса? Каковы запасы устойчивости в этом случае? Скопируйте график в отчет.	 SISO Design Tool перетаскивание мышью ЛАЧХ, редактирование в поле <i>Current Compensator</i>
19. Перейдите в окно среды MATLAB и введите передаточную функцию пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора $C_{pd}(s) = 1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1}, \text{ где } T_v = 1 \text{ сек,}$ а T_s – постоянная времени судна.	$\text{Cpd} = 1 + \text{tf}([T_s \ 0], [T_v \ 1])$
20. Перейдите в окно SISOTool . Импортируйте регулятор C_{pd} как базовую модель для блока C .	 SISO Design Tool File – Import, Cpd -> C
21. Определите дополнительный коэффициент усиления, при котором перерегулирование примерно равно 10%. Найдите время переходного процесса и запасы устойчивости. Сравните пропорциональный и ПД-регуляторы. Скопируйте в отчет график переходного процесса.	 SISO Design Tool перетаскивание мышью ЛАЧХ, редактирование в поле <i>Current Compensator</i>
22. Определите дополнительный коэффициент усиления, при котором время переходного процесса минимально. Скопируйте в отчет график переходного процесса.	 SISO Design Tool перетаскивание мышью ЛАЧХ, редактирование в поле <i>Current Compensator</i>

Этап выполнения задания	Команды Matlab
23. Экспортируйте полученный регулятор в рабочую область MATLAB.	 File – Export в столбце <i>Export as</i> сменить имя Cpd на C кнопка <i>Export to workspace</i>
24. Постройте передаточную функцию полученной замкнутой системы. Подумайте, почему получилось такое громоздкое выражение. Каков должен быть порядок передаточной функции?	$W = C * G / (1 + C * G * H)$
25. Постройте минимальную реализацию передаточной функции W.	$W = \text{minreal}(W)$
26. Определите полюса передаточной функции замкнутой системы. Что означает близость некоторых полюсов к мнимой оси? Верно ли, что в этом случае будет малый запас устойчивости?	$\text{pole} (W)$
27. Найдите коэффициент усиления системы в установившемся режиме. Объясните результат. Есть ли у такой системы статическая ошибка при отслеживании постоянного сигнала? Почему? А для линейно возрастающего сигнала?	$\text{dcgain} (W)$
28. Как изменится статический коэффициент усиления, если модель датчика примет вид $H(s) = \frac{2K_{oc}}{T_{oc} + 1} ?$	
29. Постройте минимальную реализацию передаточной функции замкнутой системы от входа к сигналу управления (выходу регулятора).	$W_u = \text{minreal}(C / (1 + C * G * H))$
30. Постройте изменение сигнала управления при единичном ступенчатом входном сигнале и скопируйте график в отчет. Объясните, почему сигнал управления стремится к нулю.	$\text{step} (W_u)$

4.5 Результаты экспериментальных исследований

Результаты исследования оформить согласно таблицам 6, 7.

4.6 Содержание отчета

Отчет по выполняемой лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально на листах формата А4 в рукописном или машинном варианте исполнения и должен содержать:

- название работы;
- цель и задачи исследований;

- входные характеристики системы в базовом и измененном вариантах;
- расчет параметров моделирования;
- распечатка результатов трансляции и выполнения модели (или показать на экране);
- таблица входных характеристик системы;
- оценка результатов с точки зрения администрации системы и ее пользователей;
- графики зависимостей выходных характеристик системы от интенсивности потока заданий;
- характеристики программы модели (объем памяти, время трансляции и моделирования, среднее время исполнения блока);
- выводы по работе.

4.7 Контрольные вопросы

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

4.8 Библиографический список рекомендуемой литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – СПб. : Профессия, 2007. - 752 с.
2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы : учеб. пособие для студ. вузов. - М.: Питер, 2006. - 336 с.
3. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. для студ. вузов М. Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2000 - 735 с.
4. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем - СПб. : БХВ - Петербург, 2004.
<http://www.znanium.com/catalog.php?bookinfo=356672>
5. Ким Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. - М. : Физматлит, 2008. - 328 с. <http://www.iprbookshop.ru/17429.html>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ САУ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ

5.1 Цель работы

Цели лабораторной работы. Исследование способов синтеза системы управления с наблюдателем.

Трудоемкость лабораторной работы: 9 ч (6 ч – аудиторных, 3 ч – самостоятельная работа студента).

5.2 Краткие теоретические сведения

Метод модального управления предполагает, что все компоненты вектора состояния X могут быть измерены. Однако на практике некоторые компоненты могут быть неизвестны по одной из двух причин:

- измерительных приборов может быть недостаточно;
- некоторые компоненты вектора X могут не иметь физического смысла.

Однако если система является наблюдаемой, то все компоненты вектора X могут быть восстановлены по наблюдениям вектора Y .

Система, описываемая матрицами A и C , является наблюдаемой тогда и только тогда, когда существует конечное время T такое, что начальное состояние $X(0)$ может быть определено в результате наблюдения выходной переменной $y(t)$, $t=0..T$ при заданном управлении $u(t)$.

Наблюдаемость системы описывается условием:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C; CA; CA^2; \dots CA^{n-1} \end{bmatrix}^T = n.$$

Для системы с одним входом и одним выходом матрица управляемости (размером $n \times n$) имеет вид:

$$\begin{bmatrix} C; CA; CA^2; \dots CA^{n-1} \end{bmatrix}^T.$$

Если детерминант этой матрицы отличен от нуля, то система наблюдаема. Для того чтобы узнать все компоненты вектора состояния объекта, можно использовать его модель

$$\frac{d\hat{X}(t)}{dt} = A\hat{X}(t) + BU(t),$$

где $\hat{X}(t)$ - оценка состояния объекта. Если начальное состояние объекта и модели совпадают и модель адекватна объекту, то можно полагать в любой момент времени, что

$$\hat{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{X}(t).$$

Однако практически добиться полной адекватности объекта и модели невозможно, невозможно может быть и полное равенство начальных условий. Поэтому на практике можно рассчитывать лишь на выполнение условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{X}(t).$$

Подобным свойством обладают так называемые асимптотические наблюдающие устройства. Асимптотическое наблюдающее устройство использует обратную связь по ошибке восстановления вектора состояния, так что работа наблюдающего устройства описывается уравнением

$$\frac{d\hat{\mathbf{X}}(t)}{dt} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}U(t) + \mathbf{N}(\mathbf{Y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t)),$$

где $\mathbf{N}$ – матрица параметров наблюдающего устройства.

Общий вид системы управления с наблюдателем показан на рисунке 13.

Параметры наблюдателя и параметры регулятора могут рассчитываться независимо. Понятно, что процессы в наблюдателе должны протекать более быстро, чем переходный процесс в системе. Эмпирически установлено, что наблюдатель должен обладать быстродействием, в 2–4 раза превышающим быстродействие системы.

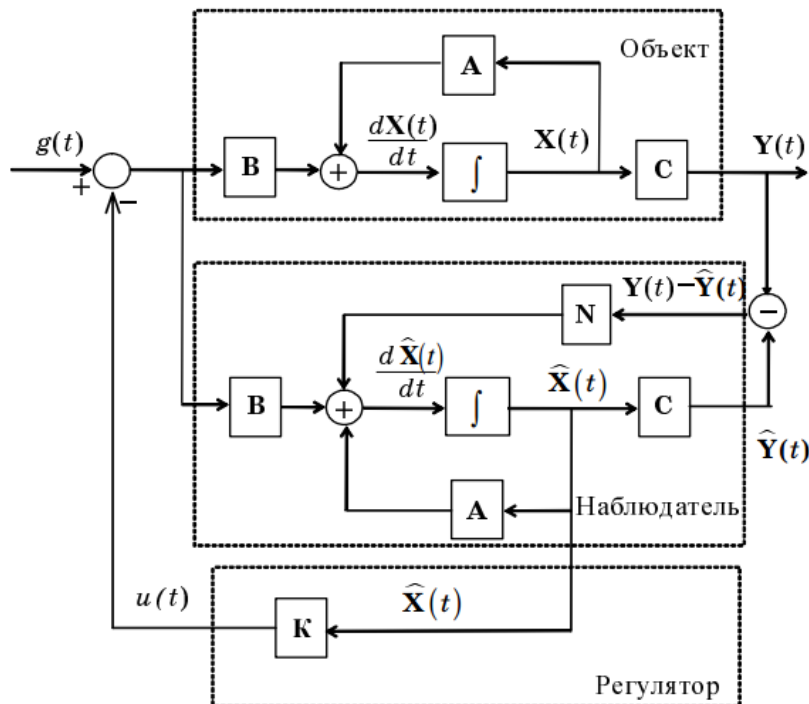


Рисунок 13 – Структура системы управления с наблюдателем

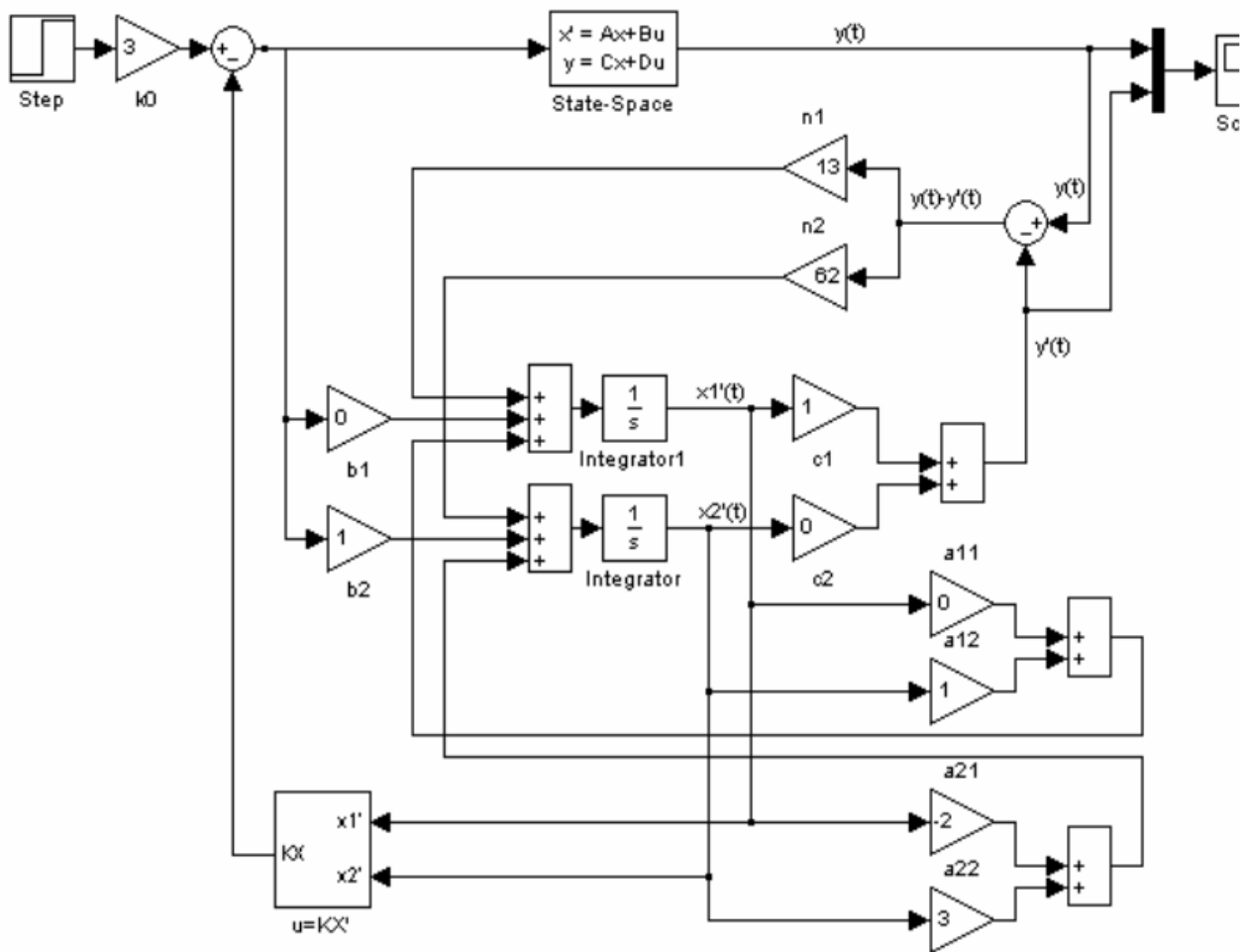


Рисунок 14 – Моделирование работы наблюдателя в Simulink MatLab

5.3 Программа и методика выполнения работы

1. Для заданного варианта объекта управления, заданного матрицами A , B , C обосновать возможность модального управления с помощью критерия управляемости.
2. Рассчитать коэффициенты обратной связи, при которой обеспечивается желаемое расположение полюсов замкнутой системы.
3. С помощью выбора масштабирующего коэффициента обеспечить в системе нулевую статическую ошибку.
4. Рассчитать параметры наблюдающего устройства для восстановления вектора состояния объекта.
5. Собрать в Simulink MatLab структурную схему системы с модальным регулятором (используя блок State space) и наблюдателем.
6. Исследовать влияние параметров наблюдающего устройства на характер переходных процессов в системе.

Таблица 8 – Варианты задания

№ варианта	А	В	С
1	$\begin{bmatrix} -39 & -71 & -23 \\ 23 & 40 & 13 \\ -6,6 & -10,7 & -3,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[28000 84000 112000]
2	$\begin{bmatrix} -44 & -78 & -25 \\ 26 & 43,7 & 14 \\ -7,5 & -11,8 & -3,7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[28000 84000 112000]
3	$\begin{bmatrix} -54 & -98 & -32 \\ 31 & 55 & 17,8 \\ -9 & -15 & -4,8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[35000 105000 140000]
4	$\begin{bmatrix} -60,8 & -107 & -34,7 \\ 35 & 60 & 19 \\ -10 & -16,7 & -5,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[35000 105000 140000]
5	$\begin{bmatrix} -72,4 & -130,6 & -42,5 \\ 41,5 & 73 & 23,6 \\ -12 & -20,6 & -6,6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[42000 126000 168000]
6	$\begin{bmatrix} -80,4 & -142,5 & -46 \\ 45,9 & 79,6 & 25,6 \\ -13,6 & -22,6 & -7,2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[42000 126000 168000]
7	$\begin{bmatrix} -100,5 & -174,4 & -56 \\ 57 & 97 & 31 \\ -17 & -28 & -8,9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[42000 126000 168000]
8	$\begin{bmatrix} -13,2 & -16,3 & -4,7 \\ 8,6 & 9,5 & 2,6 \\ -2,4 & -1,6 & -0,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[3500 10500 14000]
9	$\begin{bmatrix} -11,4 & -16,7 & -5,13 \\ 7,5 & 9,7 & 2,9 \\ -2 & -1,6 & -0,36 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[7000 21000 28000]
10	$\begin{bmatrix} -16,2 & -26,3 & -8,3 \\ 10,2 & 15 & 4,6 \\ -2,9 & -3,2 & -0,9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	[14000 42000 56000]

№ варианта	A	B	C
11	$\begin{bmatrix} -22,3 & -38,6 & -12,4 \\ 13,6 & 21,9 & 6,9 \\ -3,9 & -5,3 & -1,6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	$[21000 \quad 63000 \quad 84000]$
12	$\begin{bmatrix} -34 & -54 & -17 \\ 20 & 30,5 & 9,4 \\ -5,9 & -7,9 & -2,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	$[21000 \quad 63000 \quad 84000]$
13	$\begin{bmatrix} -16,2 & -26,3 & -8,3 \\ 10,2 & 15 & 4,6 \\ -2,9 & -3,2 & -0,9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	$[14000 \quad 42000 \quad 56000]$
14	$\begin{bmatrix} -22,3 & -38,6 & -12,4 \\ 13,6 & 21,9 & 6,9 \\ -3,9 & -5,3 & -1,6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	$[21000 \quad 63000 \quad 84000]$
15	$\begin{bmatrix} -34 & -54 & -17 \\ 20 & 30,5 & 9,4 \\ -5,9 & -7,9 & -2,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,228 \\ -0,127 \\ 0,038 \end{bmatrix}$	$[21000 \quad 63000 \quad 84000]$

5.4 Описание лабораторной установки

В программном комплексе MatLab для формирования модели в пространстве состояний используется функция ss,

```
>> sys = ss(A, B, C, D),
```

где A, B, C, D – матрицы модели. Матрица наблюдаемости может быть построена с помощью функции obsv, которая также может вызываться в одном из вариантов:

```
>> N = obsv(A, C)
```

```
>> N = obsv(sys)
```

```
>> N = obsv(sys.A, sys.C)
```

Описанная выше функция acker может быть применена и для расчета коэффициентов обратных связей наблюдателя одномерной системы. Для этого надо транспонировать матрицу A и заменить B на CT:

```
>> N=acker(AT, CT, P),
```

где P – вектор желаемых полюсов наблюдателя.

Например:

```
>> A=[0 1; -2 3];
```

```
>> B=[0; 1];
```

```
>> C=[1 0];
```

```
>> P=[-5 -5];
```

```
>> N1=acker(A', C', P);
```

```
>> N=N1';
```

```
N =
```

13
62

Для последнего примера на рисунке 14 приведена собранная в MatLab Simulink структура системы с наблюдающим устройством.

Для многомерных (и одномерных) систем эту же задачу можно решить с помощью функции place

```
>>N=place(AT ,CT ,P)
```

В MatLab существуют специальные функции для формирования наблюдателя. Функция estim формирует наблюдающее устройство в виде ss- объекта для оценивания вектора переменных состояния модели объекта управления sys и для заданной матрицы коэффициентов обратных связей наблюдателя L:

```
>> est=estim(sys,L)
```

Функция reg формирует регулятор для заданной в пространстве состояний модели объекта управления sys, матрицы коэффициентов обратных связей по переменным состояния K и матрицы коэффициентов обратных связей наблюдателя L:

```
>> rsys=reg(sys,K,L) .
```

5.5 Результаты экспериментальных исследований

Переходные процессы оформить в виде графиков.

5.6 Содержание отчета

Отчет по выполняемой лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально на листах формата А4 в рукописном или машинном варианте исполнения и должен содержать:

- название работы;
- цель и задачи исследований;
- расчетную часть;
- структурную схему моделирования в MatLab Simulink;
- графики переходных процессов в системе;
- выводы по работе.

5.7 Контрольные вопросы

1. Привести схему системы управления с наблюдателем и пояснить ее смысл.
2. Для чего служит наблюдатель?
3. Что означает термин «система наблюдаема»?
4. Что такое модальное управление?
5. В каких случаях в системах управления требуется наблюдатель?

5.8 Библиографический список рекомендуемой литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – СПб. : Профессия, 2007. - 752 с.
2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы : учеб. пособие для студ. вузов. - М.: Питер, 2006. - 336 с.
3. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. для студ. вузов М. Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2000 - 735 с.
4. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем - СПб. : БХВ - Петербург, 2004. <http://www.znanium.com/catalog.php?bookinfo=356672>
5. Ким Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. - М. : Физматлит, 2008. - 328 с. <http://www.iprbookshop.ru/17429.html>

В авторской редакции

Изд. № 319/2020. Объем 2,75 п.л.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»