

Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию

Белгородская государственная технологическая академия
строительных материалов

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по курсу "Теория автоматического управления"
для студентов специальности 21.02*

Белгород 1995

Государственный комитет Российской Федерации по высшему образованию
Белгородская государственная технологическая академия
строительных материалов
Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

Утверждено
научно-методическим советом
академии

**ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу "Теория автоматического управления"
для студентов специальности 21.02

Белгород 1995

Составители: А.В.Маматов, к.т.н., ст.пр.
В.Н.Подлесный, к.т.н., доц.

Рецензент А.А.Виноградов, к.т.н., доц.

Введение

Цель методических указаний состоит в следующем:

- определить содержание основных этапов деятельности студента, связанной с выполнением каждой лабораторной работы;
- унифицировать требования к каждому из этапов выполнения лабораторной работы;
- стимулировать самостоятельную, творческую работу студента по освоению и экспериментальному закреплению соответствующих разделов лекционных курсов.

Основными этапами лабораторной работы являются:

- 1) подготовка к работе;
- 2) постановка ряда экспериментов на аналоговом вычислительном комплексе АВК-6;
- 3) сдача отчета.

При подготовке к работе студенту необходимо изучить соответствующий раздел теоретического курса и применить эти знания к решению типовых практических задач. Студент допускается к выполнению работы только в том случае, если он знает ответы на вопросы для подготовки к работе, правильно решает контрольные задачи и представляет теоретические расчеты необходимые согласно программе работы.

По окончании работы студент составляет отчет, оформленный в соответствии с методическими указаниями "Оформление проектов и лабораторных журналов"/Белоусов А.В., Колтунов Л.И., Сидорин И.М. - Белгород: изд. БТИСМ, 1990. Требования по содержанию отчета приведены для каждой лабораторной работы в разделе "Содержание отчета". Сдача отчета предполагает защиту основных выводов и положений. Кроме того, студенту может быть предложено поставить эксперимент, не вошедший в программу работы, но полностью основанный на ее результатах и требующий применения аналогичной методики.

Основные приемы работы с аналоговым вычислительным комплексом АВК-6 и методика различных экспериментов изложены в учебном пособии: Алексаков Г.Н., Гаврилин В.В., Федоров В.А. Персональный аналоговый компьютер АВК-6.- М.: изд. МИФИ, 1989.

Вводное занятие

Ознакомление с аналоговым вычислительным комплексом АВК-6

Цель работы: изучение состава комплекса АВК-6 и приобретение навыков работы с отдельными его устройствами (генератором сигналов, индикатором, коммутатором, сумматором, делителями).

Программа работы

1. Ознакомьтесь с общей организацией и основными блоками индикационно-измерительной системы (ИИС) АВК-6 [5, разделы 2.1-2.3].

2. Включите АВК нажатием кнопки. Приподнимите индикатор. После прогрева в центре экрана появляется светящаяся точка - комплекс готов к работе. *Помните:* поскольку у индикатора отсутствует регулировка яркости, не допускайте длительного нахождения неподвижной точки на экране.

Примечание. Для настройки режима работы АВК необходимо: 1) установить переключку режимов управления частотой генератора [5, рис.2.3]; 2) нажать кнопку 2 переключателя режимов исследования (см. там же); 3) установить переключку в левом верхнем углу передней панели блока питания.

3. На горизонтальный вход индикатора (вход "X") подайте напряжение треугольной формы с выхода генератора синусоидального, треугольного и прямоугольного синхронных сигналов (ГСП). Регулировка амплитуды сигнала attenuатором на входе генератора изменяет длину горизонтальной линии на экране. Подключите треугольный сигнал ко входу "1В" индикатора, настройте attenuатором ГСП амплитуду, дающую отклонение луча в пределах экрана. Не меняя амплитуды, переключите провод из гнезда "1В" в гнезда "5В", затем "10В". Измерьте соотношение длин получающихся при этом горизонтальных прямых. Как меняется изображение при изменении частоты?

4. Аналогично п.3 ознакомьтесь с работой и характеристиками канала вертикального отклонения (вход "Y").

5. Напряжение 10 В эталона подайте на вход делителя; выход делителя соедините со входом "X", 10В. Регулируя выходное напряжение делителя, проанализируйте зависимости положения луча от входного напряжения. Аналогично исследуйте вход "Y", 10В.

6. Используя входы 10В индикатора, получите на экране прямую

$y=x$. На вход "Y", 5В подайте постоянное напряжение от делителя. Опишите аналитически получающееся при этом изображение. Переключите постоянный сигнал на вход "X", 5В; запишите соответствующее аналитическое выражение. Подайте постоянный сигнал одновременно на входы "X" и "Y", 5В. Опишите изображение аналитически. Поменяйте местами сигналы вертикального отклонения. Что изменится при этом в аналитическом описании изображения? Как изменится изображение? Как изменится изображение и его аналитическое описание, если поменять местами входы горизонтального отклонения?

7. На вход "X", 10В подайте треугольный сигнал, на вход "Y", 10В - прямоугольный. Опишите аналитически изображение на экране. Как меняется изображение и его аналитическое описание в зависимости от амплитуды прямоугольников? от амплитуды треугольного сигнала?

8. Оставив треугольный сигнал на входе "X", 10В, подайте на вход "Y", 10В синусоиду. Опишите получающееся изображение аналитически.

9. Установите переключку между средним гнездом под блоком "индикатор" и левой клеммой, отмеченной символом \lrcorner . Как при этом изменилось изображение? Переключите переключку на правую клемму, отмеченную символом \llcorner . Как изменилось изображение? Сделайте вывод о назначении гнезда под блоком "индикатор".

10. На вход "X", 10В подайте треугольный сигнал. Тот же сигнал подайте на вход делителя, а сигнал с входа делителя - на вход "Y", 10В. Опишите изображение аналитически. Что меняется при изменении положения ручки делителя?

11. На вход "X", 10В подайте треугольный сигнал. Тот же сигнал подайте на инвертирующий вход одного из сумматоров в служебном блоке, а сигнал с выхода сумматора - на вход "Y", 10В индикатора. Опишите изображение аналитически. Как изменится изображение и его описание, если треугольный сигнал подавать на неинвертирующий вход сумматора?

12. Что Вы ожидаете увидеть на экране индикатора, если на вход "X", 10В подать треугольный сигнал, а на вход "Y", 10В - разность прямоугольного и синусоидального сигналов? Проверьте Ваши предположения.

13. Как изменится изображение, если прямоугольный и синусоидальный сигналы подать на инвертирующие входы одного из сумматоров? Проверьте ответ при помощи индикатора.

14. Проанализируйте изображения, получающиеся при подаче на вход "X", 10В треугольного сигнала, а на вход "Y", 10В - суммы

треугольного и синусоидального сигналов при различных соотношениях между их амплитудами.

15. На вход "X", 10В подайте треугольный сигнал. Вход "Y", 10В соедините с выходом коммутатора (например, верхним). Что видно на экране? Подайте на правый (левый) вход этого канала коммутатора прямоугольный сигнал. Как изменилось изображение? Подайте на второй вход треугольный сигнал, рассмотрите изображение. Подайте на третий вход синусоиду. Зарисуйте изображение. Проварьируйте амплитуду каждого из сигналов.

16. Поменяйте местами входы индикатора. Проанализируйте варианты изображений на экране.

17. Вход "X", 10В индикатора соедините с выходом I (верхним) коммутатора, вход "Y", 10В - с выходом II (вторым сверху). Треугольный сигнал подайте на вход 1 "поля" I и на вход 2 "поля" II коммутатора. Опишите изображение. Подайте синусоиду на входы 3 обоих полей. На входы 4 подайте: поле I - синусоиду, поле II - проинвертированную синусоиду. Опишите изображение при различных соотношениях амплитуд.

18. С целью закрепления приобретенных навыков получите на экране индикатора заданное преподавателем изображение.

Лабораторная работа №1

Типовые динамические звенья первого порядка.

Характеристики звеньев и их соединений

Цель работы: моделирование динамических звеньев первого порядка, исследование временных и частотных характеристик звеньев и их соединений.

Вопросы для подготовки к работе

1. Что называется уравнением движения динамической системы?
2. Что называется передаточной функцией динамической системы?
3. Дайте определение импульсной и переходной характеристик динамической системы.
4. Назовите основные частотные характеристики динамической системы и дайте их определения.
5. Перечислите элементарные динамические звенья первого порядка и укажите их передаточные функции.

6. Как по передаточной функции системы определить временные и частотные характеристики?

7. Как определяются передаточные функции последовательного, параллельного и встречно-параллельного соединения звеньев?

Контрольные задачи

1. Найдите передаточные функции схем на рис. 1.1.

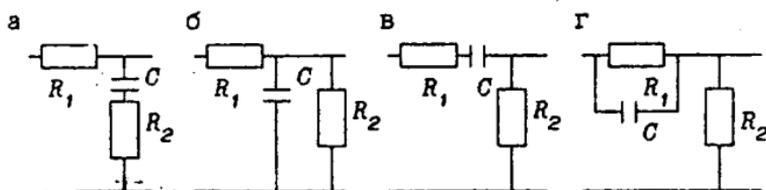


Рис. 1.1

2. Для схем, изображенных на рис. 1.1, постройте амплитудно-частотные, фазо-частотные и переходные характеристики ($R_1=20$ кОм, $R_2=5$ кОм, $C_1=1$ мкФ).

Программа работы

1. Определите передаточную функцию структурной схемы, приведенной на рис. 1.2.

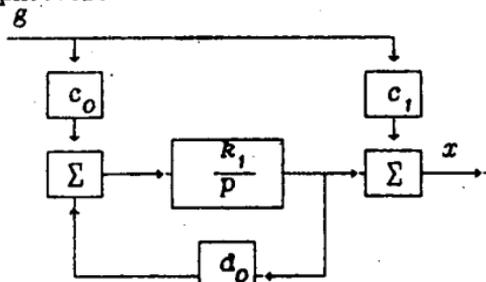


Рис. 1.2

2. Приняв $k_1=100$, рассчитайте параметры структурной схемы для реализации на АВК следующих передаточных функций: $\frac{0.01p}{0.01p+1}$, $\frac{1}{0.01p+1}$, $\frac{1}{0.01p-1}$, $\frac{0.005p+1}{0.01p}$, $\frac{0.005p+1}{0.01p+1}$, $\frac{0.005p}{0.01p+1}$. Для каждой передаточной функции экспериментально определите переходную характеристику.

3. Рассчитайте теоретически частотные характеристики последовательного соединения звеньев $0.005p+1$ и $\frac{1}{0.01p+1}$ и

сравните их с экспериментально полученными характеристиками звена $\frac{0.005p+1}{0.01p+1}$.

4. Реализуйте на АВК два звена $\frac{0.05p}{0.01p+1}$ и $\frac{1}{0.01p+1}$. исследуйте их частотные характеристики. Соедините звенья параллельно и получите частотные характеристики соединения.

5. Исследуйте частотные и временные характеристики встречно-параллельного соединения интегрирующего звена $\frac{1}{0.01p}$ и усилительного звена α при изменении α от -1 до 0 с шагом 0.2 .

Содержание отчета

1. Структурная схема, передаточная функция модели по п.1.
2. Параметры структурной схемы, переходные характеристики по п.2.
3. Частотные характеристики звеньев и их последовательного и параллельного соединения по пп.3,4.
4. Частотные и временные характеристики встречно-параллельного соединения звеньев по п.5.
5. Выводы.

Лабораторная работа №2

Динамические звенья второго порядка

Цель работы: моделирование динамических звеньев второго порядка; исследование временных и частотных характеристик звеньев второго порядка.

Вопросы для подготовки к работе

1. Перечислите динамические звенья второго порядка.
2. Что называется характеристическим уравнением системы?
3. В каком случае звено второго порядка может быть представлено в виде последовательно-параллельного соединения элементарных звеньев первого порядка?
4. Как по виду переходной характеристики колебательного звена определить его параметры?
5. Докажите, что при наклоне ЛАЧХ, равном $k=20$ дБ/дек, увеличению частоты в n раз приводит к изменению амплитуды выходного сигнала в n^2 раз?

Контрольные задачи

1. Получите аналитическое выражение позволяющее определить добротность колебательного звена по известным параметрам k, T, ξ .
2. Найдите передаточные функции схем на рис.2.1.

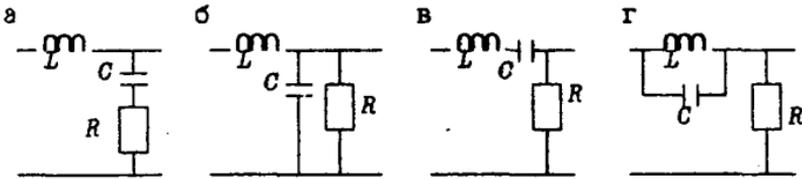


Рис.2.1

Программа работы

1. Определите передаточную функцию схемы, приведенной на рис.2.2.

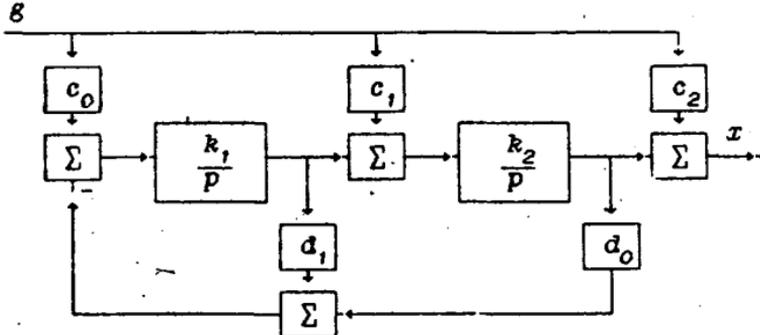


Рис.2.2

2. Запишите характеристическое уравнение динамической системы, структурная схема которой приведена на рис.2.2. Выразите корни характеристического уравнения через параметры модели.

3. Приняв $k_1=k_2=100$, $c_1=c_2=0$ выбором параметров модели, реализуйте следующие случаи расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости: а) $p_1=-\alpha_1$, $p_2=-\alpha_2$; б) $p_1=-\alpha_1$, $p_2=0$; в) $p_1=p_2=0$; г) $p_1=0$, $p_2=-\alpha_2$; д) $p_1=\alpha_1$, $p_2=-\alpha_2$; е) $p_1=-\alpha_1$, $p_2=\alpha_2$; ж) $p_{1,2}=-\alpha \pm j\beta$; з) $p_{1,2}=\pm j\beta$; и) $p_{1,2}=\alpha \pm j\beta$ (здесь $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$, $\alpha_1 \neq \alpha_2$). Для каждого случая получите переходную характеристику.

4. Реализуйте на АВК звено с передаточной функцией

$W(p) = \frac{1}{0.0002p^2 + 0.03p + 1}$ и исследуйте его частотные характеристики.
 5. Представьте $W(p)$ в виде последовательного и параллельного соединения звеньев первого порядка. Исследуйте частотные характеристики полученных звеньев.

Содержание отчета

1. Структурная схема, передаточная функция модели по п.1.
2. Характеристическое уравнение, выражение для корней по п.2.
3. Параметры структурной схемы, передаточные функции и переходные характеристики звеньев при различных значениях корней характеристического уравнения по п.3.
4. Частотные характеристики звена второго порядка и звеньев первого порядка при эквивалентном последовательном и параллельном соединениях по пп.4,5.
5. Выводы.

Лабораторная работа №3

Устойчивость линейных систем автоматического управления

Цель работы: исследование устойчивости линейных динамических систем с обратной связью.

Вопросы для подготовки к работе

1. Дайте определение устойчивости динамической системы.
2. В чем сущность анализа устойчивости в соответствии с первым методом Ляпунова?
3. Что называется критерием устойчивости?
4. В чем сущность критериев устойчивости Гурвица, Михайлова, Найквиста, логарифмического критерия устойчивости?
5. Как получить характеристическое уравнение замкнутой системы по передаточной функции системы в разомкнутом состоянии?
6. Дайте определение запаса устойчивости по фазе и по модулю. Чем отличаются понятия положительного и отрицательного запасов устойчивости по модулю?
7. Как исследовать устойчивость системы с запаздыванием?
8. Поясните алгоритмы построения областей (интервалов)

устойчивости в плоскости параметров системы с использованием критериев устойчивости Гурвица, Найквиста, метода D-разбиения.

Контрольные задачи

1. Определите условия устойчивости замкнутой системы, если ее передаточная функция в разомкнутом состоянии $W(p)$ имеет вид:

а) $W(p) = \frac{k}{p^2(Tp+1)}$, б) $W(p) = \frac{k}{p(Tp+1)}$, в) $W(p) = \frac{k}{Tp-1}$.

г) $W(p) = \frac{k}{(Tp+1)(Tp-1)}$, д) $W(p) = \frac{k_1(T_2p+1)}{(T_1p+1)}$.

При решении задачи воспользуйтесь всеми известными Вам критериями устойчивости.

2. Используя критерия устойчивости Гурвица, постройте область устойчивости замкнутой системы (рис.3.1) в плоскости коэффициентов обратной связи a_1 и a_2 , если

а) $W_1(p) = \frac{k_1}{p}, W_2(p) = \frac{k_2}{p}$; б) $W_1(p) = \frac{k_1}{Tp+1}, W_2(p) = \frac{k_2}{p}$;

в) $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1p+1}, W_2(p) = \frac{k_2}{T_2p+1}$; г) $W_1(p) = k_1, W_2(p) = \frac{k_2}{T_2p+1}$;

д) $W_1(p) = \frac{k_1}{p}, W_2(p) = \frac{k_2}{Tp+1}$; е) $W_1(p) = \frac{k_1}{Tp+1}, W_2(p) = k_2$.

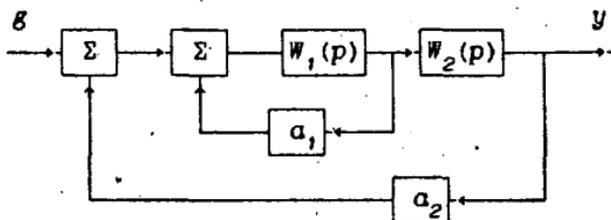


Рис. 3.1

Подтвердите полученный результат любым другим критерием устойчивости.

Программа работы

1. Подготовьте на АБК три апериодических звена с одинаковыми постоянными времени $T=0.01$ и различными коэффициентами усиления.

2. Соедините звенья последовательно и по экспериментальным частотным характеристикам этого соединения предскажите, будет ли система устойчива при охвате ее единичной отрицательной обратной связью.

3. Проверьте результат экспериментом, наблюдая свободное движение замкнутой системы при ненулевых начальных условиях.

4. Определите критический коэффициент усиления разомкнутой системы: а) экспериментально по частотным характеристикам разомкнутой системы; б) экспериментально по свободному движению замкнутой системы; в) теоретически с помощью всех известных Вам критериев устойчивости. Сравните полученные результаты.

5. Подбором коэффициента усиления разомкнутой системы добейтесь устойчивости замкнутой системы и определите экспериментально запасы устойчивости по фазе и амплитуде, используя частотные характеристики разомкнутой системы.

Содержание отчета

1. Схема экспериментов и качественные результаты по пп. 2, 3.
2. Теоретические расчеты по п. 4, в.
3. Результаты выполнения п. 5.
4. Выводы.

Лабораторная работа №4

Повышение точности систем автоматического управления в установившемся режиме

Цель работы: исследование различных способов повышения точности функционирования систем автоматического управления в установившемся режиме.

Вопросы для подготовки к работе

1. Укажите известные Вам виды внешних воздействий на объект управления и систему в целом.

2. Что называется установившимся режимом функционирования систем автоматического управления?

3. Перечислите типовые воздействия, используемые при исследовании установившегося режима.

4. Что называется статической характеристикой?

5. Что такое регулировочные и нагрузочные (внешние) характеристики? Как они могут быть получены теоретически и экспериментально?

6. С какой целью проводится линеаризация реальных нелинейных статических характеристик?

7. Поясните сущность известных Вам способов линеаризации статических нелинейностей.

8. В чем отличие между возмущающим, управляющим и задающим воздействиями?

9. Как определить установившуюся ошибку системы по теореме о предельных значениях?

10. В чем сущность метода коэффициентов ошибок?

11. Что такое порядок астатизма системы?

12. Приведите пример статической системы, астатической системы, системы статической по отношению к управляющему воздействию и астатической по отношению к возмущению и наоборот.

Контрольные задачи

1. Для системы (рис. 4.1) определите значение установившейся ошибки $\Delta = e(t) \Big|_{t \rightarrow \infty}$, если

а) $W(p) = \frac{k}{T_p + 1}$, б) $W(p) = \frac{k}{p(T_p + 1)}$, в) $W(p) = \frac{k}{p^2(T_p + 1)}$

и входной сигнал меняется по закону $g = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$. При решении задачи воспользуйтесь методом коэффициентов ошибок и теоремой о предельных значениях.

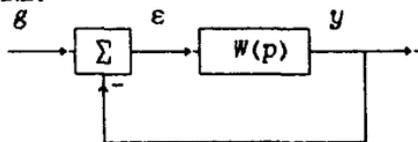


Рис. 4.1

2. Для системы (рис. 4.2) определите порядок астатизма по отношению к задающему и возмущающему воздействиям, если

а) $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$, $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}$; б) $W_1(p) = \frac{k_1}{p}$, $W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}$;
 в) $W_2(p) = \frac{k_2}{p}$, $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$; г) $W_1(p) = \frac{k_1}{p}$, $W_2(p) = \frac{k_2}{p}$;
 д) $W_2(p) = \frac{k_2}{(T_1 p + 1)p^2}$, $W_1(p) = k_2$; е) $W_2(p) = \frac{k_2}{(T_2 p + 1)p^2}$, $W_1(p) = k_1$.

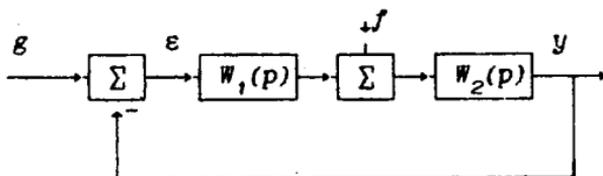


Рис. 4.2

Программа работы

1. Подготовьте на АВК два апериодических звена с передаточными функциями $W_1(p) = \frac{0.25}{0.01p+1}$ и $W_2(p) = \frac{10}{0.01p+1}$.

2. Соедините звенья последовательно, замкните единичную отрицательную обратную связь и зафиксируйте переходный процесс по выходной переменной. Обратите внимание на величину статической ошибки.

3. Изменяя коэффициент усиления первого апериодического звена от 0.25 до 10, наблюдайте семейство переходных процессов по выходной переменной. Сделайте вывод о влиянии коэффициента усиления разомкнутой системы на величину статической и динамической ошибки. Подтвердите результаты эксперимента теоретическими рассуждениями. Возвратите ручку коэффициента усиления первого апериодического звена в исходное состояние.

4. Введите в систему неединичную обратную отрицательную связь. Изменяя коэффициент обратной связи от 0 до 1 и наблюдая переходный процесс в системе, добейтесь нулевой статической ошибки. Проанализируйте влияние коэффициента усиления разомкнутой системы и величины задающего воздействия на статическую ошибку. Дайте теоретическое обоснование результатов эксперимента.

5. Установите единичную отрицательную обратную связь и введите в прямой контур системы интегрирующее звено с передаточной функцией $W(p) = \frac{k}{0.1p}$. Исследуйте характер переходного процесса по выходной переменной с обязательным анализом динамической и статической ошибки при изменении коэффициента k от 0 до 10.

6. Установив коэффициент усиления k интегрирующего звена в схеме опыта по п. 5 равным 5, подключите параллельно к интегрирующему звену усилительное звено. Проанализируйте статическую ошибку системы и влияние коэффициента усиления усилительного звена на характер переходного процесса. Обоснуйте результаты эксперимента теоретически. При вариациях коэффициентов следите чтобы операционные блоки АВК не выходили из линейного диапазона работы.

Содержание отчета

1. Структурные схемы исследуемых систем.
2. Семейства переходных процессов в соответствии с пп. 2-6.
3. Необходимые теоретические расчеты по пп. 3, 4, 6.
4. Выводы.

Лабораторная работа №5

Анализ качества линейных систем автоматического управления

Цель работы: изучение и исследование методов оценки качества переходных процессов в линейных системах автоматического управления.

Вопросы для подготовки к работе

1. Приведите известные Вам прямые показатели качества?
2. Дайте определение следующим частотным показателям качества: полосы пропускания, частоты среза, собственной (резонансной) частоты, колебательности, запасов устойчивости по модулю и по фазе.
3. Перечислите корневые показатели качества.
4. Назовите и запишите формулы для линейных и квадратичных интегральных оценок качества.
5. Разработайте схемы экспериментов для определения прямых, частотных и интегральных показателей качества.
6. Как связаны между собой прямые и частотные показатели качества, прямые и корневые показатели качества?

Контрольные задачи

1. Докажите, что в случае если изображение ошибки в замкнутой системе имеет вид $E(p) = \frac{b_0 p + b_1}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}$, то интегральная квадратичная оценка качества $I_{20} = \int_0^\infty e^2(t) dt$ вычисляется по формуле

$$I_{20} = \frac{b_1^2 a_0 + b_0^2 a_2}{2 a_0 a_1 a_2}.$$

2. Покажите, как используя формулу для вычисления I_{20} , определить значение интеграла $I_{21} = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt + \tau^2 \int_0^{\infty} \dot{\varepsilon}^2(t) dt$.

3. Пусть передаточная функция замкнутой системы имеет вид $W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$, где $T=1$. Вычислите показатель колебательности ξ при котором а) $I_{20} \rightarrow \min$, б) $I_{21} \Big|_{\tau=1} \rightarrow \min$, если входной сигнал — единичная функция $1(t)$.

Программа работы

1. Подготовьте на АВК схему моделирования системы, структура которой изображена на рис 5.1.

2. Используя блок умножения-деления и блок интегрирования, разработайте и подготовьте схему вычисления интегральных квадратичных оценок I_{20} и I_{21} .

3. Изменяя коэффициент усиления аperiodического звена k , наблюдайте характер свободного движения системы при ненулевом начальном условии $y(0)=1$ с одновременным анализом значения интеграла I_{20} .

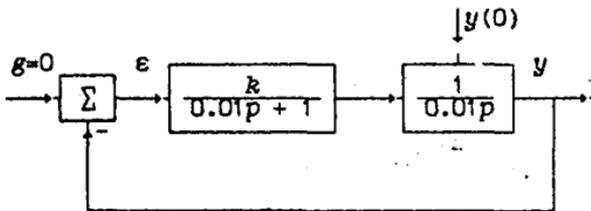


Рис. 5.1

Сделайте вывод о влиянии параметра k на прямые показатели качества и интегральную квадратичную оценку I_{20} , подтвердив его теоретическими расчетами.

4. Для исследуемой системы определите зависимость оптимального в смысле минимума квадратичной оценки I_{21} , коэффициента усиления аperiodического звена k от постоянной времени τ . Входной сигнал — единичная функция $1(t)$.

5. Проведите эксперимент, подтверждающий теоретический результат п.4. Для этого установите коэффициент усиления k , соответствующий оптимальному значению при $\tau=1$. Затем, наблюдая свободное движение системы и значение интеграла $I_{21} \Big|_{\tau=1}$, убедитесь в том, что при $k < k_{opt}$ и $k > k_{opt}$ величина $I_{21} > I_{21 \min}$.

6. Подготовьте на АВК дополнительное аperiodическое звено с передаточной функцией $W(p) = \frac{1}{0.01p + 1}$. Установите произвольное

значение, отличное от оптимального при $\tau=1$, коэффициента k аperiodического звена исследуемой системы. Одновременно наблюдая на экране индикатора свободное движение системы и дополнительного аperiodического звена с одинаковыми начальными условиями, добейтесь путем изменения коэффициента k , чтобы свободное движение системы максимально приближалось к свободному движению дополнительного аperiodического звена. Экспериментально определите подобранное значение коэффициента k и сравните это значение с k_{opt} при $\tau=1$. Объясните полученный результат.

Содержание отчета

1. Схемы вычисления интегральных квадратичных оценок I_{20} и I_{21} .
2. Необходимые теоретические расчеты по пп. 3, 5, 6.
3. Оптимальные переходные процессы по пп. 3, 5, 6.
4. Выводы.

Лабораторная работа №6

Системы автоматического управления с ПИД-регулятором

Цель работы: исследование временных и частотных характеристик ПИД-регулятора; определение параметров настройки регулятора.

Вопросы для подготовки к работе

1. Каким образом формируется управляющее воздействие в системах автоматического управления с ПИД-регулятором?
2. Как осуществляется параметрический синтез ПИД-регулятора?
3. Какие критерии используются для определения параметров ПИД-регулятора?
4. Какие ограничения учитываются при синтезе ПИД-регуляторов?
5. Перечислите методы синтеза ПИД-регуляторов.

Контрольные задачи

1. Определите множество значений параметров реального дифференцирующего звена $\frac{k_p}{T_p s + 1}$, при которых выполняется

равенство $\int_0^{\infty} h_r(t) dt = \int_0^{\infty} h_d(t) dt$, где $h_r(t)$, $h_d(t)$ - переходная характеристика реального и идеального дифференцирующего звена соответственно.

2. Для объекта управления с передаточной функцией $W_o(p) = \frac{1}{(0.01p+1)^2}$ произведите параметрический синтез ПИ-регулятора по линейному интегральному критерию $I_{20} = \int_0^{\infty} \epsilon(t) dt$ с учетом ограничения на корневой показатель абсолютного затухания $\eta=200$ и корневой показатель колебательности $\mu=2$.

Программа работы

1. Реализуйте на АВК модель ПИД-регулятора с параметрами $k_p = k_i = k_d = 1$.

2. Исследуйте временные и частотные характеристики ПИД-регулятора.

3. Реализуйте на АВК модель объекта управления с передаточной функцией $W_o(p) = \frac{1}{(0.01p+1)^2}$, исследуйте ее временные и частотные характеристики.

4. Соберите модель замкнутой системы автоматического управления объектом $W_o(p)$ с ПИ-регулятором $\frac{k_p p + k_i}{p}$.

5. Приняв $k_p = 1, k_i = 0$, исследуйте временные характеристики замкнутой системы без регулятора.

6. Соберите схему для определения значения критерия качества переходного процесса $I_{21} = \int_0^{\infty} (\epsilon^2(t) + \dot{\epsilon}^2(t)) dt$.

7. Методом пошагового спуска определите оптимальные параметры настроек ПИ-регулятора k_p и k_i по критерию I_{21} , при ограничении на корневой показатель абсолютного затухания $\eta=200$ и на корневой показатель колебательности $\mu=2$. В качестве начальных значения параметров k_p, k_i задайте оптимальные значения параметров ПИ-регулятора по линейному интегральному критерию I_{20} при заданных ограничениях.

Содержание отчета

1. Структурная схема, временные и частотные характеристики ПИД-регулятора по пп. 1, 2.

2. Структурная схема, временные характеристики по пп. 3-5.
3. Структурная схема по п. 6.
4. Область допустимых значений параметров k_p и k_i с траекторией поиска оптимальных значений, диаграмма пошагового изменения критерия I_2 , по п. 7.
5. Выводы.

Лабораторная работа №7

Типовые нелинейности систем автоматического управления

Цель работы: моделирование нелинейных статических характеристик, исследование статических характеристик последовательного, параллельного и встречно-параллельного соединения элементов.

Вопросы для подготовки к работе

1. Что называется статической характеристикой?
2. Укажите типовые нелинейности систем автоматического управления.
3. Как экспериментально получить статическую характеристику элемента?
4. Дайте определения регулировочной и нагрузочной характеристик.
5. Как определяются статические характеристики последовательного и параллельного соединений элементов?
6. Как определяется статическая характеристика встречно-параллельного соединения элементов?
7. С какой целью производится линеаризация реальных нелинейных статических характеристик?

Контрольные задачи

1. Постройте статические характеристики последовательного, параллельного и встречно-параллельного соединения (при отрицательной обратной связи) нелинейных элементов $y_1(x)$ и $y_2(x)$:

а) $y_1 = \sqrt{x}$; $y_2 = x^2$;	б) $y_1 = \sqrt{x}$; $y_2 = 1/x$;
в) $y_1 = 1/x$; $y_2 = x^2$;	г) $y_1 = 1/x$; $y_2 = x $.
2. Получите уравнение статической характеристики звена с передаточной функцией $W(p) = 2/(0.01p+1)$.

Программа работы

1. Соберите схему для наблюдения на экране индикатора статической характеристики нелинейного блока. По мнемосхеме на панели блока изучите назначение органов настройки нелинейной зависимости и получите соответствующие эффекты на экране индикатора.

2. Реализуйте нелинейную статическую характеристику $y(x)$ ($[y]=[x]=B$), заданную аналитически:

$$y = \begin{cases} -5 & , x < -4; \\ -2+2.5x & , -4 \leq x \leq -2; \\ 0 & , -2 < x < 2; \\ 2+2.5x & , 2 \leq x \leq 4; \\ 5 & , x > 4. \end{cases}$$

3. Исследуйте статическую характеристику последовательного соединения нелинейного элемента $y(x)$ и усилительного звена $k=2$.

4. Исследуйте статическую характеристику последовательного соединения усилительного звена k нелинейного элемента $y(x)$ при $k=2, 5, 10$.

5. Охватите последовательное соединение усилительного звена k и нелинейного элемента $y(x)$ обратной связью с коэффициентом передачи a . Исследуйте статическую характеристику полученного соединения при $k=5$ и a , изменяющемся от -1 до 1 с шагом 0.5 .

6. Реализуйте две нелинейные статические характеристики $y_1(x)$ и $y_2(x)$, ($[y_1]=[y_2]=[x]=B$), заданные аналитически:

$$y_1 = \begin{cases} -2+x & , x < -2; \\ 0 & , -2 \leq x \leq 2; \\ 2+x & , x > 2. \end{cases} \quad y_2 = \begin{cases} -4 & , x < -2; \\ 2x & , -2 \leq x \leq 2; \\ 4 & , x > 2. \end{cases}$$

7. Исследуйте статические характеристики параллельного и последовательного соединения нелинейных элементов $y_1(x)$ и $y_2(x)$.

Содержание отчета

1. Статическая характеристика нелинейного элемента, структурные схемы и статические характеристики вариантов последовательного соединения нелинейного элемента и усилительного звена, а также последовательного соединения усилительного звена и нелинейного элемента при охвате его обратной связью по пп. 1-5.

2. Статические характеристики параллельного и последовательного соединений нелинейных элементов по пп. 6, 7.

3. Выводы.

Лабораторная работа №8

Анализ движения управляемых объектов
второго порядка методом фазовой плоскости

Цель работы: овладение методом фазового пространства на примере исследования свободного и вынужденного движения объектов, описываемых дифференциальными уравнениями второго порядка.

Вопросы для подготовки к работе

1. Охарактеризуйте понятие состояния динамической системы.
2. Как правильно выбрать переменные состояния системы?
3. Как получить уравнение состояния системы?
4. Перечислите методы построения фазовых траекторий.
5. Что такое особая точка? Укажите типы особых точек.

Контрольные задачи

1. Получите уравнение состояния математического маятника, выбрав в качестве переменных состояния потенциальную и кинетическую энергию.

2. Найдите время перехода изображающей точки в начало координат фазовой плоскости из состояния $x(0)=-1$, $\dot{x}(0)=1$ по траектории $\dot{x}=-x$.

Программа работы

1. Реализуйте на АБК модель объекта' второго порядка (см. рис. 2.2), приняв $c_0=1$, $c_1=c_2=0$, $k_1=k_2=100$.

2. Получите уравнение состояния объекта и уравнение изоклин.

3. Выбором коэффициентов d_1 и d_2 реализуйте различные случаи расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости. Для каждого случая получите фазовый портрет свободного ($g=0$) и вынужденного ($g>0$, $g<0$) движения объекта.

Содержание отчета

1. Уравнение состояния объекта, уравнение изоклин по п.2.
2. Фазовые портреты свободного и вынужденного движения объекта при различных значениях параметров системы по п.3.
3. Выводы.

Лабораторная работа №9

Исследование релейных систем автоматического управления методом фазовой плоскости

Цель работы: овладение методом фазовой плоскости как инструментом точного анализа нелинейных систем автоматического управления.

Вопросы для подготовки к работе

1. Что называется линией переключения? Как строятся линии переключения?
2. Укажите условия возникновения скользящего режима в нелинейной системе.
3. Дайте определения устойчивости в малом, большом, целом, асимптотической устойчивости нелинейных систем.
4. Сформулируйте условия устойчивости нелинейной системы, согласно прямому методу Ляпунова.
5. Что такое предельный цикл?
6. Как по фазовой траектории определить временные диаграммы фазовых переменных?
7. В чем состоит сущность метода припасовывания граничных значений?

Контрольные задачи

1. Получите уравнение фазовых траекторий объекта с передаточной функцией $W(p) = \frac{k}{p^2}$ при величине входного воздействия $u = -u_m$, $u = 0$, $u = u_m$.
2. Постройте линии переключения для релейной системы, структурная схема которой приведена на рис.9.1. Статические характеристики реле представлены на рис.9.2.

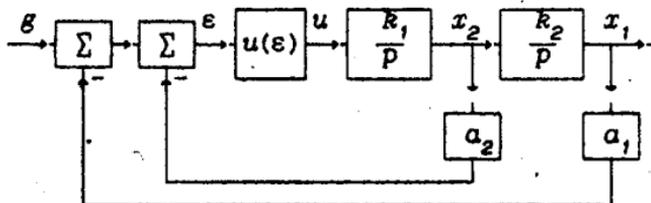


Рис.9.1

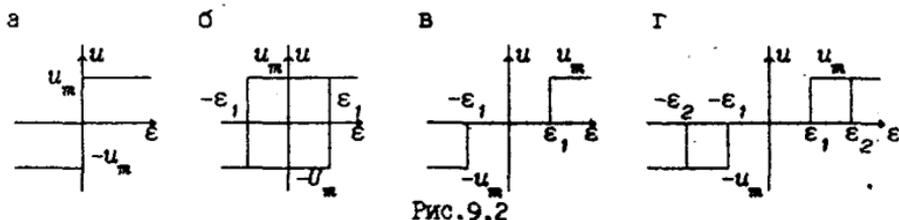


Рис.9.2

Программа работы

1. Реализуйте на АВК модель релейной системы, структурная схема которой приведена на рис.9.1.
2. Приняв $k_1=k_2=100$, $a_1=-1$, $a_2=0$, исследуйте свободное движение системы при различных типах реле (см. рис 9.2).
3. Введите коррекцию по скорости ($a_2 \neq 0$) и исследуйте влияние коэффициента обратной связи по скорости на динамику системы при различных типах реле (см. рис 9.2).

Содержание отчета

1. Фазовые траектории и временные диаграммы свободного движения системы без коррекции по скорости при различных типах реле по п.2.
2. Фазовые траектории и временные диаграммы свободного движения системы с коррекцией по скорости ($a_2=-1$) при различных типах реле, по п.3.
3. Выводы.

Лабораторная работа №10

Системы автоматического управления с переменной структурой

Цель работы: исследование динамики системы с переменной структурой на фазовой плоскости.

Вопросы для подготовки к работе

1. Что называется структурой системы?
2. Укажите основные признаки систем с переменной структурой.
3. Что называется многолистной фазовой плоскостью?

4. С какой целью и каким образом организуются вырожденные движения?

5. К какому классу систем автоматического управления относятся системы с переменной структурой?

6. Какие методы используются для анализа и синтеза систем с переменной структурой?

7. Укажите преимущества и недостатки систем с переменной структурой.

Контрольные задачи

1. Докажите что фазовый портрет свободного движения системы, изображенной на рис.10.1, представляет собой семейство эллипсов. Найдите отношение полуосей эллипсов $\frac{x_{2m}}{x_{1m}}$.

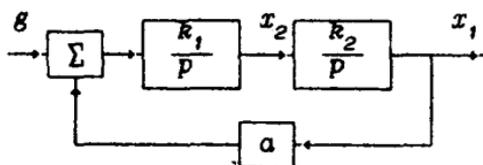


Рис.10.1

2. Постройте фазовый портрет свободного движения системы с переменной структурой, описываемой передаточными функциями:

$$W(p) = \begin{cases} \frac{1}{p^2-1}, & x < 0, \dot{x} + x > 0; \\ \frac{1}{p^2+1}, & x < 0, \dot{x} + x < 0; \\ \frac{1}{p^2-1}, & x > 0, \dot{x} + x < 0; \\ \frac{1}{p^2+1}, & x > 0, \dot{x} + x > 0. \end{cases}$$

Программа работы

1. Реализуйте на АВК модель системы, структурная схема которой представлена на рис.10.1.

2. Приняв $k_1=100$ и $a=1$, рассчитайте и установите k_2 так, чтобы выполнялось следующее соотношение между полуосями эллипсов:

$$\frac{x_{2m}}{x_{1m}} = 2.$$

3. Зафиксировав k_1 и k_2 , рассчитайте и установите $a=a_2$, так чтобы $\frac{x_2^m}{x_1^m} = 0.5$.

4. Используя нелинейный блок, реализуйте нелинейную характеристику $a(m) = \begin{cases} a_1, & m < 0; \\ a_2, & m \geq 0. \end{cases}$

5. Реализуйте на АБК модель системы, структурная схема которой приведена на рис.10.2. Исследуйте свободное и вынужденное движение системы.

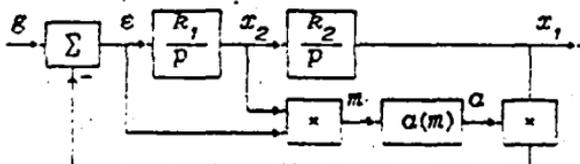


Рис.10.2

Содержание отчета

1. Структурная схема модели, расчет параметров, фазовые портреты и временные диаграммы свободного движения системы по пп.2,3.
2. Структурная схема, фазовые портреты и временные диаграммы свободного и вынужденного движения системы по пп.4,5.
3. Выводы.

Лабораторная работа №11

Спектральный анализ периодических сигналов. Гармоническая линеаризация

Цель работы: овладение инженерными методами спектрального анализа динамических процессов; изучение преобразований спектров сигналов безынерционными нелинейностями и линейными фильтрами.

Вопросы для подготовки к работе

1. Приведите расчетные соотношения общего вида, используемые при разложении функции в ряд Фурье.
2. Какой вид принимает разложение функции в ряд Фурье:
 - а) симметричной относительно начала координат;
 - б) симметричной относительно оси ординат?

3. Как линейная - динамическая система преобразует входной синусоидальный сигнал?

4. Дайте определение амплитудно-частотной и фазочастотной характеристикам линейной динамической системы.

5. Как рассчитать амплитуду и фазу синусоиды на выходе линейной динамической системы?

6. На вход безынерционной нелинейности подается гармонический сигнал. Какие гармоники присутствуют в спектре выходного сигнала и каковы их фазовые сдвиги, если характеристика нелинейности $Y=N(x)$:

а) симметрична относительно начала координат (нечетная), $N(x)=-N(-x)$?

б) осесимметрична (четная), $N(x)=N(-x)$?

в) несимметрична, например, $N(x)=\begin{cases} 0, & x < 0 \\ c, & x > 0 \end{cases}$?

7. Какой вид должна иметь характеристика фильтра, позволяющего выделить одну гармонику в спектре сигнала?

8. Как экспериментально проверить теоретические результаты расчета спектра сигналов?

9. В чем смысл гармонической линейризации нелинейного элемента?

10. Приведите расчетные соотношения для определения коэффициентов гармонической линейризации.

11. Каков физический смысл коэффициентов гармонической линейризации?

Контрольные задачи

1. Постройте графоаналитическим методом осциллограммы сигналов, получающиеся на выходе нелинейности $y=N(x)$, изображенной на рис.11.1 для входных периодических сигналов $x(t)=a \cdot \sin \omega t$, $x(t)=a \cdot \wedge(t)$, при $a=1, 2, 5$.

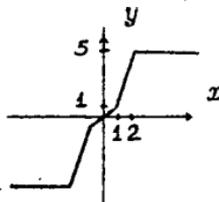


Рис.11.1

2. Рассчитайте установившийся сигнал на выходе y аperiodического звена с передаточной функцией $W(p)=\frac{10}{p+1}$, если на его вход подается сумма трех сигналов $x(\omega t)=\sin t+5\sin(2t+\frac{\pi}{4})+2\sin(t-\frac{\pi}{2})$.

3. Разложите в ряд Фурье функции заданные на интервале $-\pi < x < \pi$ с периодом 2π

а) $y=x$;

б) $y=|x|$;

в) $y = \begin{cases} c_1, & \text{при } -\pi < x < 0 \\ c_2, & \text{при } 0 < x < \pi \end{cases}$; г) $y = \begin{cases} x, & \text{при } -\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - x, & \text{при } \frac{\pi}{2} \leq x \leq \pi \\ -(\pi + x), & \text{при } -\pi \leq x \leq -\frac{\pi}{2} \end{cases}$.

4. Вычислите коэффициенты гармонической линеаризации нелинейностей, представленных на рис. 11.2 и качественно изобразите соответствующие эквивалентные амплитудные и фазовые характеристики.

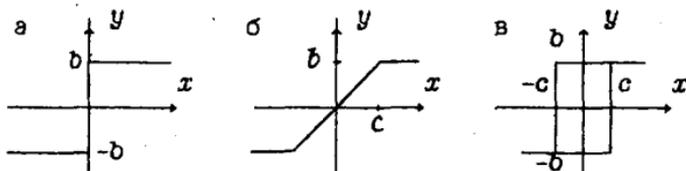


Рис. 11.2

Программа работы

1. Разложите в ряд Фурье периодический сигнал прямоугольной формы $a\Pi(t)$, имеющий нулевое среднее значение. Результаты представьте в виде диаграмм, отображающих зависимость амплитуды и фазы гармонической составляющей от номера гармоники $n=1, \dots, 5$.

2. Пользуясь блоком спектрального анализа, исследуйте спектральный состав прямоугольного сигнала генератора АВК. Результаты измерений используйте для проверки диаграмм, построенных при выполнении теоретических расчетов. Рекомендуемый полупериод сигнала генератора АВК - 33-35 мс, амплитуда - 5 В. Убедитесь, что изменение частоты генератора не меняет абсолютной, а изменение амплитуды сигнала генератора - относительной величины гармоник в спектре.

3. Постройте экспериментально по три точки графиков, отражающих зависимость коэффициента гармонической линеаризации нелинейностей, представленных на рис. 11.2 ($b=5, c=2$) от амплитуды входного сигнала. Сравните результаты эксперимента с теоретическими расчетами.

Содержание отчета

1. Теоретические расчеты, диаграммы и графики по пп. 1-3.

2. Результаты экспериментов в виде осциллограмм по пп.2,3.
3. Выводы.

Лабораторная работа №12

Исследование нелинейных систем методом гармонического баланса

Цель работы: практическое овладение методом гармонического баланса как инструментом анализа устойчивости замкнутых систем, выявления условий возбуждения незатухающих периодических колебаний, определение параметров этих колебаний.

Вопросы для подготовки к работе

1. Что можно определить с помощью метода гармонического баланса?

2. Что такое автоколебания? Какой вид имеет уравнение, определяющее возможность возникновения автоколебаний (уравнение Гольдфарба)?

3. Укажите способы решения уравнения Гольдфарба.

4. Приведите математическую формулировку условий баланса фаз и баланса амплитуд.

5. Сформулируйте понятия устойчивости системы и устойчивости автоколебаний.

6. В чем особенности применения критерия устойчивости Найквиста для анализа нелинейной системы?

7. Сформулируйте критерий устойчивости автоколебаний.

8. Если уравнение Гольдфарба не имеет решений, будет ли система устойчивой?

9. Можно ли применять метод гармонического баланса к системе с двумя нелинейностями?

Контрольные задачи

1. Покажите, что применение метода гармонического баланса к системе с нелинейной характеристикой вида двухпозиционное реле с гистерезисом и передаточной функцией линейной части системы

$W(p) = \frac{k}{T_1 p + 1}$ приводит к качественно неверным результатам.

2. Вычислите, пользуясь методом гармонического баланса частоту и

амплитуду возможных автоколебаний в системе с нелинейной характеристикой вида идеальное двухпозиционное реле с уровнем насыщения b и передаточной функцией линейной части

$$W(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

Программа работы

1. Для нелинейной системы (рис.12.1) исследуйте теоретически возможность возникновения автоколебаний. Вычислите частоту и амплитуду автоколебаний и проанализируйте их устойчивость.

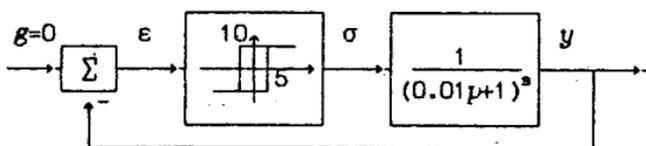


Рис. 12.1

2. Проверьте моделированием теоретические предсказания о возможности существования автоколебаний и их параметрах по результатам исследования разомкнутой системы.

3. Определите экспериментально параметры автоколебания путем анализа переходного процесса замкнутой системы. Объясните расхождение между теоретическими расчетами и результатами экспериментальных исследований разомкнутой и замкнутой систем.

Содержание отчета

1. Теоретические расчеты по п.1.
2. Осциллограммы и результаты экспериментов по пп.2,3.
3. Выводы.

Список литературы

1. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1975.
2. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем. - М.: Наука, 1977.
3. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. - М.: Наука, 1978.
4. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. - М.: Наука, 1979.
5. Александров Г. Н., Гаврилин В. В., Федоров В. А. Персональный аналоговый компьютер АВК-6. - М.: Изд. МИФИ, 1989.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Вводное занятие. Ознакомление с аналоговым вычислительным комплексом АВК-6.....	4
Лабораторная работа №1. Типовые динамические звенья первого порядка. Характеристики звеньев и их соединения.....	6
Лабораторная работа №2. Динамические звенья второго порядка....	8
Лабораторная работа №3. Устойчивость линейных систем автоматического управления.....	10
Лабораторная работа №4. Повышение точности систем автоматического управления в установившемся режиме.....	12
Лабораторная работа №5. Анализ качества линейных систем автоматического управления.....	15
Лабораторная работа №6. Системы автоматического управления с ПИД-регулятором.....	17
Лабораторная работа №7. Типовые нелинейности систем автоматического управления.....	19
Лабораторная работа №8. Анализ движения управляемых объектов второго порядка методом фазовой плоскости.....	21
Лабораторная работа №9. Исследование релейных систем автоматического управления методом фазовой плоскости.....	22
Лабораторная работа №10. Системы автоматического управления с переменной структурой.....	23
Лабораторная работа №11. Спектральный анализ периодических сигналов. Гармоническая линеаризация.....	25
Лабораторная работа №12. Исследование нелинейных систем методом гармонического баланса.....	28
Список литературы.....	30

Александр Васильевич Маматов
Владимир Николаевич Подлесный

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу "Теория автоматического управления"
для студентов специальности 21.02

Ответственный за выпуск А.В.Маматов

Подписано в печать 23.10.95.

Формат 60*84/16

Объем 1.5 уч.-изд.л.

Тираж 200

Заказ 459

Цена 3000 руб.

Рецензент Белгородской государственной технологической академии
структурных материалов, 308002, г. Белгород, ул. Костыкова, 46.