СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум является важной составной частью учебного плана дисциплины “Теория автоматического управления”. В шестом семестре студенты изучают первую часть данного курса, которая включает 3 раздела:

1) линейные непрерывные системы автоматического управления;

2) линейные импульсные системы автоматического управления;

3) системы управления при случайных воздействиях.

В соответствии с этими разделами организован и лабораторный практикум, состоящий из восьми лабораторных работ. Первые 5 лабораторных работ посвящены исследованиям по ключевым разделам теории линейных САУ – построению характеристик типовых звеньев, устойчивости, оценке качества и точности линейных САУ, синтезу регуляторов (л/р № 1, 2, 3, 4, 5). 2 лабораторные работы посвящены исследованиям особенностей линейных импульсных САУ (л/р 6, 7). По третьему разделу выполняется одна лабораторная работа (л/р 8).

Все лабораторные работы выполняются на персональном компьютере с использованием свободно распространяемого программного комплекса *Scilab*. Выполнение лабораторных работ и своевременная их защита в сочетании с основной работой на практических занятиях способствует освоению и закреплению инженерных навыков по решению задач анализа и синтеза линейных САУ и являются серьёзной базой для успешной сдачи экзамена по курсу “Теория автоматического управления, часть 1”.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Временные и частотные характеристики типовых линейных звеньев

Цель работы

Научиться определять по переходным и частотным характеристикам линейных звеньев их параметры с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

Линейную систему можно представить в виде совокупности элементарных звеньев [1]. Звену ставится в соответствие оператор преобразования входной величины в выходную - передаточная функция (ПФ) $W(s)$. На звено можно воздействовать единичным ступенчатым воздействием – получим переходную функцию, импульсом типа дельта-функции – получим импульсную (весовую) характеристику. При замене оператора s на $j\omega$ получим амплитудно-фазовую характеристику (АФХ). Для компактности и удобства вычислений применяются ЛАЧХ и ЛФЧХ (логарифмические амплитудно- и фазо-частотные характеристики) звеньев, а также годограф - геометрическое место конца вектора АФХ при изменении частоты ω от 0 до ∞.

Код, представленный ниже, позволяет задать и исследовать линейную систему в среде *Scilab*, описываемую передаточной функцией $W(s)=\dfrac{3}{0.8s+1}$:

```
W = poly([3], ‘s’, ‘c’) / poly([1 0.8], ‘s’, ‘c’);
M = syslin(‘c’, W);
plot(csim(“step”, 0:0.01:10, M));
xgrid();
nyquist(M);
bode(M);
```

Функция **syslin** определяет линейную систему в виде списка и проверяет правильность данных. Первый параметр определяет тип системы: непрерывная (“*c*”) или дискретная (“*d*”). Вторым параметром задаётся передаточная функция звена. Для этого вначале функцией **poly** введена переменная s в качестве аргумента многочлена. Для расчета переходного процесса непрерывных систем используется функция **csim**, входными параметрами которой являются строканазвание функции *Scilab*, задающая входное воздействие, вектор моментов времени (диапазон с промежутком) и имя исследуемой системы. Функция **plot** здесь используется для отображения на экране рассчитанного переходного процесса. Функция **xgrid** служит для нанесения сетки на график. Функции **nyquist** и **bode** позволяют строить годограф и ЛАЧХ/ЛФЧХ системы **M** соответственно.

Важно отметить, каждая задаваемая передаточная функция должна содержать явный знаменатель, даже если он равен единице. Например, передаточная функция $W(s)=3(0.8s+1)$ задаётся следующий образом:

```
    W = poly([3 2.4], ‘s’, ’c’) / poly([1], ‘s’, ‘c’);
```

Задание

Параметры передаточных функций для вариантов заданы в табл 1.1.

1. Построить переходную, амплитудно-фазовую(годограф) и логарифмические частотные характеристики апериодического звена $W(s)=\dfrac{k}{\mathrm{Ts}+1}$. Определить по графикам и отметить на них параметры *k, T*.
2. Построить амплитудно-фазовую и логарифмические частотные характеристики форсирующего звена $W(s)=k(\mathrm{Ts}+1)$. Определить по графикам и отметить на них параметры *k, T*.
3. Построить переходную, амплитудно-фазовую и логарифмические частотные характеристики колебательного звена $W(s)=\dfrac{k}{T^2s^2+2\varsigma\mathrm{Ts}+1}$. Определить по графикам и отметить на них параметры *k, T*, ς.
4. Построить переходную, амплитудно-фазовую и логарифмические частотные характеристики звена с передаточной функцией $W(s)=\dfrac{k(2\mathrm{Ts}+1)}{(T^2s^2+2\varsigma\mathrm{Ts}+1)(\mathrm{Ts}+1)}$.

Определить по графикам и отметить на них параметры k, T, ς.

Отчет должен содержать задание, код программы, графики характеристик по каждому пункту задания и выводы.

Таблица 1.1. Варианты задания

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
K	2	2	3	3	4	4	5	5	1	1
T	1	0,8	1	0,8	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,9
ς	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.4

Дополнительные вопросы

1. Какой физический смысл амплитудной и фазовой частотных характеристик?
2. Какая связь между переходной, весовой и передаточной функциями?
3. Назовите элементарные звенья и напишите их передаточные функции.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование устойчивости линейных и непрерывных САУ

Цель работы

Исследовать двумя методами устойчивость линейной системы с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

Необходимым условием работоспособности САУ является устойчивость, которая может быть определена на основе соответствующих алгебраических или частотных критериев [1-3].

В соответствии с основным условием устойчивости (алгебраический критерий), для устойчивости замкнутой САУ необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения имели отрицательную действительную часть, т.е. располагались в левой части комплексной плоскости (такие корни также называют «левыми»). Для быстрой проверки устойчивости замкнутой системы можно воспользоваться критерием устойчивости Стодолы, по которому необходимым условием устойчивости замкнутой САУ является положительность всех коэффициентов её характеристического уравнения (важно отметить, что данный критерий является необходимым, но не достаточным).

Для расчёта корней характеристического уравнения в программе *Scilab* используется функция **roots**, принимаю объект типа **poly** в качестве аргумента и возвращающая его корни:

```
roots(poly([5 2 1.5 1],’s’,’c’));
```

Вручную вычислить корни характеристического уравнения замкнутой системы при высоком порядке последней бывает очень сложно и в таком случае предпочтительно использовать частотные критерии устойчивости, например, критерий Найквиста. По критерию Найквиста, чтобы система в замкнутом состоянии была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы при изменении ω от $-\infty$

до +∞ годограф разомкнутой системы $W(j\omega)$, поворачиваясь вокруг начала координат по часовой стрелке, охватил точку $(-1, j0)$ столько раз, сколько корней в правой полуплоскости содержит знаменатель $W(j\omega)$. Если корней в правой полуплоскости нет, то годограф разомкнутой системы $W(j\omega)$ не должен охватывать точку с координатами $(-1, j0)$.

Запас устойчивости по амплитуде задается величиной ΔL, на которую должен отличаться модуль АФЧХ разомкнутой системы от единицы на частоте, при которой фаза равняется -180°.

Запас устойчивости по фазе задается углом, на который должна отличаться фаза АФЧХ разомкнутой системы от -180° на частоте, при которой модуль равняется единице.

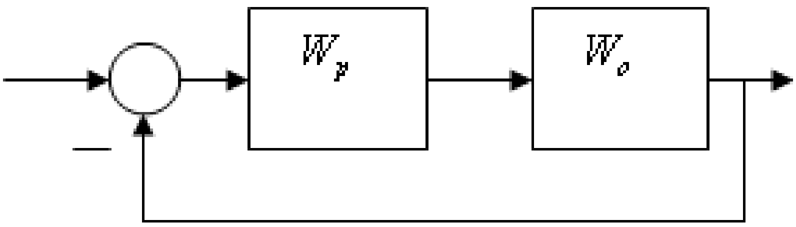

Рисунок 2.1. Структурная схема исследуемой САУ

Задание

Требуется исследовать устойчивость замкнутой системы (рис. 2) при П-, ПД- и ПИ-регуляторе путем вычисления корней характеристического уравнения и по критерию Найквиста.

Передаточная функция объекта имеет вид $W_o = \dfrac{1}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + 1}$. Параметры объекта и регулятора приведены в таблице 2.

1. Исследовать устойчивость при пропорциональном регуляторе $W_p = k_n$, где $k_n = 1;\ 4$. На графике годографа отметьте запасы устойчивости по амплитуде и по фазе, если они есть. По годографу опытным путем определите граничное значение k_n.

2. Исследовать устойчивость при пропорционально-дифференциальном регуляторе $W_p = k_n + \kappa_\partial s$, где $k_n = 4$ и значение k_∂ приведено в таблице 2.1. Если система при табличном значении k_∂ неустойчива, то, изменяя его, добейтесь ее устойчивости, если она устойчива, то, изменяя его, добейтесь неустойчивости. По годографу опытным путем определите граничное значение k_∂. На годографе отметьте запасы устойчивости по амплитуде и по фазе.

Таблица 2.1. Варианты задания

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
a_0	1	2	2	1	1	3	3	2	2	3
a_1	2	2	3	1,5	2	4	2	2	4	3
a_2	2	3	2	2	1,5	2	4	4	2	3
$k_д$	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1
$k_и$	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3

3. Исследовать устойчивость при пропорционально-интегральном регуляторе $W_p = k_п + k_и / s$, где $k_п = 1$ и значение $k_и$ приведены в таблице 2.1. Если система при табличном значении $k_и$ неустойчива, то, изменяя его, добейтесь ее устойчивости, если она устойчива, то, изменяя его, добейтесь неустойчивости. По годографу опытным путем определите граничное значение коэффициента $k_и$. На годографе отметьте запасы устойчивости по амплитуде и по фазе.

Отчет должен содержать задание, код программы, значения корней, запасы устойчивости, графики характеристик по каждому пункту задания и выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование качества линейных непрерывных САУ

Цель работы

Научиться определять прямые показатели качества системы с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

Система может быть устойчивой, т. е. ее переходный процесс носит затухающий характер, но время затухания настолько велико или ошибка в установившемся режиме настолько большая, что практически данная система не может быть использована. Поэтому система должна быть не только устойчивой, но и иметь переходный процесс, удовлетворяющий заданным требованиям качества.

Качество системы управления определяется совокупностью свойств, обеспечивающих эффективное функционирование всей САУ в целом. Эти свойства называют показателями качества системы управления, которые подразделяются на прямые и косвенные.

Между показателями качества существует тесная взаимосвязь, поэтому стремление улучшить какой-либо из них может привести к ухудшению другого. Так, например, стремление уменьшить ошибку автоматического регулирования приводит к уменьшению запаса устойчивости и быстродействия и наоборот.

Прямыми называются показатели качества, которые определяют по графику переходной функции при воздействии на систему единичного ступенчатого воздействия. Основные показатели: перерегулирование σ, установившаяся ошибка e_∞, время регулирования t_p.

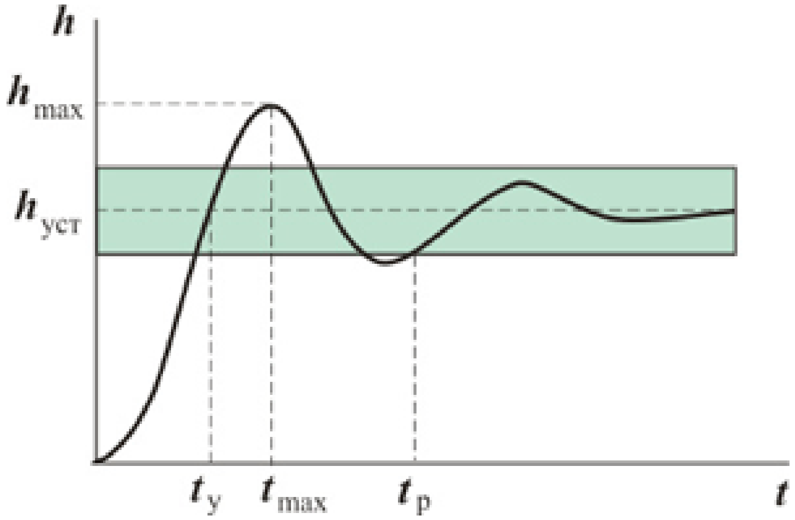

Рисунок 3.1. Переходной процесс с отмеченными величинами для вычисления прямых показателей качества

Если система статическая, то в ней будет присутствовать установившаяся ошибка e_∞. Ее измеряют по графику переходной характеристики после окончания переходного процесса. Ошибка регулирования равна разности между требуемым и действительным значениями регулируемой величины. Точность САУ оценивается в установившемся режиме по величине установившейся ошибки $e_\infty = 1 - h_{уст}$.

Время регулирования t_p определяется замером длительности переходного процесса. Теоретически переходный процесс длится бесконечно долго, однако практически считают, что он заканчивается, как только отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения не превышает пределов «коридора». Обычно коридор составляет 3 ... 5 % от установившегося значения $h_{уст}$. Временем регулирования характеризуют быстродействие системы. В особых случаях значение коридора оговаривается отдельно.

Перерегулирование σ представляет собой максимальное отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения. Обычно первый максимум является наибольшим. Перерегулирование вычисляется по формуле:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\ \%. \tag{3.1}$$

Задание

Требуется исследовать устойчивость системы управления (рис. 2.1) из предыдущей лабораторной работы при типовых законах управления. Значения параметров ОУ (a_0, a_1, a_2) приведены в таблице 2.1. Прямые показатели качества по каждому пункту задания вместе с коэффициентами исследуемого канала регулирования необходимо занести в таблицу 3.1.

1. Определить граничное значение $k_г$ по формуле

$$k_г = \frac{a_1 a_2}{a_0} - 1 \tag{3.2}$$

2. Определить по переходной характеристике прямые показатели качества при П-регуляторе $W_p(s) = k_п, k_п = \alpha k_г,\ \alpha = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$.

3. Определить по переходной характеристике прямые показатели качества при ПД-регуляторе $W_p(s) = k_п + k_д s, k_п = 0,9 k_г,\ k_д = 0,5; 1; 2; 4; 8.$

4. Определить по переходной характеристике прямые показатели качества при ПИ-регуляторе $W_p = k_п + \frac{k_и}{s}$, $k_п = 0,1 k_г$. $k_и$ подберите для своей системы, чтобы она была устойчива.

Отчет должен содержать задание, код программы, заполненную таблицу 3.1 и выводы.

Таблица 3.1. Прямые показатели качества исследуемой САУ

k_i				
t_p				
σ				
e_∞				

Дополнительные вопросы:

1. Существует ли взаимосвязь между частотными и прямыми показателями качества?

2. Каким образом можно достичь наименьшего времени регулирования,

наименьшего перерегулирования и наименьшей установившейся ошибки для каждого регулятора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Метод коэффициентов ошибки

Цель работы

Исследовать точность системы методом коэффициентов ошибки (МКО) в установившемся режиме с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

Оценка точности – важная часть процедуры анализа и синтеза САУ, позволяющая аналитически рассчитать ошибку в установившемся режиме с учётом типа и величины задающего и возмущающего воздействий. В случае линейных САУ, для которых справедлив принцип суперпозиции, ошибка в установившемся режиме является суммой ошибок от задающего и возмущающего воздействий, а каждая из этих ошибок может быть рассчитана по методу коэффициентов ошибки [1, 2].

Для использования данного метода в первую очередь необходимо рассчитать передаточные функции ошибки по задающему и возмущающему воздействиям, которые для структурной схемы, изображённой на рис.4.1, имеют вид:

$$W_{ge}(s)=\frac{1}{\left(1+W_P(s)W_o(s)\right)},\qquad W_{fe}(s)=\frac{W_o(s)}{\left(1+W_P(s)W_o(s)\right)}. \tag{4.1}$$

Тогда, согласно МКО, значение ошибки ***по входу*** g(t) определяется как:

$$e_g(t)=\sum_{m=0}^{\infty}\frac{C_m}{m!}\cdot\frac{d^m g(t)}{dt^m},\qquad C_m=\left[\frac{\partial^m W_{ge}(s)}{\partial s^m}\right]_{s=0}. \tag{4.2}$$

При расчёты обычно ограничиваются первыми тремя коэффициентами, поскольку они в наибольшей степени влияют на ошибку: C_0 – коэффициент статической ошибки, возникающей в системе при отработке постоянного воздействия; C_1 – коэффициент кинетической ошибки (ошибки по скорости), возникающей в системе при отработке линейно – возрастающего воздействия; C_2 – коэффициент ошибки по ускорению, возникающей в системе при отработке более сложных входных воздействий.

Аналогично для расчета ошибки ***по помехе*** в последние две формулы необходимо подставить $f(t)$ и $W_{fe}(s)$.

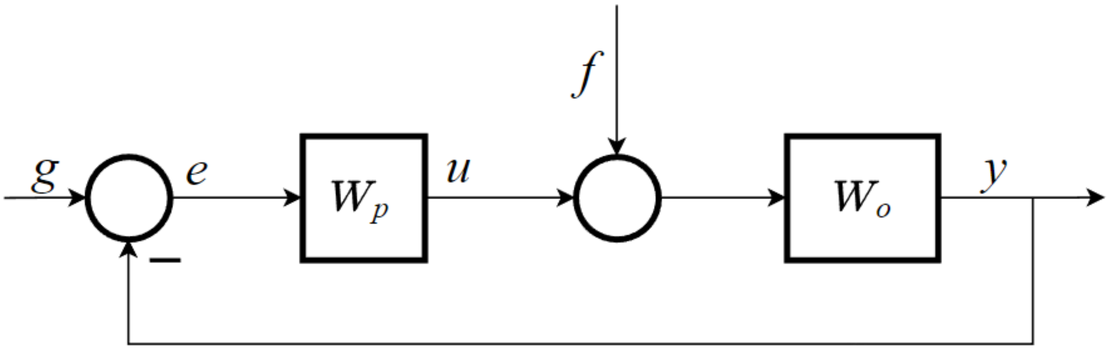

Рисунок 4.1. Структурная схема системы управления с возмущением

Задание

1. Собрать в среде визуального моделирования *Xcos*, встроенной в программный комплекс *Scilab,* замкнутую систему (рис. 4.1) с пропорциональным регулятором и объектом управления третьего порядка, представленного тремя апериодическими звеньями (параметры звеньев указаны в табл. 4.1).

Таблица 4.1. Варианты задания

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
k_1	1	1	5	1	6	2	2	1	3	4
k_2	4	1	1	4	1	3	2	6	2	1
k_3	1	1	3	5	6	1	2	3	1	1
T_1	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,5	0,6	0,9	1
T_2	0,4	0,7	0,6	0,2	0,5	0,8	0,3	0,2	0,7	0,8
T_3	0,03	0,04	0,09	0,03	0,01	0,01	0,08	0,09	0,04	0,04

2. Отметить места получения переходной характеристики ошибки по входу и ошибки от помехи. Выполнить эксперименты и заполнить табл. 4.2 и табл. 4.3. В таблицу необходимо занести величины ошибок, экспериментально полученных моделированием и рассчитанных методом коэффициентов ошибки.

3. Из экспериментов следует заключить, какова зависимость установившейся ошибки от величины и типа входного воздействия и величины и типа помехи.
4. Установившаяся ошибка в общем случае не равна нулю и зависит от $W(s)$, $g(t)$ и $f(t)$. Таким образом, ***для случаев*** статической системы, необходимо попытаться избавиться от ошибки за счёт поочерёдного добавления интегратора в регулятор и объект управления.
5. Сделать вывод, каким образом место включения интегратора в систему влияет на установившуюся ошибку по входу и по возмущению. Если в каких-то случаях ошибка все еще останется, то попробовать повысить порядок астатизма. Проверить, не приведет ли это к неустойчивости САУ.

Таблица 4.2 Ошибки в системе при негармонических воздействиях

Вх.возд. *g(t)*	1	1	5	*t*	*t*	5*t*
Помеха *f(t)*	5	1	1	5*t*	*t*	*t*
Ош.по входу эксперим.						
Ош.по помехе экспер.						
Ош.по входу рассчит.						
Ош.по помехе рассчит.						

Таблица 4.3. Ошибки в системе при гармонических воздействиях

Вх.возд. *g(t)*	*A·sin(t)*	*A·sin(t)*	*A·sin(50t)*	*10·A·sin(t)*	*A·sin(t)*
Помеха *f(t)*	*A·sin(50t)*	*A·sin(t)*	*A·sin(t)*	*A·sin(t)*	*10·A·sin(t)*
Ош.по входу эксперим.					
Ош.по помехе экспер.					
Ош.по входу рассчит.					
Ош.по помехе рассчит.					

Отчет должен содержать задание, изображение собранной модели, расчеты, заполненную таблицу и выводы.

Дополнительные вопросы

1. В чем заключается метод коэффициентов ошибки?
2. От чего зависит установившаяся ошибка?
3. Что такое ошибка по положению, по скорости, ошибка по ускорению?
4. Чем отличается астатическая система от статической?
5. Когда система будет астатической относительно входного воздействия, а когда астатической относительно помехи?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Синтез и анализ непрерывных систем управления максимальной степени устойчивости

Цель работы

Синтезировать оптимальные по степени устойчивости параметры ПД- и ПИД-регуляторов и исследовать качество системы в зависимости от свободных параметров с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

Рассмотрим замкнутую систему (рис. 2.1), состоящую из объекта и регулятора. Если передаточную функцию объекта третьего порядка привести к виду $W_o = \dfrac{b_0}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}$, то оптимальные по степени устойчивости параметры ПД-регулятора ($W_p = k_n + k_\partial s$) определяются следующим образом [1]:

$$k_n = \frac{1}{b_0}\left(\frac{a_1^3}{27} + \omega^2 \frac{a_1}{3} - a_3\right),$$
$$k_\partial = \frac{1}{b_0}\left(\omega^2 + \frac{a_1^2}{3} - a_2\right), \tag{5.1}$$

где ω - свободный параметр.

Соотношения для определения оптимальных по степени устойчивости параметров ПИД-регулятора ($W_p = k_n + k_\partial s + k_u / s$) имеют следующий вид [1]:

$$k_n = \frac{1}{b_0}\left(\left(\omega^2+\beta^2\right)\frac{a_1}{2}+\frac{a_1^3}{16}-a_3\right),$$

$$k_u = \frac{1}{b_0}\left(\frac{1}{256}a_1^4+\left(\omega^2+\beta^2\right)\frac{a_1^2}{16}+\omega^2\beta^2\right), \qquad (5.2)$$

$$k_\partial = \frac{1}{b_0}\left(\omega^2+\beta^2+\frac{3}{8}a_1^2-a_2\right),$$

где ω и β - свободные параметры.

Свободные параметры являются мнимыми частями корней характеристического уравнения синтезированной системы и характеризуют степень колебательности системы.

Степень устойчивости и степень колебательности относят к корневым оценкам качества. Степень устойчивости численно равна абсолютному значению действительной части ближайшего к мнимой оси корня. Чем больше степень устойчивости, тем быстрее затухает процесс. Степень колебательности, косвенно характеризует колебательность системы. Если степень колебательности равна нулю, то переходный процесс будет апериодическим. Степень колебательности численно равна абсолютному значению отношения мнимой к действительной части корня характеристического уравнения с наибольшим абсолютным значением этого отношения.

При анализе результатов важно найти связь между степенью колебательности системы и максимальной степенью устойчивости, а также характер зависимости прямых показателей качества от значений свободных параметров.

Таблица 5.1. Варианты задания

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
a_0	0,5	2	5	4	0,2	5	0,4	0,8	0,5	0,25
a_1	2	3	10	1,5	2	4	0,8	2	4	5
a_2	2	4	2	2	1,5	2	4	4	0, 2	1
a_3	0,1	0	5	10	0	1	0, 2	0	2	0, 1

Задание

Задана система (рис. 2.1) с передаточной функцией объекта $W_o = \dfrac{1}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}$, параметры объекта приведены в табл. 5.1.

1. Составить программу для синтеза и анализа системы максимальной степени устойчивости с ПД- регулятором, определить корни характеристического

уравнения синтезированной замкнутой системы при следующих значениях свободного параметра: $\omega = 2,5k, k = 0;1;2;3;5;7,10$. По переходной характеристике определить основные прямые показатели качества системы.

2. Составить программу для синтеза и анализа системы максимальной степени устойчивости с ПИД- регулятором, определить корни характеристического уравнения синтезированной замкнутой системы при следующих значениях свободных параметров: $\beta = 0$, $\omega = 2,5k, k = 0;1;2;3;5;7;10$. По переходной характеристике определить основные прямые показатели качества.

3. Выполнить то же, что и в п. 2 при следующих значениях свободных параметров: $\beta = \omega = 2,5k, k = 1;2;3;5;7;10$.

Отчет должен содержать задание, код программы, значения параметров регуляторов, прямые показатели качества, оформленные в виде таблицы, и выводы.

Дополнительные вопросы

1. Что такое синтез и анализ САУ?
2. Почему для системы хорошо, чтобы степень устойчивости была максимальна? Свяжите это с условием устойчивости.
3. Опишите метод синтеза оптимальных по степени устойчивости параметров?
4. Что такое степень устойчивости и степень колебательности? Как их определять?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование устойчивости дискретных САУ

Цель работы

Исследовать дискретную САУ в Scilab на устойчивость и оценить влияние периода дискретизации системы на устойчивость с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

Непосредственное суждение об устойчивости дискретной системы можно получить из анализа её импульсной характеристики $h[i]$, которая для устойчивых систем должна представлять затухающий со временем периодический или апериодический процесс. Z-преобразование импульсной характеристики $Z\left(h[i]\right)=H[z]$ есть передаточная функция дискретной системы. Таким образом, передаточная функция дискретной системы определяется отношением z- преобразований выходного дискретного процесса к входному. Разложив числитель и знаменатель ПФ на множители, получим, что в точках нулей $H\left(z_i\right)=0$, а в точках полюсов $H\left(p_i\right)\to\infty$. Полюсы являются корнями знаменателя передаточной функции (характеристического уравнения), а нули – корнями числителя. Таким образом дискретную систему можно описать набором параметров $\{z_i\},\{p_i\},k$.

Согласно основному условию устойчивости система считается устойчивой, если все полюсы дискретной системы располагаются внутри единичной окружности на комплексной плоскости z, т.е. $|p_i|<1$. Если полюс находится на границе единичной окружности $p_i=1$, то система находится на границе устойчивости. Если для неустойчивой системы имеются чисто мнимые полюса, то возникают незатухающие гармонические колебания.

Рассмотрим процедуру получения дискретной передаточной функции, с непрерывной частью вида $W_н\left(s\right)=\dfrac{k}{T^2s^2+2T0.3s+1}$:

```
k=4; T=0.8; n=1;
s=poly(0,’s’);
Wn=syslin(‘c’,k/(T^2*s^2+2*T*0.3*s+1));
Ti=n*0.005*T; // Ti – период дискретности
Wn_ss=tf2ss(Wn);
Wn_d=dscr(Wn_ss,Ti);
sys=ss2tf(Wn_d);
sys1=sys/.1;
```

Функция **tf2ss** преобразует непрерывную часть исходной системы в эквивалентное представление в пространстве состояний. Чтобы преобразовать непрерывную систему *Sys* в дискретную с периодом дискретности, например, 0.1, используется команда **dscr**, принимающая в качестве аргументов передаточную функцию непрерывной системы в пространстве состояний и период дискретизации. Функция **ss2tf** производит преобразование параметров пространства состояний в коэффициенты полиномов передаточной функции.

Последняя строка позволяет замкнуть указанную передаточную функцию единичной обратной связью. Таким образом, переменная *sys1* является дискретной передаточной функцией замкнутой системы.

Для вычисления корней многочлена используется известная уже функция **roots**. При желании можно выделить вещественные и мнимые части комплексных корней, а также определить их модуль (абсолютное значение) – для этого используются функции **real(z)**, **imag(z)** и **abs(z)** соответственно:

```
z=roots(sys1.den);
realz = real(z); imagz = imag(z);
absz=abs(z);
```

Задание

Дана замкнутая система с единичной обратной связью. Передаточная функция непрерывной части имеет вид $W_н(s) = \dfrac{k}{T^2s^2 + 2T\zeta s + 1}$. Параметры k, T и ζ приведены в табл. 6.1.

1. Определите модули корней характеристического уравнения при периоде дискретности $T_и = 0.1nT, n = 1, 2, \ldots$. Период дискретности увеличивать до тех пор, пока система не станет неустойчивой.
2. Определить значение периода дискретности, при котором система находится на границе устойчивости.
3. Выполнить то же, что и в пп. 1, 2 при передаточном коэффициенте *k*, равном удвоенному табличному значению.
4. Выполнить то же, что и в пп. 1, 2 при передаточном коэффициенте *k*, равном половине табличного значения.
5. Выполнить то же, что и в пп. 1, 2 при постоянной времени *T*, равной удвоенному табличному значению, и передаточном коэффициенте *k*, равном табличному значению.

Таблица 6.1 Варианты заданий

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
K	2	2	2	4	4	4	6	6	8	8
T	1	0,8	0,6	0,8	0,6	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1
ζ	0,1	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6

6. При $T_и = 0.1T$ определить граничное значение передаточного коэффициента *k*.

Отчет должен содержать задание, код программы, значения корней, результаты исследований и выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Исследование качества процессов управления в дискретных САУ

Цель работы

Исследовать зависимость основных прямых показателей качества работы дискретной САУ от типа регулятора и его параметров с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

Рассмотрим дискретную систему управления (рис. 7.1), состоящую из дискретной передаточной функции объекта управления и дискретной передаточной функции регулятора, представленного одним из трёх законов управления:

- П–регулятор: $W_p^*(z) = k_n$ – пропорциональный закон управления;
- ПС–регулятор: $W_p^*(z) = k_n + k_c \dfrac{z}{z-1} = \dfrac{(k_n + k_c)z - k_n}{z-1}$ – пропорционально-суммарный закон управления (аналог ПИ закона);
- ПР–регулятор: $W_p^*(z) = k_n + k_p \dfrac{z-1}{z} = \dfrac{(k_n + k_p)z - k_p}{z}$ – пропорционально-разностный закон управления (аналог ПД).

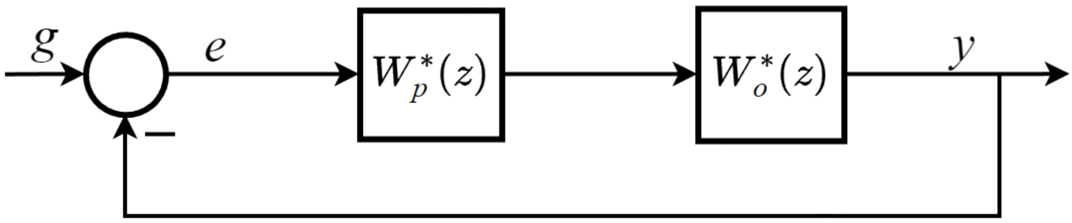

Рисунок 7.1 Структурная схема дискретной САУ

Для описания данной системы в программном комплексе *Scilab* используется код, рассмотренный в лабораторной работе №6. Построение переходной характеристики осуществляется с помощью функции **dsimul**, принимающей два аргумента – дискретную передаточную функцию замкнутой системы и массив отсчётов:

```
    u=zeros(1,20);  u(1)=1;
```

```
x1=dsimul(sl, u);  //Импульсная характеристика
u=ones(1,20);
x2=dsimul(sl, u);  //Переходная характеристика
```

Дискретная передаточная функция может быть задана и в явном виде:

```
z=poly(0,’z’);
Sc=((kp+kc)z-kp)/(z-1);// ПС-регулятор
Scc=syslin(’d’, Sc);
```

Задание

Принять период следования импульсов $T_и$ =0,01. Определите при типовых законах управления основные прямые показатели качества: время регулирования, перерегулирование и установившуюся ошибку и занесите их в табл. 7.2.

1. Составьте программу и определите дискретную передаточную функцию $W_o^*(z)$.
2. При П-регуляторе определите прямые показатели качества при $k_n = \alpha k_o, \alpha = 0,5; 1; 2$.
3. При ПС-регуляторе определите прямые показатели качества при $k_n = k_n^*$, $k_c == 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$.
4. При ПР-регуляторе определите прямые показатели качества при $k_n = k_n^*$, $k_p = 1,3,6,8$.

Отчет должен содержать задание, коды программы, дискретная ПФ объекта, заполненная таблица и выводы о зависимости показателей качества от типа регулятора и его параметров.

Таблица 7.1. Варианты заданий

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
k_0	5	5	4	4	4	5	5	5	4	4
T_1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
T_2	0,15	0,2	0,25	0,3	0,25	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2
k^*_n	2	2	2,5	2,5	2,5	2	2	2	2,5	2,5

Таблица 7.2. Прямые показатели качества исследуемой САУ

k_i				
t_p				
σ				
e_∞				

Дополнительные вопросы

1. Назовите основные показатели качества дискретных систем в переходном и установившемся режимах.
2. Назовите типовые законы управления дискретных систем.
3. Как записывается условие конечной длительности переходных процессов дискретных систем.
4. Как определяются статические и астатические системы.
5. Какова структура астатических дискретных систем управления.
6. Как рассчитать установившуюся ошибку ИСАУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование систем автоматического управления под воздействием случайного сигнала

Цель работы

Исследовать систему автоматического управления под воздействием случайного сигнала с помощью программного комплекса *Scilab*.

Работа выполняется на программе *Scilab*.

Время выполнения работы – 2 учебных часа.

Методика выполнения работы

На практике большой трудностью является то обстоятельство, что характеристики входных возмущений сложной САУ редко бывают известны до тех пор, пока система не построена и не испытана. Следовательно, важное значение имеет исследование и оценка качества систем под воздействием случайного воздействия, в качестве которого обычно принимается "белый шум", обладающий постоянной спектральной плотностью мощности.

В качестве объекта управления в рамках данной лабораторной работы выступает один из трёх дискретных фильтров. Фильтрацию дискретных сигналов линейных систем, созданных функцией **syslin**, можно выполнить функцией **flts**. Функцией **irr** задается фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр). Первый параметр функции – порядок фильтра (*n*), второй – строка **ftype**, указывающая тип фильтра (*'lp'* — ФНЧ (фильтр нижних частота), *'hp'* — ФВЧ (фильтр верхних частот), *'bp'* — ПФ (полосовой фильтр), *'sb'* — ЗФ (заграждающий фильтр)), третий аргумент указывает схему расчета фильтра (*'butt'* — фильтр Баттерворта, *'cheb1'* — фильтр Чебышева первого рода, *'cheb2'*

— фильтр Чебышева второго рода, *'ellip'* — эллиптический фильтр), далее вектором из двух элементов задается частота среза (для фильтров низких и высоких частот используется только первый элемент вектора), последний аргумент –вектор из двух элементов значений ошибки (используется только при фильтрах Чебышева и Кауэра).

Для формирования сигнала типа «белый шум» используются функция **rand**. Функция *rand("normal")* устанавливает генератор случайных чисел на генерацию случайных чисел по нормальному закону распределения, с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.

Пример использования функций представлен ниже:

```
clear
f=iir(1,'sb','cheb1',[.1 0],[0 0])
f=syslin('d',f);
rand("normal");
x=rand(1:4096-33+1);
y=flts(x,f);
xsetech([0, 0, 1, .5])
plot(x)
xtitle('Входной сигнал', 'время', 'амплитуда')
xsetech([0, 0.5, 1, .5])
plot(y)
xtitle('Фильтрованный сигнал', 'время', 'амплитуда')
```

Задание

1. В коде программы задать дискретную систему с объектом-фильтром и воздействием типа «белый шум» с единичной дисперсией.
2. Для трех любых фильтров любого порядка из списка получить график входного сигнала и графики фильтрованных сигналов.
3. Рассчитать значение квадрата среднего выходного сигнала для трех фильтров по формуле:

$$y_{cp}^2 = \int_0^{2\pi} \left|W(jw)\right|^2 \bullet S_x(w)\,dw, \qquad (8.1)$$

где $W(j\omega)$ передаточная функция объекта, $S_x(w)$ – спектральная плотность входного сигнала.

4. Проанализировать полученные графики и расчетные данные и сделать вывод, почему у среднее в квадрате является показателем качества системы, и оценить

качество работы системы для трех случаев.

Список литературы

1. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Линейные системы: учебник и практикум для академического бакалавриата / Д. П. Ким. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2019. — 311 с.
2. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А, А,, Воронова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 367 с.
3. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учебное пособие. — М.: ЛЕНАНД, 2019. — 500 с.

Сведения об авторах

1. Лохин Валерий Михайлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта.
2. Быковцев Юрий Алексеевич, ассистент кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта.