

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

**Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем
Часть 2. Оптимизация контура регулирования**

Издание второе,
переработанное и дополненное

*Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 140604 – «Электропривод и автоматика
промышленных установок и технологических комплексов» направления
подготовки 140600 – «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»*

Издательство
Томского политехнического университета
Томск 2007

УДК 62-83-52

УЗ1

Удут Л.С.

УЗ1 Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 156 с.

В учебном пособии изложены необходимые сведения из основ теории и техники регулирования линейных систем. Рассмотрены типы звеньев и их комбинации в контуре регулирования, принципы построения регуляторов на операционных усилителях, вопросы компенсации инерционностей в контуре и оптимизации контуров систем подчиненного регулирования. Пособие дополняется комплектом из трех методических указаний для проведения лабораторных и практических занятий с целью более глубокого изучения динамических характеристик звеньев и регуляторов и методов оптимизации контуров регулирования.

Предназначено для студентов направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

УДК 62-83-52

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор
Томского университета систем управления и радиоэлектроники
В.А. Бейнарович

Кандидат технических наук, доцент
Северской государственной технологической академии
С.Н. Кладиев

© Томский политехнический университет, 2007

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2007

Список литературы к подразделу 1.1

1. Д. Сю, А. Мейер. Современная теория автоматического управления и ее применение: пер. с англ. / под ред. Ю.И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1972. – 544 с.
2. Иванов В.Н. и др. Математические основы теории автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Высшая школа, 1971. – 808 с. (гл. 5,6,12,15).
3. Бабаков Н.А., Воронов А.А и др. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с. (гл. 10–13).
5. Топчиев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с. (гл. 1 и 4).
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1978. – 736 с. (гл. 11).
7. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с. (гл. 2–6).

Список литературы к подразделу 1.2

1. Бабаков Н.А., Воронов А.А и др. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / под редакцией А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с. (гл. 2, разделы 2, 3, 6).
2. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с. (гл. 2, разделы 2.4 – 2.6, 5.3).
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1978. – 736 с. (гл. 4).
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с. (гл. 10, Приложение 2).
5. Справочник по автоматизированному электроприводу/ под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с. (раздел 1, §1.3, §1.4).

6. Мальцева О.П., Кояин Н.В., Удут Л.С. Исследование временных и частотных характеристик типовых динамических звеньев линейных САУ. Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу ТАУ. – Томск: ТПУ, 1999. – 47 с.

Список литературы к подразделу 1.3

1. Бабаков Н.А., Воронов А.А. и др. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с. (гл. 2, § 2–7).

2. Иванов В.Н. и др. Математические основы теории автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / под редакцией Б.К. Чемоданова. – М.: Высшая школа, 1971. – 808 с. (гл. 5, § 16, п. 2).

3. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с. (гл. 3).

Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1970. – 576 с. (§ 1.2).

Список литературы к подразделу 1.4

1. Бабаков Н.А., Воронов А.А. и др. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / под редакцией А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с. (гл. 3, 4).

2. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с. (гл. 4, 7).

3. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с. (гл. 12).

4. Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с. (гл. 5).

5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1978. – 736 с. (гл. 8, §8.7 и 8.8; гл. 12, §12.6).

6. Иванов В.Н. и др. Математические основы теории автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / под редакцией Б.К. Чемоданова. – М.: Высшая школа, 1971. – 808 с. (гл. 5, §16, п. 2).

7. Шипилло В.П. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с. (гл. 7).
8. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1970. – 576 с. (гл. 1, 2, 8).
9. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 304 с. (гл. 5).
10. Дорф Р. Современные системы управления / Р.К. Дорф, Р.Х. Бишоп: пер. с англ. – М.: Лаб. базовых знаний, 2004. – 831 с.

Список литературы к подразделу 1.5

1. Аналоговые интегральные микросхемы: справочник / Б.П. Кудряшов и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 160 с.
2. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода: учебник. – М.: Энергоатомиздат. – 224 с. (гл. 5).
3. Фрер Ф., Орттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 192 с. (гл. 3 и 4).
4. Фрер Ф., Орттенбургер Ф. Основные звенья регулируемого привода постоянного тока: пер. с нем. – М.: Энергия, 1977. – 184 с. (табл. 1).
5. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с. (гл. 5).
6. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы управления электроприводом в металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 192 с. (гл. 3).
7. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с. (гл. 6).
8. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / под ред. В.И. Круповича и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с. (§§ 1–40, 1–44, 1–45, 1–56).
9. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / под ред. М.Г. Зименкова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 480 с. (§ 8).
10. Справочник по наладке электроустановок / под ред. А.С. Дорофеюка и др. – М.: Энергия, 1977. – 560 с. (§§ 8–11).
11. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных установок / под ред. Я.М. Большама и др. – М.: Энергия, 1974. – 728 с. (§§ 2–39 и 50).

12. Комплектные тиристорные электроприводы: справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец и др.; под ред. В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с. (раздел 7).

13. Системы подчиненного регулирования переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

14. Сапожников А.И., Удут Д.Л. Исследование аналоговых регуляторов современных систем управления регулируемых электроприводов. Методические указания. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 47 с.

Список литературы к разделу 2

1. Фрер Ф., Ортгенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 192 с. (гл. 5).

2. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы / под ред. Ю.А. Борцова; пер. с нем. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. – 464 с. (разд. 5.2).

3. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергия, 1970. – 200 с. (гл. 2).

4. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы автоуправления электроприводами в металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 192 с. (гл. 3, разд. 2).

5. Шипилло В.П. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с. (разд. 7.2 и 7.3).

6. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с. (гл. 10–13).

7. Комплектные системы управления электроприводами тяжелых металлорежущих станков / Н.В. Донской, А.А. Кириллов и др.; под ред. А.Д. Поздеева. – М.: Энергия, 1980. – 288 с. (гл. 2).

8. Рудаков В.В., Мартикайнен Р.П. Синтез электроприводов с последовательной коррекцией. – Л.: Энергия, 1972. – 120 с. (гл. 1, 2).

9. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 600 с. (гл. 10.4).

10. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных тиристорных электроприводов постоянного тока: учеб. пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 1991. – 104 с.

11. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Оптимизация контура системы подчиненного регулирования. Методические указания к выполнению лабораторных и практических работ. – Томск: Изд. ТПУ, 1990. – 20 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	3
1.1. Передаточные функции, временные и частотные характеристики	3
Список литературы к подразделу 1.1	15
1.2. Типовые динамические звенья линейных систем регулирования	16
1.2.1. Классификация звеньев	16
1.2.2. Пропорциональное (безынерционное) звено	21
1.2.3. Инерционные звенья	21
1.2.4. Интегрирующие звенья	27
1.2.5. Дифференцирующие звенья	30
Список литературы к подразделу 1.2	36
1.3. Передаточные функции контура регулирования	37
Список литературы к подразделу 1.3	44
1.4. Показатели качества систем автоматического регулирования	44
1.4.1. Прямые показатели качества переходных процессов для типовых воздействий	45
1.4.2. Интегральные методы оценки качества регулирования ..	52
1.4.3. Корневые методы оценки качества регулирования	53
1.4.4. Частотные методы оценки качества регулирования	62
Список литературы к подразделу 1.4	67
1.5. Аналоговые регуляторы на операционных усилителях ..	68
1.5.1. Общие сведения	68
1.5.2. Пропорциональный регулятор (П-регулятор)	76
1.5.3. Интегральный регулятор (И-регулятор)	77
1.5.4. Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор)	79
1.5.5. Дифференциальный регулятор (Д-регулятор)	80
1.5.6. Пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор)	81
1.5.7. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор)	83
1.5.8. Примеры нахождения передаточных функций устройств на операционных усилителях	84
Список литературы к подразделу 1.5	88

2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ	89
2.1. Компенсация инерционности объекта в контуре регулирования	89
2.1.1. Общие замечания	89
2.1.2. Компенсация с помощью ПД-регулятора	89
2.1.3. Компенсация с помощью ПИ-регулятора	91
2.2. Принципы построения и оптимизации систем подчиненного регулирования	92
2.3. Модульный оптимум	95
2.3.1. Общие замечания	95
2.3.2. Методика оптимизации контура по модульному оптимуму	102
2.3.3. Примеры оптимизации по модульному оптимуму	106
2.4. Симметричный оптимум	111
2.4.1. Общие замечания	111
2.4.2. Методика оптимизации контура по симметричному оптимуму	114
2.5. Вопросы практической оптимизации контура системы подчиненного регулирования	118
2.5.1. Таблицы оптимизации контура регулирования	118
2.5.2. Внутренние перекрестные связи объекта	126
2.5.3. Малые инерционности в канале обратной связи	126
2.5.4. В контуре регулирования отсутствуют малые инерционности	126
2.5.5. Ограничение координат системы	127
2.5.6. Отработка возмущений оптимизированным контуром	127
2.5.7. Нормированные характеристические уравнения оптимизированного контура	129
2.5.8. Другие настройки контура регулирования	131
2.5.9. Оптимизация методом нормированных передаточных функций	147
2.5.10. Чувствительность к переменным параметрам	150
Список литературы к разделу 2	152

**Леонид Степанович Удуд
Ольга Павловна Мальцева
Николай Вадимович Кояин**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

**Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем
Часть 2. Оптимизация контура регулирования**

Учебное пособие

Научный редактор
доктор технических наук,
профессор

Р.Ф. Бекишев


Редактор

М.В. Пересторонина

Подписано к печати 10.09.2007. Формат 60x84/16.
Бумага «Классика».
Печать RISO. Усл.печ.л. 9,07. Уч.-изд.л. 8,21.
Заказ . Тираж 100 экз.

Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета
сертифицирована NATIONAL QUALITY ASSURANCE
по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.