



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторному практикуму
по курсу
«ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ»**

Москва 1991

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Методические указания
к лабораторному практикуму
по курсу "Теория автоматического управления"

Утверждено советом
факультета "А"

Москва, 1991

УДК 681.5.011 (076.5)

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу "Теория автоматического управления". М.: МИФИ, 1991. 48 с.

Методические указания содержат программу экспериментов на аналоговом персональном компьютере АБК-6, связанных с выполнением 8 лабораторных работ по курсу "Теория автоматического управления".

Лабораторный практикум посвящен изучению статике и динамики линейных и нелинейных систем.

Рассматриваются характеристики типовых динамических звеньев первого и второго порядка и их соединений; исследуется устойчивость линейных систем с обратной связью и качество переходных процессов в замкнутых системах, а также изучаются точные и приближенные методы анализа нелинейных динамических систем (метод фазовой плоскости и метод гармонического баланса).

Методические указания предназначены для студентов, выполняющих лабораторный практикум по курсам "Теория автоматического управления", "Основы автоматики", и для преподавателей, проводящих занятия в лаборатории.

Составители: Алексаков Г.Н., Копылов Б.И.

Введение

Методические указания к лабораторному практикуму имеют следующую цель:

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

Основными этапами лабораторной работы являются:

- 1) подготовка к работе;
- 2) выполнение работы на персональном аналоговом компьютере АВК-6;
- 3) сдача отчета по выполненной работе.

Подготовка к работе предполагает изучение студентом соответствующего раздела теоретического курса и овладение навыками применения этих знаний к решению типовых практических задач. На этом этапе студент должен подготовить ответы на предлагаемые контрольные вопросы и проделать ряд упражнений, предваряющих выполнение работы. Студент допускается к работе только в том случае, если после собеседования он показал достаточные знания теоретического материала и представил необходимые расчеты.

Выполнение работы связано с постановкой ряда экспериментов на персональном аналоговом компьютере АВК-6. Программа экспериментов составлена с расчетом на их последовательное усложнение и углубление содержания. В ряде случаев студенту предла-

гается провести теоретический анализ полученных результатов.

Каждую выполненную работу студент оформляет в рабочей тетради в виде отчета, который должен содержать схемы поставленных экспериментов, полученные результаты в виде таблиц, осциллограмм, графиков и т.п., а также необходимые расчеты и выводы по работе. Кроме того, при сдаче отчета студенту может быть предложено поставить эксперимент, не вошедший в программу работы, но полностью основанный на ее результатах и требующий применения аналогичной методики.

Основные правила работы на персональном аналоговом компьютере АЗК-6 и методика различных экспериментов изложены в пакете методических рекомендаций (авторы Г.Н.Алексаков, В.В.Гаврилин, В.А.Федоров), подготовленном инженерным центром МИФИ. Пакет состоит из 6 отдельных выпусков (глав), которые могут быть использованы в качестве справочных пособий в процессе выполнения лабораторного практикума.

Вводное занятие

Ознакомление с персональным аналоговым компьютером АЗК-6

Цель работы: изучение состава АЗК-6 и приобретение навыков работы с отдельными его устройствами (генератор сигналов, индикатор, коммутатор, сумматоры, делители, измерители напряжения и временных интервалов).

Программа работы

1. Воспользовавшись гл.2 ("Персональный аналоговый компьютер АЗК-6") пакета методических рекомендаций, предварительно изучите общую организацию АЗК-6, состав и назначение элементов его индикационно-измерительной системы, состав служебного бло-

ка и назначение его элементов.

2. Воспользовавшись гл. 3 ("Приемы работы с АВК-6") пакета методических рекомендаций, последовательно проделайте эксперименты, рекомендованные в разд. 3.1 данной главы. Отрадите в рабочей тетради схемы всех экспериментов и сделайте практические выводы, касающиеся правил работы с элементами индикационно-измерительной системы и служебного блока АВК-6.

3. С целью закрепления полученных навыков разработайте схему формирования на экране индикатора заданного преподавателем изображения и поставьте соответствующий эксперимент.

Лабораторная работа № 31

Статика элементов и систем автоматического управления

Цель работы: моделирование нелинейных статических характеристик, изучение влияния обратных связей на вид статических характеристик, исследование статических характеристик при параллельном, последовательном соединении элементов и соединении элементов в контур с обратной связью.

Вопросы для подготовки к работе

1. Что называется статической характеристикой?
2. Укажите известные Вам виды внешних воздействий на объект регулирования или элемент системы регулирования.
3. В чем отличие между управляющим и возмущающим воздействиями?
4. Охарактеризуйте нагрузку как частный случай возмущающего воздействия.
5. Что такое регулировочная и нагрузочная (внешняя) характеристики?

6. Как экспериментально получить статическую характеристику какого-либо элемента?

7. Как автоматизировать процесс получения статической характеристики?

8. Как правильно выбрать форму тестового сигнала и его частоту для наблюдения статической характеристики на экране индикатора (осциллографа) или для регистрации ее на самописце?

9. С какой целью производится линеаризация реальных нелинейных статических характеристик?

10. Как описать полученную экспериментально нелинейную статическую характеристику путем:

а) кусочно-линейной аппроксимации;

б) квадратичной аппроксимации?

11. Как графически построить статическую характеристику для параллельного соединения двух элементов?

12. Как графически построить статическую характеристику для последовательного соединения двух элементов?

13. Как графически получить статическую характеристику для соединения двух элементов в контур с отрицательной или положительной обратной связью?

Программа работы

1. Соберите схему для наблюдения на экране индикатора статической характеристики нелинейного блока АВК-6. По мнемосхеме на панели блока изучите назначение органов настройки нелинейной зависимости и проверьте их действие, наблюдая за изменением изображения на экране индикатора.

2. Нелинейная зависимость задана графиком рис. 1 ($U_1 = 2$,

$U_2 = 4, U_3 = 5$). Постройте графики $y(u)$ для системы, изображенной на рис.2, при $K = 2; 4; 5$. Проверьте результаты расчетов моделированием; при этом настройку нелинейного блока производите при $K = 1$ по графику рис.1.

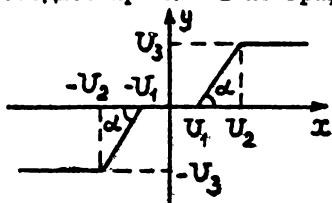


Рис.1

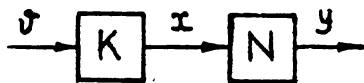


Рис.2

3. Поменяйте местами усилитель и нелинейность (рис.3). Постройте графики $z(x)$ при $K = 1; 2; 4; 5$. Проверьте Ваши расчеты моделированием. На основании пп.2 и 3 сделайте соответствующие выводы.

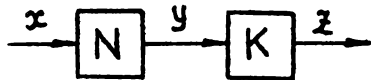


Рис.3

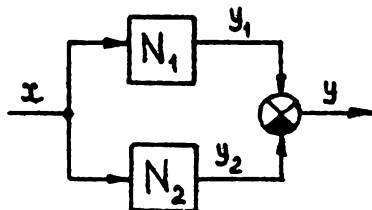


Рис.4

4. Настройте один нелинейный блок в соответствии с рис.1 при $U_1 = 0, U_2 = 5, U_3 = 5$; второй блок настройте для значений $U_1 = 0, U_2 = 2, U_3 = 2$. Предскажите результирующую статическую характеристику, если блоки соединить по схеме рис.4. Какой результат можно ожидать, если блоки N_1 и N_2 поменять местами? Поставьте эксперимент и сделайте соответствующие выводы. Проанализируйте погрешности, возникающие при неточности установки параметров U_2 или U_3 для какой-либо из нелинейностей.

5. Настройте один нелинейный блок по рис. I при $U_1 = 2$, $U_2 = \infty$, $U_3 = \infty$, $t_{\Sigma} = 1$; второй нелинейный блок настройте для $U_1 = 4$, $U_2 = \infty$, $U_3 = \infty$, $t_{\Sigma} = 1$. Какой результат можно ожидать, если блоки соединить по схеме рис. 4? Что будет, если блоки поменять местами? Проверьте результаты моделированием. Проанализируйте погрешности, возникающие при неточности установки t_{Σ} в каком-либо из блоков.

6. Настройте нелинейный блок по схеме рис. I при $U_1 = 0$, $U_2 = 2$, $U_3 = 5$. Предскажите результирующую статическую характеристику, если этот блок соединить параллельно с усилителем $K = 2,5$ по схеме рис. 5. Проверьте результат моделированием. Что будет, если усилитель и нелинейный блок поменять местами? Исследуйте влияние коэффициента усиления K на вид результирующей характеристики ($K = 1; 2,5; 5$).

7. Настройте нелинейный блок по рис. I при $U_1 = 2$, $U_2 = \infty$, $U_3 = \infty$, $t_{\Sigma} = 2,5$. Предскажите результат, если этот блок соединить параллельно с усилителем $K = 2,5$ по схеме рис. 5. Проверьте моделированием. Поменяйте местами усилитель и нелинейный блок, зарисуйте характеристику соединения. Исследуйте влияние коэффициента усиления K на зависимость $z(x)$ ($K = 1; 2,5; 5$).

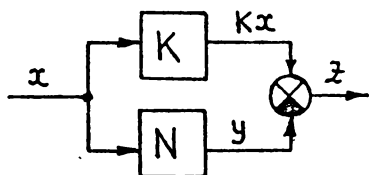


Рис.5

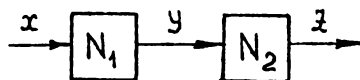


Рис.6

8. Рассчитайте статическую характеристику для последовательного соединения двух блоков (рис. 6), если N_1 и N_2 имеют вид, указанный, соответственно, на рис. 7. Прodelайте ту же опе-

рацию для случая, если блоки N_1 и N_2 поменять местами. Смоделируйте указанные статические характеристики и проверьте результаты.

9. Постройте характеристику $y = F(u)$ для системы с обратной связью (рис.8). Нелинейность $y = N(x)$ задана графиком рис.1 при $U_1 = 0$, $U_2 = 5$, $U_3 = 5$. $K = 1$; 2 ; 5 . Проверьте результаты моделированием.

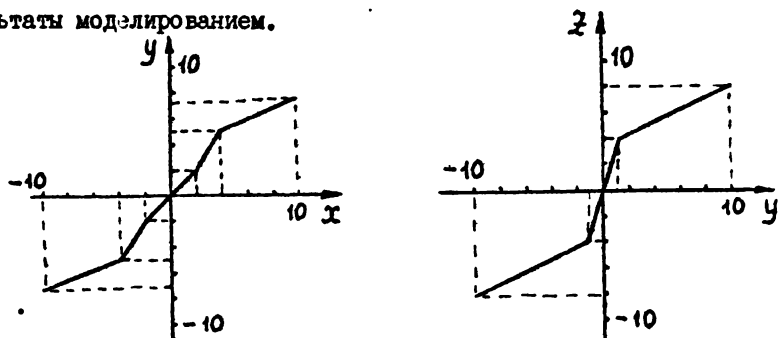


Рис.7

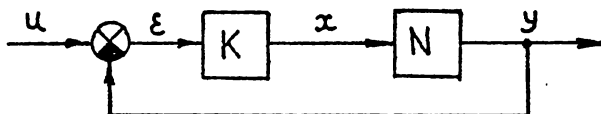


Рис.8

10. Постройте график зависимости $\varepsilon = \varepsilon(u)$ для условий п.9. Проверьте результаты моделированием. Для формирования сигнала ошибки $\varepsilon(u) = u - y$ можно использовать отдельный сумматор.

11. Постройте график $x = x(u)$ для условий п.9. Проверьте теоретические результаты моделированием.

12. Повторите пп.9, 10, 11 для нелинейности вида рис.1 при $U_1 = 2$, $U_2 = 5$, $U_3 = 6$.

13. Постройте график $y = y(u)$ для системы с положительной обратной связью (рис.9), если нелинейность N имеет вид

рис. I при $U_1 = 0$, $U_2 = 5$, $U_3 = 5$. При $\alpha = 0,25$ и $\alpha = 1$ про-
варьируйте $K = 1; 2; 4; 5$. Проверьте результаты моделированием.
Обратите внимание на качественное изменение характеристики си-
стемы при переходе произведения $K\alpha$ через значение 1,0. Иссле-
дуйте зависимость ширины петли от глубины положительной обрат-
ной связи (произведение $K\alpha$) и уровня насыщения $y_{\max} = U_3$.

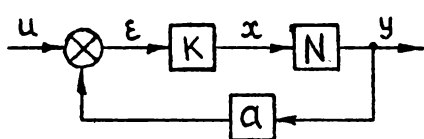


Рис.9

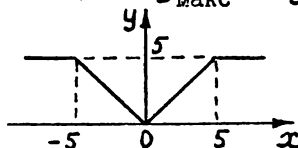


Рис.10

14. Постройте зависимость $\varepsilon = \varepsilon(u)$ для условий п.13.
Проверьте результат моделированием.

15. Повторите пп.13 и 14 для нелинейности, заданной рис. I,
при $U_1 = 2$, $U_2 = 4$, $U_3 = 5$.

16. Про моделируйте статическую характеристику идеального
магнитного усилителя (рис.10). Охватите магнитный усилитель об-
ратной связью. Изменяя глубину обратной связи, объясните наблю-
даемые изменения формы статической характеристики.

17. Структурная схема управляемого генератора показана на
рис. II. На холостом ходу ($I_H = 0$) установили выходное напряжение
 $U_0 = E_T = 8$ В. После этого к генератору подключили нагрузку,
по которой идет ток $I_H = 2$ А. Чему стало равно выходное напря-
жение генератора U , если его внутреннее сопротивление $R_i = 10 \Omega$?
Запишите уравнение внешней (нагрузочной) характеристики генера-
тора. Каким было U_0 на холостом ходу, если $K_T = 2$? Как надо
изменить U_0 , чтобы выходное напряжение генератора в нагружен-
ном состоянии вернулось к первоначальному значению $U_0 = 8$ В?
Про моделируйте генератор по схеме рис. II, проверьте теорию экс-
периментом над моделью.

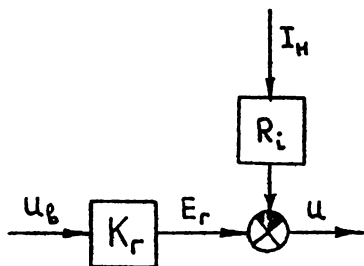


Рис. I1

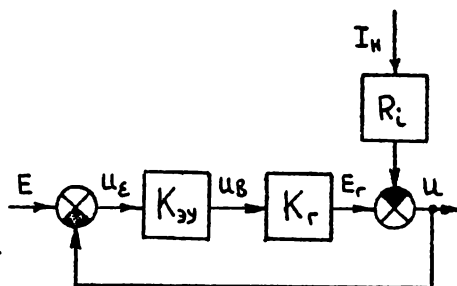


Рис. I2

18. Структурная схема системы автоматического регулирования напряжения генератора изображена на рис. I2. В схеме имеется электронный усилитель, коэффициент усиления которого может принимать значения $K_{эу} = 2; 5; 10$. Для $E = 8 \text{ В}$, $K_T = 2$, $R_L = 1 \text{ Ом}$ и разных значений $K_{эу}$ рассчитайте и постройте графики зависимости от тока нагрузки I_H :

- а) выходного напряжения $U(I_H)$;
- б) сигнала $U_\varepsilon(I_H)$;
- в) рассогласования $U_\varepsilon(I_H)$.

Рассчитайте теоретически величину выходного сопротивления $R_{iос}$ схемы с обратной связью. Проверьте Ваши рассуждения экспериментом над моделью. Сравните данные эксперимента с расчетными и сделайте соответствующие выводы.

19. Исследуйте эффект ограничения выходного напряжения генератора. Для этого, приняв $E = 8 \text{ В}$, $K_{эу} = 2$, $R_L = 1 \text{ Ом}$, $K_T = 2$ и $E_T \text{ макс} = 9 \text{ В}$, рассчитайте и постройте график зависимости $U = U(I_H)$. Результаты проверьте путем моделирования.

Лабораторная работа № 32

Типовые динамические звенья первого порядка.

Характеристики звеньев и их соединений

Цель работы: моделирование динамических звеньев первого порядка методом структурных схем; исследование временных и частотных характеристик звеньев и их соединений.

Вопросы для подготовки к работе

1. Что называется передаточной функцией?
2. Как получить выражение для передаточной функции, если известно дифференциальное уравнение системы?
3. Дайте определения переходной и импульсной переходной (весовой) функции.
4. Как определить переходную и импульсную переходную функции по передаточной функции системы?
5. Укажите связь между передаточными функциями системы в разомкнутом и замкнутом состоянии.
6. Запишите выражение и изобразите вид переходной функции следующих типовых динамических звеньев: интегрирующего, апериодического, неустойчивого апериодического, колебательного, вырожденного колебательного (консервативного), неустойчивого колебательного.
7. Как по графику переходной функции каждого из указанных выше звеньев определить параметры соответствующей передаточной функции?
8. Что такое амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики динамической системы?
9. Что такое амплитудно-фазовая характеристика, как ее построить?

10. Как экспериментально получить амплитудно-фазовую характеристику системы?

11. Объясните, с какой целью вводится понятие логарифмических частотных характеристик.

12. Изобразите вид логарифмических частотных характеристик указанных выше типовых динамических звеньев.

13. Как по логарифмическим частотным характеристикам указанных динамических звеньев определить параметры соответствующей передаточной функции?

14. Докажите, что при наклоне логарифмической амплитудно-частотной характеристики, равном $\pm 20\text{к дБ/дек}$, увеличение частоты в n раз приводит к увеличению (уменьшению) амплитуды выходного сигнала в n^k раз.

15. Как определяются частотные характеристики при последовательном соединении динамических звеньев?

Программа работы

1. Запишите дифференциальное уравнение и передаточную функцию для схемы, изображенной на рис. 13. Примите $K = 1$, рассчитайте и постройте семейство переходных функций, изменяя

α в пределах от -1 до $+1$ с шагом $0,2$. Проверьте полученные результаты путем моделирования. Почему на индикаторе удобнее наблюдать изображение, выбрав коэффициент усиления интегратора равным 100 ?

2. Каждой из переходных функций семейства поставьте в соответствие логарифмические амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики. Какие из них можно получить экспериментально? Проверьте Ваши предсказания моделированием.

3. Проинтегрируйте графически сигналы $x(t) = \sin t$ и $x(t) = \cos t$ при $y(0) = 0$. Чем отличаются полученные графич-

ки? Как зависит постоянная составляющая на выходе интегратора от фазы гармонического сигнала в момент его подключения ко входу интегратора?

4.Примите, что смещение операционного усилителя эквивалентно подаче на вход интегратора сигнала величиной 100 мВ. Рассчитайте, как при этом будет изменяться выходное напряжение, если в начальный момент оно было равно нулю. Как экспериментально измерить дрейф, приведенный ко входу интегратора? Измерьте приведенный ко входу дрейф для каждого из интеграторов, имеющих в Вашем распоряжении.

5.Повторите п.3, считая, что кроме гармонического сигнала ко входу интегратора приложен постоянный сигнал, равный 10% от амплитуды синусоиды.

6.Объясните причины, по которым нельзя экспериментально исследовать при помощи аналогового моделирования частотные характеристики идеального интегратора.

7.Рассчитайте установившееся значение сигнала на выходе схемы рис.13 (при $K = 1$) для $\alpha = -0,1; -0,2; -0,5; -1,0$ при подаче на ее вход постоянного сигнала 100 мВ.Проверьте результаты экспериментально.Как скомпенсировать смещение, вызываемое дрейфом операционного усилителя?

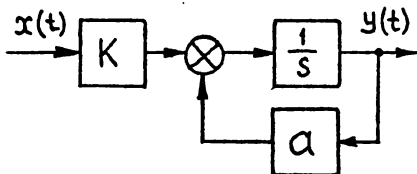


Рис.13

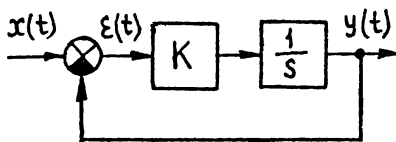


Рис.14

8.Предложите методику, позволяющую исследовать моделированием частотные характеристики идеального интегратора как

предел, к которому стремятся характеристики апериодического звена.

9. Исследуйте экспериментально реакцию апериодического звена (рис. I3) на ступенчатое изменение входа $x(t)$ при ненулевом начальном условии $-10 \text{ В} < y(0) < +10 \text{ В}$ для разных значений параметра α . Зарисуйте и объясните полученные результаты.

10. Запишите передаточную функцию для схемы рис. I4. В чем ее отличие от передаточной функции схемы рис. I3? Сравните полученную передаточную функцию с передаточной функцией электрической цепи, изображенной на рис. I5.

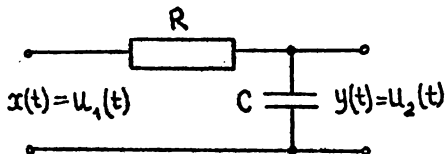


Рис. I5

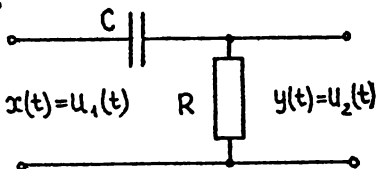


Рис. I6

11. Предскажите теоретически и проверьте моделированием переходные функции системы, изображенной на рис. I4, при $K = 0,5; 1,0; 5,0; 10$.

12. Каждой из переходных функций, полученных в п. II, поставьте в соответствие логарифмические амплитудную и фазовую частотные характеристики. Проверьте Ваши расчеты моделированием.

13. Сравните результаты пп. II и 12 с результатами пп. I и 2. Укажите сходства и различия характеристик.

14. Для структурной схемы рис. I4 определите передаточную функцию

$$W(s) = \frac{E(s)}{X(s)}$$

Сравните ее с передаточной функцией RC-цепочки, изображенной на рис. I6.

15. Рассчитайте переходные функции для $K = 0,5; 1,0; 5,0;$

10. Проверьте результаты моделированием.

16. Исследуйте на модели реакцию данной системы на ступенчатое изменение $x(t)$ при ненулевом начальном условии $-10 \text{ В} < y(0) < +10 \text{ В}$. Объясните полученные результаты.

17. Переходным функциям, полученным в п.15, поставьте в соответствие логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики. Проверьте результаты моделированием.

18. Определите передаточную функцию для структурной схемы, изображенной на рис.17. Сравните выражение с передаточной функцией электрической цепи, изображенной на рис.18.

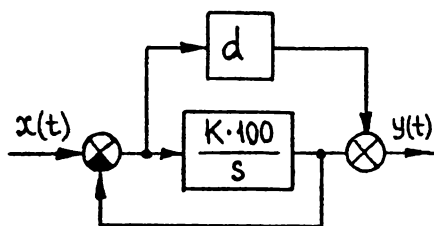


Рис.17

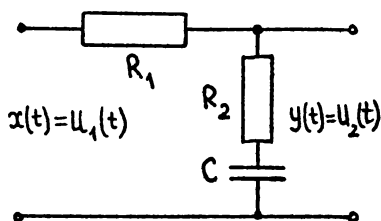


Рис.18

19. Исследуйте моделированием переходные функции этой системы для $K = 1$ и $d = 0; 0,2; 0,5; 1,0$. Обратите внимание на поведение системы при $d = 1,0$. Объясните физический смысл коэффициента d на примере схемы рис.18. Полученным переходным функциям поставьте в соответствие логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики.

20. Пронаблюдайте переходные функции системы (рис.17) при $d = 0,2$ для $K = 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0$. Объясните полученные результаты.

21. Запишите передаточную функцию, соответствующую структурной схеме рис.19. Сравните выражение с передаточной функцией электрической цепи, изображенной на рис.20.

22. Получите моделированием переходные функции этой систе-

мы для $K = 1$ и $d = 0; 0,2; 0,5; 1,0$. Каждой из полученных переходных функций поставьте в соответствие логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики.

23. Пронаблюдайте переходные функции для схемы рис.19 при $d = 0,2$ и $K = 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0$. Объясните полученные результаты.

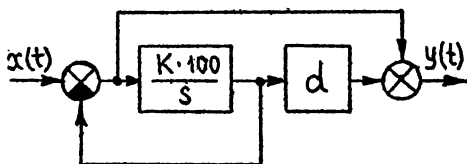


Рис.19

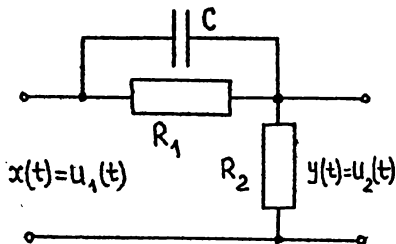


Рис.20

24. Разработайте структурную схему для моделирования передаточной функции
$$W(s) = \frac{\tau s}{\tau s - 1}.$$

Предскажите вид переходной функции и проверьте моделированием.

25. Предложите структурную схему для моделирования передаточной функции
$$W(s) = \frac{\tau_1 s - 1}{\tau_2 s + 1}.$$

Предскажите вид переходных функций и частотных характеристик для отношения

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = 0,2; 1,0; 5,0.$$

Проверьте результаты моделированием.

26. Предскажите реакцию аperiodического звена

$$W(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

на линейно меняющийся входной сигнал $x(t) = At \cdot 1(t)$. Исследуйте реакцию моделированием при:

а) $T = 0,01$ с, $A = 10; 50; 200$ В/с;

б) $A = 10$ В/с, $T = 0,01; 0,05; 0,1$ с.

Объясните полученные результаты.

27. Предскажите реакцию звена с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{Ts}{Ts + 1}$$

на входное воздействие вида $x(t) = At \cdot 1(t)$.

Проверьте результат моделированием для $T = 0,01$ с, $A = 10; 50; 200$ В/с.

28. Исследуйте путем моделирования переходные функции звеньев с передаточными функциями

$$W(s) = K \cdot \frac{Ts + 1}{s} ; K \cdot \frac{Ts - 1}{s} ; K \cdot \frac{1 - Ts}{s} .$$

Определите влияние параметров K и T на вид переходных функций.

Исследуйте частотные характеристики данных звеньев.

Лабораторная работа № 33

Динамические звенья второго порядка

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

Программа работы

1. Реализуйте на АВК-6 два апериодических звена с передаточными функциями

$$W_1(s) = \frac{1}{0,01s + 1} \quad \text{и} \quad W_2(s) = \frac{2}{0,02s + 1} .$$

2. Предскажите вид логарифмических частотных характеристик для последовательного соединения данных звеньев.

3. Проверьте результат экспериментально. Изменятся ли частотные характеристики, если звенья поменять местами? Проверьте Ваши ожидания экспериментом.

4. Предскажите вид переходной функции для последовательного соединения данных апериодических звеньев. Проверьте результат моделированием.

5. Путем расчета преобразуйте последовательное соединение данных апериодических звеньев в тождественное ему параллельное соединение.

6. Смоделируйте полученное параллельное соединение и убедитесь, что при правильной настройке коэффициентов все характеристики (частотные и временные) совпадают с характеристиками исходного последовательного соединения.

7. Исследуйте теоретически и проверьте экспериментально последствия погрешностей при определении и настройке коэффициентов усиления в преобразованном параллельном соединении звеньев. К каким искажениям математической модели и графика переходной функции приводят эти погрешности?

8. Смоделируйте два звена с передаточными функциями

$$W_1(s) = \frac{1}{0,01s + 1} \quad \text{и} \quad W_3(s) = \frac{1}{0,01s - 1}.$$

9. Рассчитайте переходную функцию для последовательного соединения этих звеньев. Соедините звенья последовательно и проверьте результат. Изменится ли переходная функция, если звенья поменять местами? Проверьте моделированием.

10. Для данных звеньев повторите расчеты и эксперименты пп. 5 - 7.

11. Теоретически определите вид логарифмических частотных характеристик для последовательного соединения звеньев $W_1(s)$ и $W_3(s)$. Можно ли проверить результаты экспериментально? Почему?

12. Подготовьте на АБК-6 звенья с передаточными функциями

$$W_1(s) = \frac{1}{0,01s + 1} \quad \text{и} \quad W_4(s) = \frac{100}{s}.$$

13. Рассчитайте переходную функцию для последовательного соединения этих звеньев.

14. Соедините звенья последовательно и проверьте результат.

15. Для данных звеньев повторите расчеты и эксперименты пп. 5 - 7.

16. Запишите передаточную функцию для структурной схемы, изображенной на рис. 21. Исследуйте, при каких соотношениях между коэффициентами a и b , каждый из которых может быть как положительным, так и отрицательным, можно реализовать корни характеристического уравнения, располагающиеся на комплексной плоскости так, как показано на рис. 22.

17. Каждому из вариантов расположения корней характеристического уравнения поставьте в соответствие передаточную функцию $W(s)$ и переходную функцию $h(t)$.

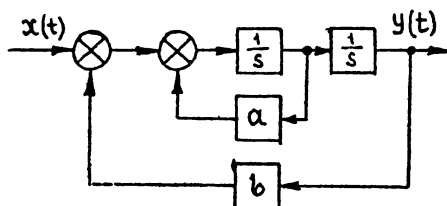


Рис. 21

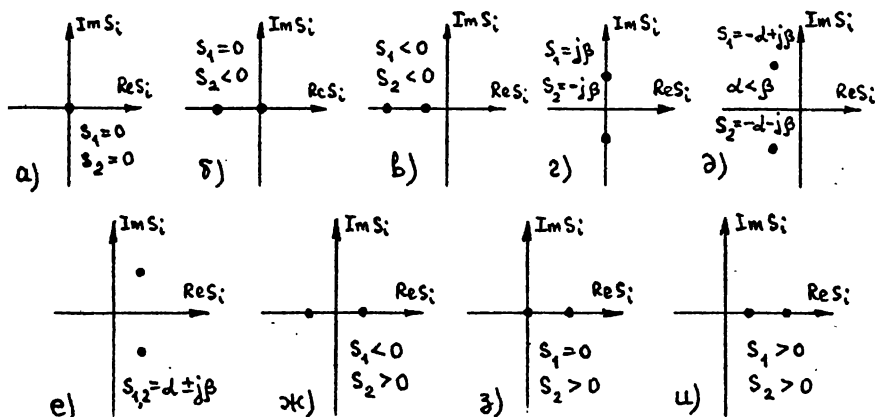


Рис. 22

Результаты проверьте моделированием. Для удобства наблюдения переходных функций целесообразно изменить (ускорить) масштаб времени, выбрав коэффициент передачи каждого интегратора равным 100.

18. Установив в схеме рис. 21 произвольные значения коэффициентов a и b , соответствующие устойчивому колебательному звену, получите экспериментально его переходную функцию и частотные характеристики. По результатам эксперимента определите параметры передаточной функции колебательного звена K , T и ξ .

Лабораторная работа № 34

Анализ устойчивости и качества линейных систем с обратной связью

Цель работы: исследование устойчивости линейных систем с обратной связью, а также влияния параметров системы на ее устойчивость и качество переходных процессов.

Вопросы для подготовки к работе

1. Дайте определение устойчивой динамической системы.
2. Как по дифференциальному уравнению системы определить ее устойчивость?
3. В чем сущность прямого метода анализа устойчивости?
4. Что называется критерием устойчивости?
5. В чем сущность критерия устойчивости Гурвица?
6. В чем сущность критерия устойчивости А.В. Михайлова?
7. Как построить годограф А.В. Михайлова?
8. В чем сущность критерия устойчивости Найквиста?
9. Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста для систем, устойчивых в разомкнутом состоянии.
10. В чем заключается особенность применения критерия Найквиста к астатическим системам?

11. Как исследовать устойчивость замкнутой системы по логарифмическим частотным характеристикам системы в разомкнутом состоянии?

12. Как получить характеристическое уравнение замкнутой системы по ее передаточной функции в разомкнутом состоянии?

13. Что такое запасы устойчивости по модулю (амплитуде) и фазе?

14. Какая система называется абсолютно устойчивой?

15. Чем отличаются понятия положительного и отрицательного запаса устойчивости по модулю?

16. Определите условия устойчивости замкнутой системы, если ее передаточная функция в разомкнутом состоянии имеет вид:

$$а) \frac{K}{T_s - 1} ; \quad б) \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s - 1)} ; \quad в) \frac{K(T_s - 1)}{T_s + 1} .$$

При решении задачи воспользуйтесь всеми известными Вам критериями устойчивости.

17. Укажите основные показатели качества, характеризующие переходный процесс, вызванный ступенчатым воздействием.

18. На вход системы (рис. 23) подано ступенчатое воздействие. Считая

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} ,$$

исследуйте влияние параметра K ($0 \leq K < \infty$) на вид переходного процесса. Изобразите корневой годограф системы при $0 \leq K < \infty$ и установите связь между основными показателями качества и положением на комплексной плоскости корней характеристического уравнения системы.

19. Повторите п. 18 для случая $W(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} .$

20. Для двух последних примеров найдите значение K , определяющее границу между монотонным и колебательным переходным процессом.

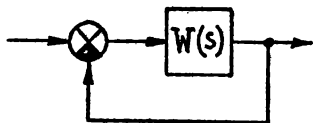


Рис.23

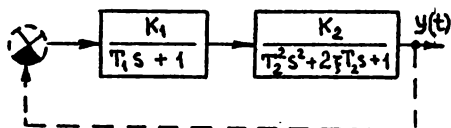


Рис.24

Программа работы

1. Подготовьте на АВК-6 апериодическое звено с передаточной функцией

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1}.$$

2. Пронаблюдайте переходную функцию этого звена и по ней определите численные значения параметров K_1 и T_1 .

3. Подготовьте на АВК-6 колебательное звено с передаточной функцией

$$W_2(s) = \frac{K_2}{T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1}.$$

4. По полученным на модели временным и (или) частотным характеристикам этого звена определите численные значения параметров K_2 , T_2 и ξ .

5. Соедините звенья последовательно, как указано на рис.24, и по экспериментальным частотным характеристикам этого соединения предскажите, будет ли система устойчива при охвате ее единичной отрицательной обратной связью (показана пунктиром).

6. Проверьте результат экспериментом. Устойчивость или неустойчивость замкнутой системы удобно наблюдать по ее свободному движению при ненулевом начальном условии $y(0)$.

7. Используя численные значения параметров звеньев, подтвердите результаты эксперимента расчетами с помощью любого известного Вам критерия устойчивости.

8. Исследуйте экспериментально влияние общего коэффициента усиления системы $K = K_1 K_2$ на ее устойчивость в замкнутом состоянии. Объясните результаты, используя логарифмические частотные

характеристики системы.

9. Подбором коэффициента усиления $K = K_1 K_2$ добейтесь устойчивости замкнутой системы и определите экспериментально запасы устойчивости по фазе γ и по модулю L_0 , используя частотные характеристики разомкнутой системы.

10. Предложите метод и схему измерения запаса устойчивости по фазе непосредственно в замкнутой системе. Поставьте эксперимент и сравните результат со значением γ , полученным в п.9.

11. Подготовьте на АВК-6 три апериодических звена с произвольными, но одинаковыми постоянными времени и различными коэффициентами усиления.

12. Соедините эти звенья последовательно и охватите их единичной отрицательной обратной связью, как показано на рис.25.

13. Изменяя общий коэффициент усиления K , наблюдайте характер свободного движения системы при ненулевом начальном условии $y(0)$. Сделайте вывод о влиянии параметра K на устойчивость системы.

14. Экспериментально найдите критическое значение коэффициента усиления $K_{кр}$, соответствующее нахождению системы на границе устойчивости. Каков при этом характер свободного движения системы? Как оно зависит от величины начального условия $y(0)$?

15. Экспериментально определите значение $K_{кр}$ по переходной функции разомкнутой системы.

16. Рассчитайте теоретически значение $K_{кр}$, пользуясь любым из известных Вам критериев устойчивости. Сравните полученные результаты.

17. Измените знак обратной связи в схеме рис.25 и повторите эксперименты и расчеты пп.13 - 16.

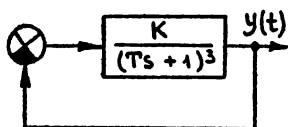


Рис.25

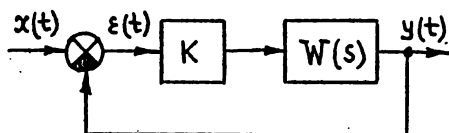


Рис.26

18. Для системы, изображенной на рис.25, постройте корневой годограф при $0 \leq K < \infty$ для разных знаков обратной связи. Поясните способ определения $K_{кр}$ с помощью корневого годографа.

19. Для системы, изображенной на рис.26, в случае

$$W(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^3}$$

проварьируйте K и исследуйте на модели зависимость от него запаса устойчивости по фазе γ и частоты среза ω_c разомкнутой системы, а также зависимость основных показателей качества замкнутой системы от γ и ω_c .

20. Повторите п.19 для

$$W(s) = \frac{1}{s(Ts + 1)}.$$

Сделайте выводы о влиянии коэффициента усиления на основные показатели качества замкнутой системы.

21. Для системы рис.26 наблюдайте изменение ошибки $\varepsilon(t)$ и исследуйте характер и установившееся значение $\varepsilon(t)$ в зависимости от коэффициента усиления при передаточных функциях следующего вида:

$$W(s) = \frac{1}{s+1}; \quad \frac{1}{s}; \quad \frac{1}{s(s+1)}; \quad \frac{s+1}{s^2}; \quad \frac{(s+1)^2}{s^3}$$

в случае ступенчатого, линейного и квадратичного входных сигналов. Для удобства наблюдения процессов на экране индикатора можно использовать ускоренный масштаб времени.

Сопоставьте результаты моделирования с данными, получающимися на основе предельных теорем преобразования Лапласа. Сделай-

те выводы о зависимости установившейся ошибки от порядка астатизма системы и ее коэффициента усиления.

22. Смоделируйте систему регулирования (рис.27), состоящую из неустойчивого объекта с передаточной функцией $W(s) = 1/(Ts - 1)$ и регулятора, реализующего пропорциональный закон регулирования $u(t) = K\varepsilon(t)$.

Исследуйте характер свободного движения замкнутой системы и экспериментально определите область значений параметра K , обеспечивающего устойчивость замкнутой системы.

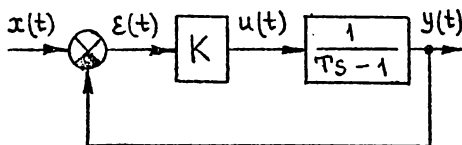


Рис.27

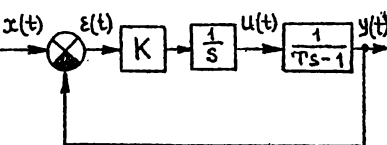


Рис.28

23. Задав значение параметра K , соответствующее устойчивой системе, наблюдайте переходный процесс, вызванный ступенчатым воздействием $x(t)$. Зафиксируйте величину и знак установившейся ошибки и исследуйте ее зависимость от коэффициента усиления K . Подтвердите результат путем применения предельной теоремы преобразования Лапласа.

24. С целью устранения установившейся ошибки, вызванной ступенчатым воздействием $x(t)$, введите в передаточную цепь интегрирующее звено (рис.28). Исследуйте экспериментально устойчивость замкнутой системы, в которой реализуется интегральный закон регулирования $u(t) = K \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$. Подтвердите результаты эксперимента теоретическим анализом.

25. С целью сохранения астатизма и обеспечения устойчивости замкнутой системы модифицируйте структуру регулятора (рис.29), реализовав пропорционально-интегральный закон регулирования

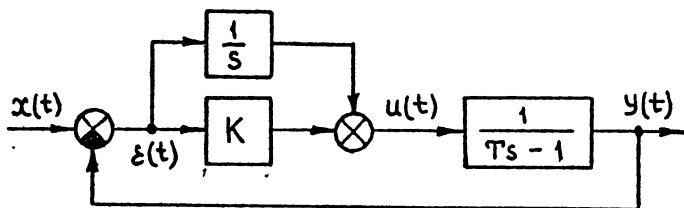


Рис.29

$u(t) = K\varepsilon(t) + \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$. Убедитесь теоретически и экспериментально, что данная система является устойчивой при тех же условиях, что и исходная (рис.27), но в отличие от нее не дает установившейся ошибки при обработке ступенчатых воздействий.

Лабораторная работа № 35

Анализ движения управляемых объектов методом фазовой плоскости

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

Вопросы для подготовки к работе

1. Охарактеризуйте понятие состояния динамической системы.
2. Что такое переменные состояния (фазовые переменные, фазовые координаты)? Как правильно выбрать фазовые переменные?
3. Что такое фазовое пространство?
4. Что такое изображающая точка?
5. Дайте определения фазовой траектории и фазового портрета.
6. Как можно построить фазовые траектории?
7. Охарактеризуйте сущность метода фазовой плоскости.
8. Опишите достоинства и недостатки метода фазовой плоскости.

9. Что называется изоклиной? В чем сущность метода изоклин?

10. Что такое особая точка? Какие Вам известны типы особых точек?

Программа работы

1. Используя имеющиеся в составе АВК-6 блоки, разработайте структурную схему, позволяющую моделировать линейное дифференциальное уравнение вида

$$\ddot{x} + p\dot{x} + qx = 0.$$

2. Исследуйте, при каких знаках обратных связей в модели и соотношениях ее параметров можно реализовать корни характеристического уравнения, соответствующие всем известным Вам типам особых точек решения исходного дифференциального уравнения.

3. Путем последовательной настройки модели наблюдайте на экране индикатора и зафиксируйте в рабочей тетради фазовый портрет, соответствующий каждой особой точке. Коэффициенты передачи интеграторов выбирайте исходя из удобства наблюдения картины на экране индикатора.

Наблюдайте и фиксируйте в рабочей тетради также осциллограммы переменных $x(t)$ и $\dot{x}(t)$, соответствующие характерным фазовым траекториям.

4. Смоделируйте на АВК-6 объект управления, имеющий передаточную функцию

$$W(s) = \frac{K}{s^2}.$$

Исследуйте методом фазовой плоскости свободное движение данного объекта. Зафиксируйте фазовые траектории при различных начальных условиях, а также соответствующие этим траекториям процессы $x(t)$ и $\dot{x}(t)$.

Проанализируйте влияние на вид фазовых траекторий измене-

ния коэффициента передачи объекта K .

5. Получите и зарисуйте в рабочей тетради фазовый портрет, отражающий вынужденное движение того же объекта под действием постоянного управляющего сигнала $+U_m$ или $-U_m$. Исследуйте влияние на вид фазовых траекторий изменения коэффициента передачи объекта K (при $U_m = \text{const}$) и величины U_m (при $K = \text{const}$).

Каждой фазовой траектории поставьте в соответствие процессы $x(t)$ и $\dot{x}(t)$.

6. Смоделируйте на АБК-6 объект управления, имеющий передаточную функцию

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}.$$

7. Исследуйте методом фазовой плоскости свободное движение данного объекта при разных знаках и величинах начальных условий. Зафиксируйте процессы $x(t)$ и $\dot{x}(t)$, соответствующие каждой фазовой траектории.

8. Проанализируйте, как изменится фазовый портрет при вариации параметров объекта K и T . Результаты отразите в рабочей тетради.

9. Получите и зарисуйте в рабочей тетради фазовый портрет, отражающий вынужденное движение данного объекта под влиянием постоянного управляющего сигнала $+U_m$.

Повторите эксперимент, изменив знак управляющего сигнала. Каждой фазовой траектории поставьте в соответствие процессы $x(t)$ и $\dot{x}(t)$.

10. Проанализируйте влияние на вид фазовых траекторий изменения параметров объекта K и T , а также величины сигнала U_m .

11. Смоделируйте на АБК-6 объект управления, имеющий передаточную функцию

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts - 1)}.$$

12. Для данного объекта повторите эксперименты пп. 7 - 10.
Результаты отразите в рабочей тетради.

Лабораторная работа № 36

Анализ методом фазовой плоскости релейных систем автоматического управления

Цель работы: овладение с помощью моделирования методом фазовой плоскости как инструментом точного анализа движения нелинейных систем второго порядка (на примере релейных систем).

Вопросы для подготовки к работе

1. Что называется линией переключения?
2. Как строятся линии переключения?
3. Что такое скользящий режим?
4. Как установить возможность возникновения в системе скользящего режима?
5. Что такое предельный цикл? Какие Вам известны типы предельных циклов?
6. Как по фазовой траектории определить развитие процесса во времени?
7. В чем особенность фазового портрета для систем с неоднозначными нелинейностями?
8. Как учесть при построении фазового портрета наличие в системе постоянного запаздывания?
9. Как правильно выбрать фазовые координаты при анализе динамической точности систем управления?

Программа работы

1. Смоделируйте на АБК-6 систему управления в соответствии

со структурной схемой, изображенной на рис.30. Передаточная функция $W_0(s) = K/s$, а реле имеет характеристику общего вида (рис.31).

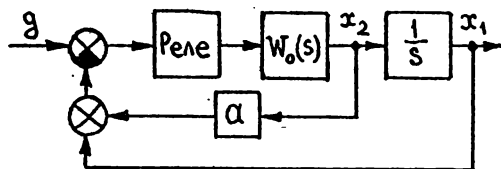


Рис.30

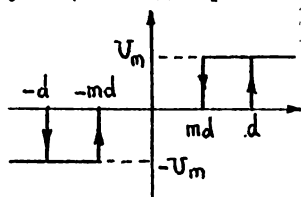


Рис.31

2. Для случая идеального двухпозиционного реле ($d = 0$), отсутствия коррекции по скорости ($\alpha = 0$) и отсутствия входного сигнала ($g = 0$) задайте начальное отклонение x_{10} (при $x_{20} = 0$) и наблюдайте фазовую траекторию, соответствующую свободному движению системы. Коэффициенты передачи интеграторов в модели выбирайте исходя из удобства наблюдения картины на экране индикатора. При наблюдении фазовых траекторий полезно на экране индикатора изобразить оси координат.

Зарисуйте в рабочей тетради процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$.

3. В данной системе введите коррекцию по скорости ($\alpha \neq 0$) и, задав начальное отклонение x_{10} (при $x_{20} = 0$), наблюдайте вид фазовых траекторий в зависимости от величины α .

Каждой фазовой траектории поставьте в соответствие процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$.

В случае сильной коррекции, приводящей к возникновению скользящего режима, обратите внимание на вид сигнала на выходе реле. Объясните полученный результат.

4. Что можно ожидать, если в данной системе неправильно выбрать знак обратной связи по скорости? Проверьте результат моделированием.

5. Измените вид релейной характеристики, введя зону нечувствительности ($d \neq 0$, $m = 1$).

Предскажите вид фазовых траекторий, соответствующих свободному движению системы при отсутствии коррекции по скорости.

6. Задайте начальное отклонение $|x_{10}| > d$ (при $x_{20} = 0$) и наблюдайте фазовую траекторию при отсутствии коррекции по скорости. Если поведение модели не согласуется с Вашими предсказаниями, попытайтесь установить и обсудите с преподавателем причину расхождений.

7. Проверьте величину коррекции по скорости $\alpha = 0,2; 0,6; 1,0$. Зафиксируйте вид процессов $x_2(t)$ и $x_1(t)$ при различной степени коррекции.

8. При прочих равных условиях исследуйте влияние величины зоны нечувствительности реле на фазовую траекторию и процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$, соответствующие отработке начального отклонения x_{10} .

9. Реализуйте релейную характеристику гистерезисного вида ($d \neq 0, m = -1$).

10. При $\alpha = 0$ задайте малое начальное отклонение x_{10} и наблюдайте фазовую траекторию и процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$.

11. Введите коррекцию по скорости и наблюдайте для $\alpha = 0,2; 0,5; 1,0$ фазовые траектории, соответствующие отработке малых ($|x_{10}| < d$) и больших ($|x_{10}| > d$) начальных отклонений. В чем принципиальное отличие этих траекторий? Как зависят от степени коррекции параметры предельного цикла и соответствующих ему периодических колебаний?

12. Реализуйте релейную характеристику с гистерезисом и зоной нечувствительности ($d \neq 0, 0 < m < 1$).

13. При $\alpha = 0$ задайте начальное отклонение $|x_{10}| > d$ и наблюдайте фазовую траекторию и соответствующие ей процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$.

14. Введите коррекцию по скорости и, варьируя величину α , исследуйте вид фазовых траекторий, соответствующих отработке одного и того же начального отклонения $|x_{10}| > d$.

Зарисуйте процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$.

15. По результатам пп. I - 14 сделайте выводы о динамике системы управления объектом с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{K}{s^2}$$

в случае однозначных и неоднозначных релейных характеристик.

16. В структурной схеме системы управления (рис. 30) реализуйте

$$W_0(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

и идеальное двухпозиционное реле.

17. Задайте начальное отклонение x_{10} (при $x_{20} = 0$) и наблюдайте фазовую траекторию и процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$ при отсутствии коррекции по скорости.

18. К чему приведет введение обратной связи по скорости? Что будет, если неправильно выбрать знак обратной связи по скорости? Проверьте Ваши предположения моделированием. Пронаблюдайте соответствующие фазовые траектории и процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$.

19. В релейной характеристике введите зону нечувствительности ($d \neq 0$, $m = 1$).

20. При отсутствии коррекции по скорости наблюдайте фазовые траектории, соответствующие отработке разных начальных отклонений $|x_{10}| > d$.

21. Осуществите коррекцию по скорости и исследуйте влияние ее величины на отработку одного и того же начального отклонения $|x_{10}| > d$.

22. Реализуйте релейную характеристику гистерезисного вида ($d \neq 0$, $m = -1$).

23. Пронаблюдайте фазовые траектории и процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$ при отработке малых ($|x_{10}| < d$) и больших ($|x_{10}| > d$) начальных отклонений для разной степени коррекции по скорости (в том числе и для $\alpha = 0$).

24. Реализуйте релейную характеристику с гистерезисом и зоной нечувствительности ($d \neq 0$, $0 < m < 1$).

25. Задайте начальное отклонение $|x_{10}| > d$ и наблюдайте фазовые траектории и процессы $x_2(t)$ и $x_1(t)$ при разной степени коррекции по скорости.

26. По результатам пп. 16 - 25 сделайте выводы о динамике системы управления объектом с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

в случае однозначных и неоднозначных релейных характеристик.

27. В структурной схеме системы управления (рис. 30) реализуйте

$$W_0(s) = \frac{K}{Ts - 1}$$

и идеальное двухпозиционное реле.

28. Задав малое начальное отклонение x_{10} , наблюдайте фазовую траекторию в случае отсутствия коррекции по скорости. Сделайте вывод о работоспособности системы.

29. Введите коррекцию по скорости $\alpha = 0,2$. Последовательно увеличивая начальное отклонение, наблюдайте процесс его отработки в виде фазовых траекторий и осциллограмм $x_2(t)$ и $x_1(t)$. Сделайте вывод о возможных режимах работы системы.

30. Выбрав такое начальное отклонение, которое система при $\alpha = 0,2$ не способна устранить, увеличивайте степень коррекции до тех пор, пока не будет наблюдаться сходящийся процесс. Попробуйте найти и наблюдать на фазовой плоскости границу между двумя качественно отличными режимами работы си-

стемы. Объясните возникающие при этом затруднения.

31. Реализуйте релейную характеристику с зоной нечувствительности ($d \neq 0$, $m = 1$).

32. При наличии коррекции по скорости исследуйте реакцию системы на малое начальное значение скорости $\dot{x}_{20} < 0$ или $\dot{x}_{20} > 0$ (при $x_{10} = 0$).

Проварьируйте величину коррекции и зафиксируйте вид фазовых траекторий и процессов $x_2(t)$ и $x_1(t)$ для случая $|x_{10}| > d$, $\dot{x}_{20} = 0$.

33. Реализуйте релейную характеристику с гистерезисом и зоной нечувствительности ($d \neq 0$, $0 < m < 1$).

34. Варьируя величину коррекции по скорости, наблюдайте вид фазовых траекторий, соответствующих отработке начального отклонения $|x_{10}| > d$. Сравните вид фазовых траекторий, получающихся при сильной коррекции по скорости в случае однозначной и неоднозначной характеристики реле, с зоной нечувствительности.

35. По результатам пп. 27 - 34 сделайте выводы о динамике системы управления объектом с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts - 1)}$$

в случае однозначных и неоднозначных релейных характеристик.

Лабораторная работа № 37

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. Какие цели преследовало создание спектральных методов анализа динамических процессов?

2. В чем особенности расчетной структурной модели для спектрального анализа процессов?

3. Приведите расчетные соотношения общего вида, используемые при разложении функции в ряд Фурье.

4. Какой вид принимает разложение в ряд Фурье функции:

- а) симметричной относительно начала координат;
- б) симметричной относительно оси ординат?

5. Как линейная динамическая система преобразует входной синусоидальный сигнал?

6. Дайте определения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик линейной динамической системы.

7. Как рассчитать амплитуду и фазу синусоиды на выходе линейной динамической системы, если заданы амплитуда и частота входной синусоиды и передаточная функция системы?

8. Как линейная динамическая система преобразует спектральный состав входного сигнала?

9. 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),

$$N(x) = -N(-x) \quad ?$$

- б) осесимметрична (четная),

$$N(x) = N(-x) \quad ?$$

- в) несимметрична, например,

$$N(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ c, & x \geq 0 \end{cases} ?$$

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

11. Как экспериментально проверить теоретические результаты расчета спектров сигналов?

12. В чем смысл гармонической линеаризации нелинейного элемента?

13. Приведите расчетные соотношения для определения коэффициентов гармонической линеаризации.

14. Каков физический смысл коэффициентов гармонической линеаризации?

15. При подготовке к работе проделайте в рабочей тетради упражнения, отмеченные в программе работы звездочкой.

Программа работы

1*. Для структурной схемы фильтра, изображенной на рис.32, определите передаточную функцию

$$W_1(s) = \frac{U_1(s)}{U_{вх}(s)}.$$

Установите зависимость:

а) между резонансной частотой фильтра ω_0 и его параметрами;

б) между относительным коэффициентом затухания ξ и параметрами фильтра.

2*. Докажите, что при малом затухании ($\xi < 0,1$) добротность фильтра Q численно равна его коэффициенту передачи на резонансной частоте.

3*. Определите, как должны быть выбраны коэффициенты K_I

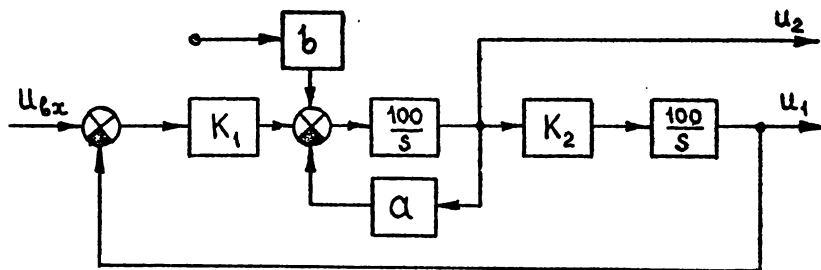


Рис.32

и K_2 , чтобы при настройке фильтра в резонанс сигналы u_1 и u_2 имели одинаковую амплитуду.

4.* Определите передаточную функцию $W_2(s) = \frac{U_2(s)}{U_{bx}(s)}$.

5.* Изобразите логарифмические амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики, соответствующие передаточным функциям $W_1(s)$ и $W_2(s)$.

Какому из выходов фильтра следует отдать предпочтение при измерении спектрального состава периодических сигналов? Почему?

6.* Разработайте методику настройки резонансной частоты и добротности фильтра.

7. Смоделируйте на АБК-6 фильтр по схеме рис.32. Настройте фильтр: получите $f_0 = 90 - 100$ Гц, $Q = 10$. Используя делитель или блок b первого интегратора, получите фильтр с единичным коэффициентом передачи на резонансной частоте.

8.* Разработайте и зарисуйте в рабочей тетради схему для проверки характеристик фильтра по фигурам Лиссажу. Предскажите вид этих фигур в зависимости от частоты при использовании обоих выходов фильтра.

9. Пользуясь разработанной схемой, экспериментально уточните настройки фильтра.

10.* Разложите в ряд Фурье периодические сигналы прямоугольной и треугольной формы, имеющие нулевое среднее значение. Результаты представьте в виде диаграмм, изображающих зависимость амплитуды и фазы гармонической составляющей от номера гармоники.

11. Пользуясь фильтром, исследуйте спектральный состав прямоугольного и треугольного сигналов генератора АВК-6. Результаты измерений используйте для проверки диаграмм, построенных при выполнении аналитических расчетов (см. упр. 10).

12. Убедитесь, что изменение амплитуды сигналов генератора не меняет относительной величины гармоник в спектре.

13. Сопоставьте на экране индикатора изображение прямоугольного сигнала генератора с суммой первой и третьей гармоник его разложения в ряд Фурье.

14.* Для экспериментальных исследований спектральных преобразований входного гармонического сигнала безынерционной нелинейностью разработайте и зарисуйте в рабочей тетради схему, которая позволяла бы одновременно наблюдать на экране индикатора следующие изображения:

- сигнал на входе нелинейности $x(t) = a \sin \omega t$;
- сигнал на выходе нелинейности $y(t) = N[x(t)] = N(a \sin \omega t)$;
- вид нелинейности $y = N(x)$;
- исследуемую гармоническую составляющую на выходе фильтра $y_n(t) = a_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$.

15.* Рассчитайте амплитуды гармонических составляющих a_n и фазовые сдвиги φ_n первых пяти гармоник ($n = 1, 2, \dots, 5$) в зависимости от амплитуды входной синусоиды для нелинейностей, изображенных на рис. 33.

Для скольких и каких нелинейностей имеет смысл искать амплитуды гармоник интегрированием общих соотношений? Как исполь-

зовать полученные результаты для графоаналитического исследования преобразований спектра остальными нелинейностями?

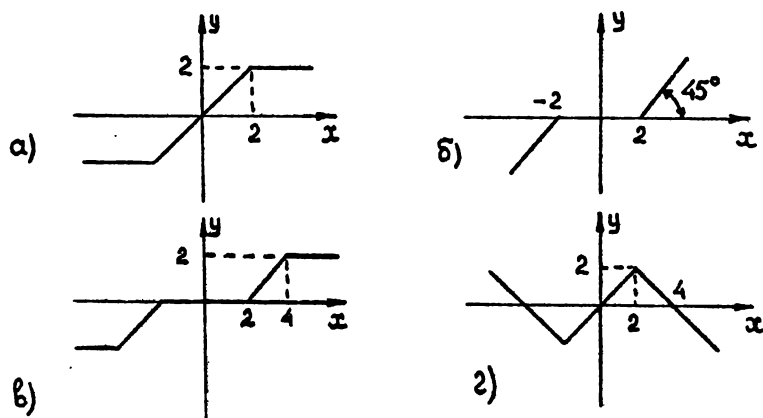


Рис.33

16. Исследуйте экспериментально спектр сигналов на выходе нелинейностей, изображенных на рис.33; результаты измерения амплитуд гармоник a_n и их фазовых сдвигов φ_n ($n = 1, 2, \dots, 5$) изобразите графически в зависимости от амплитуды синусоиды на входе нелинейности.

17. Результаты эксперимента сопоставьте с расчетами, произведенными в п.15.

18. По результатам пп.15 и 16 постройте графики коэффициентов гармонической линеаризации

$$J_n(a) = \frac{a_n}{a}, \quad n = 1, 2, \dots, 5.$$

19*. Проанализируйте теоретически преобразование спектра неоднозначной нелинейностью типа двухпозиционного реле с гистерезисом (рис.34, а).

20*. Прежде чем приступить к экспериментальному исследованию неоднозначных нелинейностей, продумайте и обсудите с пре-

подавателем методику измерений фазового сдвига гармонических составляющих на выходе нелинейности.

21. Экспериментально исследуйте зависимость амплитуды C_n и фазы φ_n первых пяти гармонических составляющих на выходе неоднозначных нелинейностей (рис.34) от амплитуды входной синусоиды. Результаты измерений оформите в виде графиков

$$C_n = C_n(a); \quad \varphi_n = \varphi_n(a); \quad J_n(a) = \frac{C_n(a)}{a}.$$

Для коэффициента передачи нелинейности по первой гармонике постройте годографы

$$-\frac{1}{J(a)}.$$

22.* Несимметричные нелинейности, кроме гармонических составляющих, дают на выходе постоянную составляющую. Разработайте схему для фильтрации постоянной составляющей.

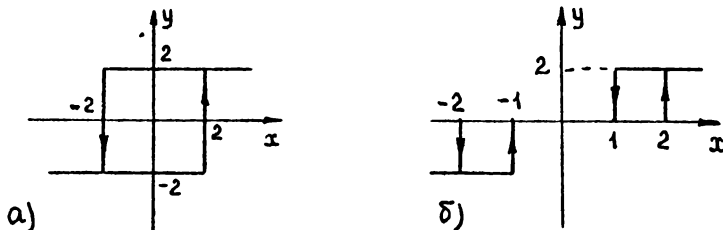


Рис.34

23.* Исследуйте аналитически преобразования гармонического входного сигнала нелинейностями, изображенными на рис.35.

Представляют интерес постоянная составляющая выходного сигнала b_0 , амплитуды b_n и фазовые сдвиги φ_n первых пяти гармоник ($n = 1, 2, \dots, 5$).

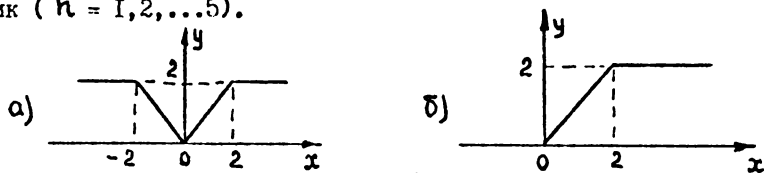


Рис.35

24. Экспериментально исследуйте зависимость спектральных составляющих на выходе указанных нелинейностей от амплитуды входной синусоиды. Постройте графики $b_0(a)$, $b_n(a)$, $n = 1, \dots, 5$ с учетом фазовых сдвигов φ_n , а также график

$$\zeta(a) = \frac{b_1(a)}{a}.$$

Объясните полученные результаты.

Лабораторная работа № 38

Исследование нелинейных систем методом гармонического баланса

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

Вопросы для подготовки к работе

1. Сформулируйте общую постановку задачи анализа нелинейной системы методом гармонического баланса.

2. Укажите сходства и отличия структурных моделей метода гармонической линеаризации и метода гармонического баланса.

3. Какие допущения лежат в основе метода гармонического баланса?

4. Что можно определить с помощью метода гармонического баланса?

5. Что такое автоколебания?

6. Какой вид имеет уравнение, определяющее возможность возникновения автоколебаний (уравнение Гольдфарба)?

7. Как записать уравнение Гольдфарба для системы с положительной обратной связью?

8. Укажите способы решения уравнения Гольдфарба.

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

10. Сформулируйте понятия устойчивости системы и устойчивости автоколебаний.

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

12. Сформулируйте критерий устойчивости автоколебаний.

13. Если уравнение Гольдфарба не имеет решения, будет ли система устойчива?

14. Можно ли применить метод гармонического баланса к системе с двумя нелинейностями?

15. Что такое мягкий и жесткий режимы возбуждения колебаний?

16. Выполните упражнения, отмеченные в программе работы звездочкой.

Программа работы

1.* Структурная схема нелинейной системы приведена на рис. 36. Исследуйте теоретически возможность автоколебаний в этой системе для нелинейностей и передаточных функций, приведенных в табл. Заполните клетки таблицы ответами, указав для однозначных нелинейностей расчетные значения параметров автоколебаний.

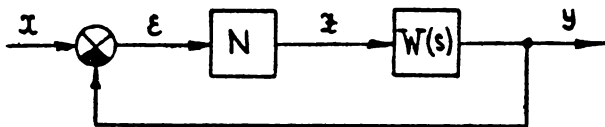


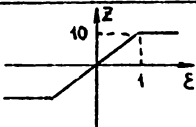
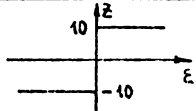
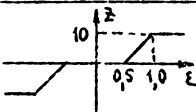
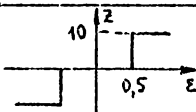
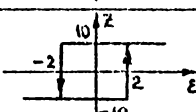
Рис. 36

2.* Разработайте методику экспериментальной проверки тео-

ретических предсказаний путем моделирования системы на АВК-6.

3. Проверьте моделированием теоретические предсказания

п. I по результатам исследования разомкнутой системы.

	$N(\varepsilon)$ $W(s)$	$\frac{1}{Ts+1}$	$\frac{1}{(Ts+1)^2}$	$\frac{1}{(Ts+1)^3}$
1				
2				
3				
4				
5				

4. Изучите форму сигналов на выходе нелинейности, а также на выходе первого, второго и третьего апс. одических звеньев, варьируя частоту входного сигнала. Отметьте, как в осциллограммах сигналов фактически проявляется фильтрация высших гармоник.

5. Зафиксируйте в рабочей тетради осциллограммы для случаев, соответствующих возможности автоколебаний. Измерьте параметры возможных автоколебаний и внесите результат в табл.

6.Замкните обратную связь в нелинейной системе (рис.36). Проверьте Ваши предсказания относительно возможности автоколебаний и их параметров в тех системах, где они существуют.Внесите результаты измерений в табл.

Объясните расхождения между результатами теоретического анализа и результатами, полученными при экспериментальном исследовании разомкнутой и замкнутой систем.

7.Реализация последнего из аperiodических звеньев с использованием сумматора служебного блока АБК-6 позволит получить сигнал, пропорциональный производной от сигнала на выходе линейной части системы.Используйте эту возможность для наблюдения фазовой траектории $\dot{y} = \dot{y}(y)$ исследуемой системы.

8.Варьируя начальные условия или амплитуду входного сигнала, зафиксируйте фазовые траектории, соответствующие устойчивому и неустойчивому предельным циклам.Изучите процессы установления автоколебаний.Зафиксируйте осциллограммы, соответствующие рассмотренным случаям.

9.Соберите модель резонансного контура (см. лабораторную работу № 37), настройте контур, обеспечив $f_0 = 90 - 100$ Гц, $Q = 10 - 20$.

10.Дополните структурную схему контура обратной связью, позволяющей в некотором диапазоне амплитуд скомпенсировать затухание.Какая для этого требуется обратная связь - положительная или отрицательная?

11.Промоделируйте предложенную Вами структуру на АБК-6. Добейтесь, чтобы при переключении АБК-6 из режима "подготовка" (клавиша 3) в режим "непрерывное интегрирование" (клавиша 1) в системе возникали автоколебания.

12. Варьируя форму нелинейности в цепи обратной связи, промоделируйте мягкий и жесткий режим самовозбуждения генератора.

13. По фазовому портрету и временным графикам изучите процессы установления автоколебаний. Зафиксируйте характерные процессы в рабочей тетради.

Литература

1. Теория автоматического управления, в 2-х ч./Под ред. А.А.Воронова. М.:Высшая школа, 1986.
2. Алексаков Г.Н., Гаврилин В.В., Федоров В.А. Персональный аналоговый компьютер АВК-6 (методические рекомендации). М.:МИФИ, 1989.
3. Копылов Б.И. Статические и динамические характеристики линейных систем автоматического регулирования. М.:МИФИ, 1982.
4. Копылов Б.И. Методы анализа нелинейных САР. М.:МИФИ, 1985.
5. Алексаков Г.Н., Копылов Б.И. Структуры, спектры и моделирование в анализе нелинейных систем. Задачи и решения (методические рекомендации по применению АВК в учебном процессе). М.:МИФИ, 1989.

Методические указания к лабораторному практикуму
по курсу "Теория автоматического управления"

Составители: Габриэль Николаевич Алекоаков,
Борис Иванович Копылов

Редактор И.Н.Маркина

Подписано в печать 23.10.91. Формат 60x84 1/16
П.л. 3,0 Уч.изд.л. 3,0 Тираж 500 экз. Изд. № 083-2
Заказ 2183 Бесплатно

Московский инженерно-физический институт. Типография МФИ.
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Бесплатно