

*Виктор Станиславович Шидловский*

## **ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Руководство для организации  
самостоятельной работы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

**В.С. Шидловский**

## **ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Руководство для организации  
самостоятельной работы

---

Изд. лиц. ЛР № 04000 от 12.02.2001. Подписано в печать 03.02.2012.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага белая писчая. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд.л. 1,4. Тираж 50 экз.

---

Томск – 2012

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

УДК 621.311.22  
Ш 564

*Для заметок*

Ш 564 **Шидловский В.С.** Теория автоматического управления:  
Руководство для организации самостоятельной работы. –Томск:  
ТУСУР, 2012. –28с.

Руководство содержит основные сведения к выполнению разделов по дисциплине «Теория автоматического управления» с учетом рейтинговой системы.

Руководство подготовлено на кафедре информационно-измерительной техники ТУСУРа и предназначено для студентов специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств» (в приборостроении).

**Р е ц е н з е н т ы :**

доцент. каф. автоматизации теплоэнергетических процессов ТПУ,  
канд. техн. наук., доцент В.С. Андык;

зав. каф. Электронных средств автоматизации и управления  
ТУСУР, д.т.н., проф. А.Г. Гарганеев;

© В.С. Шидловский, 2012

*Для заметок*

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Программа лекционного курса .....	5
2. Рейтинговая раскладка .....	10
3. Перечень лабораторных работ .....	12
4. Перечень индивидуальных заданий.....	13
5. Перечень курсовых работ .....	15
6. Контрольные вопросы .....	16
7. Электронные источники .....	22
8. Список рекомендуемой литературы .....	24

## ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления (ТАУ) является в настоящее время одной из важнейших технических наук общего применения. Она дает основную теоретическую базу для исследования и проектирования любых автоматических и автоматизированных систем во всех областях техники и народного хозяйства.

Теория автоматического управления, хотя и прошла яркие пути своего развития, но в настоящее время продолжает интенсивно развиваться в сторону теории интеллектуальных систем управления.

Основы «современной» ТАУ идеологически заложены в «классической» ТАУ и составляют с ней неразрывную связь.

Руководство предназначено к организации самостоятельной работы по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств» (в приборостроении).

12. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. - М.: Энергия, 1972. -376с.
13. Шидловский С.В. Теория автоматического управления: учебное пособие. -Томск: Изд-во НТЛ, 2003. - 40с.
14. Круг Е.К., Минина О.М. Электрические регуляторы промышленной автоматики. –М.: Госэнергоиздат, 1962. –336с.

## 8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о р и к о в А. М. Основы теории управления. -Томск: "Изд-во НТЛ", 2002. -392с.
2. Е р о ф е е в А. А. Теория автоматического управления. –СПб.: Политехника, 2002. –302с.
3. С б о р н и к задач по теории автоматического регулирования и управления /Под ред. В.А. Бесекерского. –М.: Наука, 1972. –588с.
4. Ц ы п к и н Я. З. Основы теории автоматических систем. –М.: Наука, 1977. –560с.
5. Б е с е к е р с к и й В. А., П о п о в Е. П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1972. - 768с.
6. Т е х н и ч е с к а я кибернетика. Теория автоматического регулирования /Под ред. В.В. Солодовникова. –М.: Машиностроение, 1967. К1-3.
7. З а й ц е в А. П. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. –Томск: Изд-во ТПУ, 2000. –152с.
8. А н д ы к В. С. Теория автоматического управления: Учебное пособие к практическим занятиям. -Томск: Изд. ТПУ, 2000. -108с.
9. Б о я р и н о в А. И., К а ф а р о в В. В. Методы оптимизации в химической технологии. -М.: Химия, 1975. -576с.
10. Ш у л ь ц е К. П., Р е б е р г К. Ю. Инженерный анализ адаптивных систем: Пер. с нем. –М.: Мир, 1992. – 280с.
11. М е т о д ы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник /Под ред. Н.Д. Егупова. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. –744с.

## 1. ПРОГРАММА ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

### Пятый семестр – Теория автоматического управления. Часть I

#### 1.1. Основные понятия теории автоматического управления

Автоматизация, ее цели, технико-экономическая эффективность и значение ее для развития современного промышленного производства. Связь теории автоматического управления с другими дисциплинами специальности. Исторический путь развития теории автоматического управления. Понятие управления, цели управления, критерии качества управления, объекта управления, автоматической системы управления. Автоматическое регулирование. Классификация систем управления (СУ), элементы СУ. Поведение объектов и СУ; информация и принципы управления; примеры СУ техническими, экономическими и организационными объектами. Задачи теории управления.

#### 1.2. Математический аппарат исследования систем автоматического управления

Понятие математической модели объекта управления. Линейные непрерывные модели и характеристики СУ. Модели вход-выход: дифференциальные уравнения, передаточные функции, временные и частотные характеристики. Модели вход-состояние-выход. Преобразования форм представления моделей. Уравнения динамики и статики. Линеаризация. Основные свойства преобразования Лапласа. Элементарные звенья и их характеристики. Структурные схемы, уравнения и частотные характеристики стационарных линейных систем.

Многомерные стационарные линейные системы.  
Нестационарные линейные системы.

### 1.3. Устойчивость линейных систем автоматического управления

Анализ основных свойств линейных СУ: устойчивости, инвариантности, чувствительности, управляемости и наблюдаемости. Общая постановка задач устойчивости по А.М. Ляпунову. Теоремы А.М. Ляпунова об устойчивости движения по первому приближению. Условия устойчивости систем автоматического управления. Алгебраические критерии устойчивости. Частотные критерии устойчивости. *D*-разбиение. Анализ устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам. Устойчивость систем с запаздыванием и систем с иррациональными звеньями.

### 1.4. Методы оценки качества регулирования линейных систем

Качество переходных процессов в линейных СУ. Оценка качества переходного процесса при воздействии в виде ступенчатой функции. Оценка качества регулирования при гармонических воздействиях. Оценка качества регулирования в установившихся режимах (коэффициенты ошибок). Корневые методы оценки качества переходных процессов. Частотные методы оценки качества регулирования.

### 1.5. Параметрический синтез промышленных систем управления

Задачи и методы синтеза линейных СУ. Динамические свойства промышленных объектов регулирования. Типовые линейные законы регулирования. Устойчивость систем регулирования с типовыми регуляторами. О постановке и

4. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MatLAB 5.X: Том 1.
5. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MatLAB 5.X: Том 2.
6. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MatLAB.

Рейтинг план и руководство для организации самостоятельной работы

WS7	ftp://TV207
c:\!\PIП\ТАУ\	Рейтинг\Док\ТАУ\

Положение о рейтинге

WS7	ftp://TV207
c:\!\Положение о рейт\	НормДок\Рейтинг\

## 7. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Ниже приведенные материалы можно взять из корпоративной сети кафедры информационно-измерительной техники с любой студенческой машины. При обращении к ресурсу «WS7» имя пользователя (логин): «student», поле «пароль» оставить пустым; при обращении к ресурсу ftp://TV207 – имя пользователя и пароль: «student» .

Методические разработки по индивидуальным заданиям

WS7	ftp://TV207
c:\!\ТАУ1\	Практики\Тау\ЧастьI\ ;
c:\!\ТАУ2\	Практики\Тау\ЧастьII\ ;

Методические разработки по лабораторным работам

WS7	ftp://TV207
c:\!\ЛабПрак\ТАУ1\	ЛабПрак\Тау\ЧастьI\ ;
c:\!\ ЛабПрак \ТАУ2\	ЛабПрак\Тау\ЧастьII\ ;

Дополнительные источники по системе MatLab

WS7	ftp://TV207
c:\!\E-Book\	E-Book\

1. Егоренков Д.Л., Фрадков А.Л., Харламов В.Ю. Основы математического моделирования. Построение и анализ моделей с примерами на языке MatLAB.
2. Мартынов Н.Н., Иванов А.П. MATLAB 5.X. Вычисления, визуализация, программирование.
3. Гулятьев А.К. MatLAB 5.2 имитационное моделирование в среде Windows.

решении задач параметрического синтеза. Синтез простейших СУ (синтез СУ 1-го порядка, синтез СУ 2-го порядка). Синтез СУ с применением интегральных оценок качества регулирования (выбор интегральной оценки, вычисление интегральных оценок, определение параметров СУ, минимизирующих интегральные оценки). Синтез СУ с помощью корневых оценок качества регулирования. Частотные методы синтеза СУ. Параметрический синтез СУ при заданном показателе колебательности. Синтез СУ при показателе колебательности  $M = 1$ . Синтез СУ с запаздыванием.

### Шестой семестр – Теория автоматического управления. Часть II

#### 1.5. Нелинейные системы автоматического управления

Нелинейные модели СУ. Анализ равновесных режимов. Методы линеаризации нелинейных моделей. Анализ поведения СУ на фазовой плоскости. Устойчивость положений равновесия: первый и второй методы Ляпунова, частотный метод исследования абсолютной устойчивости; исследование периодических режимов методом гармонического баланса. Системы с переменной структурой. Метод приспособывания «граничных значений». Приближенное исследование автоколебаний. Метод эквивалентной линеаризации. Устойчивость в малом, большом и целом. Абсолютная устойчивость. Критерий В.М. Попова.

## **1.6. Линейные импульсные автоматические системы управления**

Линейные дискретные модели СУ: основные понятия об импульсных СУ, классификация дискретных СУ. Анализ и синтез дискретных СУ. Динамические свойства и уравнения импульсных систем. Анализ устойчивости замкнутых импульсных систем. Исследование импульсных систем частотными методами. Коррекция импульсных систем.

## **1.7. Случайные процессы в автоматических системах управления**

Линейные стохастические модели СУ: модели и характеристики случайных сигналов. Прохождение случайных сигналов через линейные звенья. Анализ и синтез линейных стохастических систем при стационарных случайных воздействиях. Преобразование случайных воздействий линейной стохастической системой. Синтез оптимальных динамических систем, минимизирующих среднеквадратическую ошибку. Предельная динамическая точность регулирования. Системы высокой предельной динамической точности регулирования. Системы регулирования с добавочными информационными каналами. Способы повышения предельной динамической точности автоматических систем регулирования. Условия высокой предельной динамической точности систем с добавочными информационными каналами. Каскадные системы регулирования. Системы с компенсацией возмущений.

84. По каким критериям можно провести анализ устойчивости САУ, содержащих звено чистого запаздывания?
85. В чем сущность интегральных критериев качества переходного процесса?
86. Какая функция называется решетчатой? Поясните понятие суммы и разности решетчатых функций.
87. Что называется дискретным преобразованием Лапласа и Z-преобразованием? Укажите их основные свойства.
88. Укажите основные правила преобразования структурных схем импульсных САУ.
89. Поясните принцип определения устойчивости импульсных САУ.

68. Запишите условие возникновения автоколебаний.
69. Объясните уравнение гармонического баланса используя критерий устойчивости Найквиста.
70. Какое влияние автоколебания вносят в динамические системы (положительные или отрицательные) и почему.
71. Перечислите основные этапы расчета нелинейных систем методом гармонического баланса.
72. Как экспериментально определить является система автоматического регулирования линейной или нет?
73. Дайте определение нелинейного управления.
74. Какие системы автоматического регулирования называются импульсными?
75. Из чего состоит импульсный элемент?
76. Как называется сигнал после дельта-импульсного модулятора?
77. Нарисуйте структурную схему фиксатора нулевого порядка, состоящего из простейших динамических звеньев. Покажите характер переходных процессов во всех узловых точках полученной схемы при подачи на ее вход дельта функции.
78. Дайте понятие фазовой траектории.
79. Дайте понятие фазового портрета.
80. Как по фазовой траектории найти степень затухания переходного процесса?
81. В каких случаях на фазовой плоскости наносят линии переключения?
82. Что называется типовым динамическим звеном? Укажите передаточные функции и логарифмические частотные характеристики типовых динамических звеньев.
83. Назовите основные правила преобразования структурных схем.

Системы косвенного регулирования. Многосвязные системы управления.

### 1.8. Оптимальные системы управления

Задача оптимального управления. Критерии оптимальности. Методы теории оптимального управления: классическое вариационное исчисление. Принцип максимума. Динамическое программирование. Системы управления максимальные по быстродействию, оптимальные по расходу ресурсов и расходу энергии. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов. Робастные системы и адаптивное управление.

## 2. РЕЙТИНГОВАЯ РАСКЛАДКА

«Теория автоматического управления» Часть I – зачет  
(пятый семестр)

Вид занятия	Рейтинг
Лекционные контрольные точки	20
Индивидуальные задания	45
Лабораторные работы	35
Творческие задания	20

*Максимальный рейтинг – 120*

«Теория автоматического управления» Часть II – экзамен  
(шестой семестр)

Вид занятия	Рейтинг
Лекционные контрольные точки	20
Индивидуальные задания	35
Лабораторные работы	45
Творческие задания	20

*Максимальный рейтинг – 120*

Творческое задание могут получить те, кто набирает **80** баллов до зачетной недели. Его можно выполнять вплоть до экзамена.

Если студент вовремя не предоставил отчет по индивидуальным заданиям или лабораторным практикумам по неуважительной причине, его рейтинговый балл по этому элементу контроля равен 0. Это не освобождает студента от обязанности отчитываться за данный элемент контроля, но при этом его отчетность не оценивается и рейтинг не увеличивается.

Студент допускается к сдаче экзамена (зачета), если он полностью выполнил учебный план (выполнены практические и лабораторные работы, курсовая работа,

51. Объясните почему ПИ-регулятор избавлен от недостатков присущих П- и И-регуляторам.
52. Дайте определение жесткой обратной связи.
53. Дайте определение гибкой обратной связи.
54. Какие способы включения корректирующих устройств наиболее широко распространены?
55. Какие воздействия называться случайными?
56. Дайте определение математического ожидания случайного процесса?
57. Дайте определение дисперсии случайного процесса?
58. Дайте определение корреляционной функции случайного процесса?
59. Дайте определение спектра мощности случайного процесса?
60. Как найти спектр мощности случайного процесса на выходе динамической системы, при известной передаточной функции системы и спектра мощности случайного процесса на входе системы?
61. Дайте определение оптимального оператора системы регулирования.
62. Что такое компенсирующее устройство?
63. Как определить по месту приложения на структурной схеме тип возмущающего воздействия (высокочастотное или низкочастотное) ?
64. Объясните работу системы с дополнительными информационными каналами для компенсаций возмущений.
65. Какая система автоматического регулирования называется нелинейной?
66. Дайте определение автоколебаний.
67. Что такое статическая характеристика динамического звена.

35. Что характеризует время регулирования?
36. Что показывает переходный процесс по каналу задающего воздействия?
37. Что показывает переходный процесс по каналу возмущения идущего со стороны регулирующего органа?
38. Сформулируйте требования предъявляемые к качеству процесса управления.
39. Назовите две основные задачи системы автоматического регулирования.
40. Запишите передаточную функцию ПИД-регулятора и назовите его параметры настройки.
41. Из каких звеньев состоит ПИД-регулятор и как они соединены?
42. Назовите два метода и запишите его основные формулы используемые при расчете ПИД-регулятора.
43. Как определить степень затухания переходного процесса по АЧХ замкнутой системы?
44. Дайте определение области параметров настройки регулятора.
45. Как влияет введение дифференциала в закон управления на динамику системы?
46. Каким образом можно избавиться от статической ошибки системы автоматического регулирования?
47. Как влияет введение интеграла в закон управления на динамику системы?
48. Какие системы автоматического регулирования называются астатическими? Сформулируйте понятие астатизма.
49. Запишите чему равна (вывод формулы) статическая ошибка при использовании в системе П-регулятора.
50. Запишите чему равна (вывод формулы) статическая ошибка при использовании в системе И-регулятора и объясните почему в этом случае происходит снижение скорости регулирования.

пропущенные занятия отработаны) и если его текущий рейтинг более 59 баллов.

«Теория автоматического управления» – курсовая работа  
(шестой семестр)

Вид занятия	Рейтинг
Собеседование 1	10
Собеседование 2	10
Содержание пояснительной записки	40
Оформление пояснительной записки	10
Доклад	10
Защита	20
Творческие моменты	20

*Максимальный рейтинг – 120*

### 3. ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

#### Пятый семестр (ТАУ ч.I)

- 3.1. Опытная настройка АСР с двумя параметрами (10 баллов).
- 3.2. Экспериментальное определение частотных характеристик систем (8 баллов).
- 3.3. Исследование временных характеристик систем (8 баллов).
- 3.4. Исследование устойчивости систем управления во временной области и в плоскости корней характеристического уравнения (9 баллов).

#### Шестой семестр (ТАУ ч.II)

- 3.5. Исследование устойчивости систем управления с помощью частотных критериев Михайлова и Найквиста (6 баллов).
- 3.6. Определение переходных процессов в АСР по ее вещественным частотным характеристикам. Метод трапеций (7 баллов).
- 3.7. Переходные процессы в системах автоматического управления (7 баллов).
- 3.8. Настройка типовых регуляторов (П, И, ПИ, ПИД) методом расширенных частотных характеристик (9 баллов).
- 3.9. Исследование свойств нелинейных АСР (9 баллов).
- 3.10. Фазовые траектории и портреты нелинейных систем (7 баллов).

Отчет предоставляется и защищается на следующем занятии с получением рейтинговой оценки.

19. Сформулируйте критерий устойчивости Гурвица.
20. Сформулируйте критерий устойчивости Михайлова.
21. Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста.
22. По какой системе (разомкнутой или замкнутой) критерий Михайлова позволяет судить о устойчивости замкнутой системы?
23. По какой системе (разомкнутой или замкнутой) критерий Найквиста позволяет судить о устойчивости замкнутой системы, какой тип обратной связи используется при замыкании системы?
24. Покажите и объясните за что отвечает свободный член характеристического уравнения при построение годографа Михайлова.
25. Для чего используется  $D$ -разбиение?
26. Как выполняется штриховка границ устойчивости  $D$ -разбиения в плоскости одного параметра?
27. Как выполняется штриховка границ устойчивости  $D$ -разбиения в плоскости двух параметров?
28. Для какой цели при построении переходной характеристике по ВЧХ последнюю разбивают на трапеции?
29. Дайте определение и перечислите прямые и косвенные показатели качества переходного процесса.
30. Назовите три метода нахождения переходных характеристик и их основную идею, запишите необходимые формулы.
31. Назовите две основные задачи системы автоматического регулирования.
32. Что характеризует степень затухания?
33. Что характеризует перерегулирование?
34. Что характеризует динамический коэффициент регулирования?

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что означает в ТАУ оператор  $p$ ?
2. Для какой цели при описании динамических систем вводят оператор  $p$ ?
3. Запишите передаточную функцию апериодического звена и его дифференциальное уравнение, установите связь между этими записями.
4. Дайте определение переходного процесса динамической системы.
5. Почему при исследовании динамических характеристик системы на ее вход подается единичная ступенчатая функция?
6. Запишите связь между переходным процессом и весовой характеристикой.
7. Дайте определение характеристического уравнения динамической системы.
8. Что такое идентификация переходного процесса объекта?
9. Дайте определение переходного процесса и кривой разгона.
10. Перечислите этапы идентификации  $S$ -образной кривой.
11. Дайте определение передаточной функции.
12. Для перехода в частотную область чем в передаточной функции заменяется оператор  $p$ ?
13. Запишите формулу нахождения АЧХ из передаточной функции через реальную и мнимую часть.
14. Запишите формулу нахождения ФЧХ из передаточной функции через реальную и мнимую часть.
15. Как на АФЧХ определить амплитуду, фазу и частоту?
16. Как экспериментально снять АЧХ объекта управления?
17. Как экспериментально снять ФЧХ объекта управления?
18. Как экспериментально снять АФЧХ объекта управления?

## 4. ПЕРЕЧЕНЬ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

### Пятый семестр (ТАУ ч. I)

- 4.1. Дифференциальные уравнения элементов систем автоматического управления (5 баллов).
- 4.2. Временные характеристики систем (5 баллов).
- 4.3. Простейшие методы идентификации систем по их переходным характеристикам (5 баллов).
- 4.4. Передаточные функции и частотные характеристики звеньев и систем (6 баллов).
- 4.5. Исследование устойчивости систем с помощью критериев Рауса, Гурвица, Льенара-Шипара (5 баллов).
- 4.6. Исследование устойчивости систем с помощью критериев Михайлова и Найквиста (5 баллов).
- 4.7. Построение областей устойчивости.  $D$ -разбиение (8 баллов).
- 4.8. Построение переходных процессов в линейных системах автоматического управления. Метод трапеций. Прямые оценки качества регулирования (6 баллов).

### Шестой семестр (ТАУ ч. II)

- 4.9. Параметрический синтез линейных систем регулирования корневым методом РАФЧХ (7 баллов).
- 4.10. Параметрический синтез линейных систем регулирования методом В.Я. Ротача (7 баллов).
- 4.11. Автоматические системы управления при случайных воздействиях (6 баллов).
- 4.12. Системы с дополнительными информационными каналами (5 баллов).

4.13. Нелинейные системы. Гармоническая линеаризация нелинейных элементов. Метод гармонического баланса (5 баллов).

4.14. Импульсные системы. Переходные, передаточные функции и частотные характеристики импульсных систем (5 баллов).

Работы выполняются индивидуально в соответствии с выданным преподавателем на занятии вариантом. Отчет предоставляется и защищается на следующем занятии с получением рейтинговой оценки.

## 5. ПЕРЕЧЕНЬ КУРСОВЫХ РАБОТ

Тема: «Расчет одноконтурной системы автоматического регулирования»

*Содержание работы*

5.1. Обзор и анализ методов расчета параметров настройки регуляторов с типовыми законами регулирования.

5.2. Расчет и построение границы заданного запаса устойчивости АСР.

5.3. Определение оптимальных параметров настройки регулятора.

5.4. Расчет, построение и оценка качества переходного процесса в замкнутой АСР при возмущении идущем по каналу регулирующего воздействия.