

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

В.И. Сивцов, Г.А. Шахназаров

ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Под редакцией К.А. Пупкова

*Рекомендовано редсоветом МГТУ им. Н.Э. Баумана
в качестве учебно-методического пособия
по курсу «Основы теории управления»*

М о с к в а
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2 0 0 6

УДК 62-50(076.5)
ББК 32.965
С34

Рецензенты: *В.И. Кузовлев, Е.А. Руденко*

Сивцов В.И., Шахназаров Г.А.

С34 Практикум по основам теории управления: Учебно-методическое пособие / Под ред. К.А. Пупкова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 120 с.

ISBN 5-7038-2849-X

В пособии в компактной форме изложены разделы классической теории управления, составляющие методологическую основу решения типовых задач динамического проектирования и исследования стационарных линейных, нелинейных и цифровых автоматических систем. Теоретический материал сопровождается примерами, иллюстрирующими различные аспекты его применения.

Для использования студентами, аспирантами и преподавателями в качестве методического материала по дисциплинам «Основы теории управления», «Управление в технических системах», а также ряду других дисциплин.

Ил. 34. Прил. 4. Библиогр. 12 назв.

УДК 62-50(076.5)
ББК 32.965

**Владислав Иванович Сивцов
Григорий Александрович Шахназаров**

Практикум по основам теории управления

Учебно-методическое пособие

Редактор *С.А. Серебрякова*
Корректор *Р.В. Царева*
Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Подписано в печать 25.04.2006. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печ. л. 7,5. Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 6,75. Тираж 200 экз.
Изд. № 23. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

ISBN 5-7038-2849-X

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006

Предисловие

В организации учебного процесса наряду с лекциями и лабораторными работами важная роль отводится практическим занятиям. Но если лекционные курсы с достаточной полнотой отражены в обширной учебной литературе, то для практических занятий каждый преподаватель вынужден готовить методические материалы самостоятельно, поскольку соответствующей учебно-методической литературы явно недостаточно.

Более того, хорошие примеры для семинаров, как правило, рождаются в результате многолетней работы с курсом. В этом смысле практические занятия не менее сложны при подготовке, чем лекции, и требуют пристального внимания как необходимый элемент учебного процесса.

В ходе практических занятий по дисциплине «Основы теории управления» должны формироваться устойчивые навыки решения типовых задач, реализующих схему деятельности инженера-управленца, а именно:

- умение сформулировать постановку задачи проектирования системы управления техническим объектом;
- умение формировать математические модели систем управления в зависимости от профиля подготовки специалиста;
- умение решать задачи анализа различных способов описания динамики объектов при детерминированных и случайных воздействиях;
- умение синтезировать регуляторы в зависимости от имеющихся ограничений и доступной информации;
- умение реализовать регуляторы на микропроцессорных устройствах.

Все этапы деятельности важны и должны быть детально освоены при изучении курса.

Необходимым условием при отборе примеров для практических занятий является возможность выполнить все этапы решения задач без использования вычислительной техники. Более того, авторы стремились подбирать задачи, аналитические решения которых являются функцией конструктивных параметров, что позволяет назначать эти параметры при проектировании и иллюстрировать их влияние на динамические свойства систем управления.

Опыт, полученный при решении простых модельных задач, может быть с успехом использован в лабораторном практикуме для исследования сложных систем с применением современных средств машинного проектирования.

Что касается ориентации на ту или иную конкретную специальность, то авторы придерживаются мнения, что теория управления является инвариантной по отношению к объекту управления, поскольку имеет дело с их математическими моделями, и в этом смысле выбор физических объектов, иллюстрирующих задачи управления, не является принципиальным. Вместе с тем умение получать модели технических объектов относится к числу необходимых навыков. Преподаватель, ведущий занятия по изучаемой дисциплине, всегда может пополнить перечень рассматриваемых объектов управления примерами технических объектов, формальное описание которых не отличается от анализируемых в настоящем пособии.

Чтобы с пособием можно было работать, не привлекая дополнительной литературы, каждому разделу предпослан минимальный теоретический материал справочного характера. Учитывая небольшой объем настоящего издания, авторы сочли целесообразным не включать в текст дополнительные задачи, которые в случае необходимости можно найти, например, в учебниках [1—3] и в известном задачнике [4]. В настоящем пособии отражен опыт работы авторов с курсами «Управление в технических системах», «Основы теории управления», «Теория автоматического управления». Надеемся, что пособие будет полезно студентам, изучающим эти и близкие по содержанию курсы, и преподавателям названных дисциплин.

1. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

При исследовании и проектировании систем управления, как правило, пользуются моделями этих систем, представленными в виде системы дифференциальных уравнений.

При записи уравнений систем, составленных из различных элементов, всю систему разбивают на звенья. Под звеном понимают такую часть системы, для которой сохраняется направленное движение сигналов и отсутствует непосредственное влияние выходных сигналов на входные. Для каждого из звеньев, пользуясь уравнениями физики, составляют дифференциальные уравнения и дополняют их алгебраическими уравнениями связей между звеньями с учетом смысла регулирования.

Пример 1.1. Запишем уравнения «вход—выход» для RLC-цепочки (рис. 1.1) с выходами соответственно на элементы R, L, C.

Для упрощения записи воспользуемся операторной формой записи ($p = d/dt$). В соответствии с законом Кирхгофа запишем

Рис. 1.1. RLC-цепь

$$IR + LpI + \frac{1}{Cp} I = U_{\text{вх}};$$

$$U_R = IR; U_L = LpI; U_C = \frac{1}{Cp} I.$$

Разрешая последние выражения относительно выходных переменных, найдем

$$U_R = \frac{CRp}{LCp^2 + RCp + 1} U_{\text{вх}}; U_L = \frac{LCp^2}{LCp^2 + RCp + 1} U_{\text{вх}};$$

$$U_C = \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1} U_{\text{вх}},$$

или в обычной форме записи дифференциальных уравнений:

$$LC \frac{d^2 U_R}{dt^2} + RC \frac{dU_R}{dt} + U_R = RC \frac{dU_{BX}}{dt};$$

$$LC \frac{d^2 U_L}{dt^2} + RC \frac{dU_L}{dt} + U_L = LC \frac{d^2 U_{BX}}{dt^2};$$

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_{BX}.$$

Обратим внимание на то, что левая часть дифференциальных выражений, определяющая динамику рассматриваемой системы, у всех уравнений одна и та же, тогда как правая часть зависит от выбранных выходных координат.

Пример 1.2. Составим уравнения движения двигателя постоянного тока (рис. 1.2).

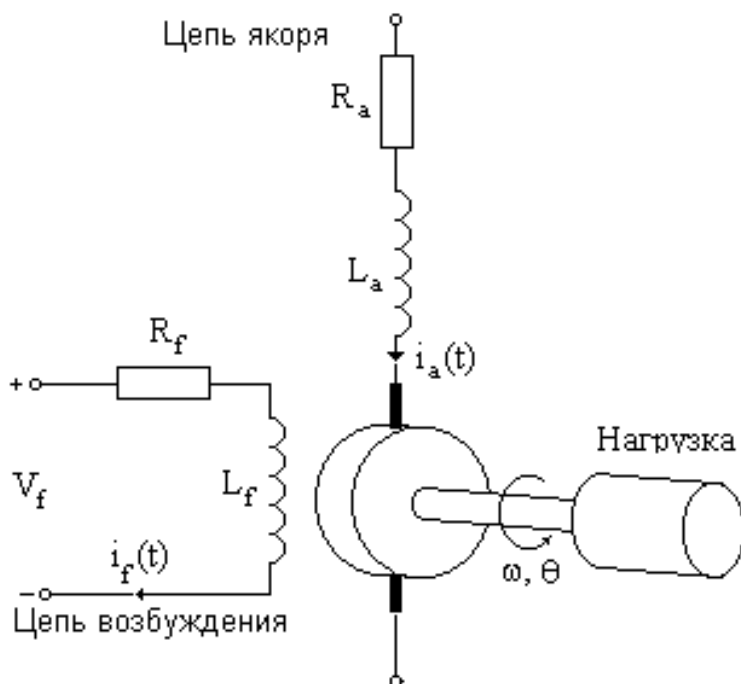


Рис. 1.2. Принципиальная схема двигателя постоянного тока

Будем пренебрегать гистерезисом и падением напряжения на щетках. Обмотка возбуждения создает магнитный поток, пропорциональный току i_f в обмотке:

$$\Phi = K_f i_f.$$

Момент, развиваемый двигателем, зависит как от тока в якорной цепи i_a , так и от тока в обмотке возбуждения i_f :

$$M = K_i \Phi i_a = K_f K_i i_f i_a.$$

Если двигатель управляется по цепи возбуждения, то момент двигателя будет пропорционален току в обмотке возбуждения:

$$M = K_f K_i i_f i_a = K_m i_f.$$

В последних выражениях K_f , K_i , K_m — постоянные коэффициенты.

Ток возбуждения определяется в соответствии с законом Кирхгофа:

$$(R_f + L_f p)i_f = U_f$$

(R_f и L_f — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения, $p = d/dt$ — дифференциальный оператор), а уравнение движения ротора двигателя имеет вид

$$(Jp^2 + Bp)\varphi = M - M_b,$$

где J — момент инерции ротора; B — коэффициент вязкого трения; φ — угол поворота ротора; M_b — возмущающий момент.

Если двигатель управляется по якорной цепи, то при постоянном токе возбуждения момент, развиваемый двигателем, будет пропорционален току в якорной цепи:

$$M = K_f K_i i_f i_a = K_m i_a.$$

Ток в якорной цепи определяется в соответствии с законом Кирхгофа:

$$(R_a + L_a p)i_a + K_b \omega = U_a$$

(R_a и L_a — активное сопротивление и индуктивность якорной цепи).

В последнем уравнении учтена составляющая, пропорциональная угловой скорости с коэффициентом K_b (противоЭДС). Заме-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Составление математических моделей систем управления	5
2. Математические модели в пространстве «вход—выход»	10
3. Описание систем в пространстве состояний	16
4. Управляемость и наблюдаемость динамических систем	31
5. Анализ устойчивости линейных динамических систем	34
6. Анализ качества. Вычисление установившихся ошибок в системах автоматического регулирования. Коэффициенты ошибок.....	43
7. Синтез корректирующих звеньев систем регулирования	48
8. Модальное управление и наблюдающие устройства. Понятие об оптимальных системах	53
9. Оценка случайных ошибок в динамических системах. Выбор оптимальных параметров систем.....	64
10. Синтез дискретных регуляторов.....	67
11. Анализ нелинейных систем на фазовой плоскости.....	84
12. Исследование нелинейных систем методом гармонического баланса	88
Заключение	92
Приложение 1. Эквивалентные преобразования структурных схем математических моделей линейных динамических систем	94
Приложение 2. Логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики типовых звеньев систем автоматического регулирования	96
Приложение 3. Коэффициенты гармонической линеаризации типовых нелинейных статических характеристик	103
Приложение 4. Домашнее задание по дисциплине «Основы теории управления».....	104
Список рекомендуемой литературы.....	119