

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## Под редакцией А. А. Красовского. Справочник по теории автоматического управления

МОСКВА «НАУКА» ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 1987

Рецензент доктор технических наук Л. Д. Крутько

Справочник охватывает все основные разделы теории управления, включая оценивание, идентификацию, адаптацию, поиск экстремума, краткие сведения об автоматизированном проектировании. Он создан представителями разных советских школ науки об управлении в свете единой концепции современной прикладной теории автоматического управления.

Это концепция оптимального достижения главной конечной цели на каждом этапе функционирования системы с соблюдением множества ограничений (информационных, энергетических, вычислительных и др.). Центральное место в книге занимают алгоритмы оптимального и субоптимального адаптивного управления сложными нелинейными системами, реализуемые посредством ЭВМ. Справочник не имеет аналогов в отечественной и зарубежной литературе по автоматическому управлению.

Для разработчиков современных и перспективных систем управления технологическими процессами и подвижными объектами, инженеров и научных работников, студентов соответствующих специальностей.

АВТОРЫ: А. Г. АЛЕКСАНДРОВ, В. М. АРТЕМЬЕВ, В. И. АФАНАСЬЕВ, А. А. АШИМОВ, И. И. БЕЛОГЛАЗОВ, В. Н. БУКОВ, С. Н. ЗЕМЛЯКОВ, В. В. КАЗАКЕВИЧ, А. А. КРАСОВСКИЙ, Г. А. МЕДВЕДЕВ, Л. А. РАСТРИГИП, В. 10. РУТКОВСКИЙ, Р. М. ЮСУПОВ, И. Б. ЯДЫКИН, В. А. ЯКУБОВИЧ.

Справочник по теории автоматического управления. Под редакцией А. А. Красовского. — Москва, издательство "Наука". Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.— 712 с.

### Содержание справочника по теории автоматического управления

Предисловие

#### Глава 1. Пространство состояний

##### § 1.1. Понятие пространства состояний

1.1.1. Евклидово пространство состояний непрерывной конечномерной системы (22). 1.1.2.

Евклидово пространство состояний конечномерной системы с дискретным временем (22).

1.1.3. Пространство состояний непрерывной конечномерной системы с другими метриками (22).

1.1.4. Пространство состояний дискретных по уровню и времени конечномерных систем (24).

1.1.5. Пространство состояний бесконечномерной системы (24). 1.1.6.

Однолистная и многолистная фазовые плоскости (24).

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

§ 1.2. Описание движения в пространстве состояний. Математические модели процессов и систем

1.2.1. Детерминированная управляемая система, описываемая векторным дифференциальным уравнением в форме Коши (26). 1.2.2. Детерминированная непрерывная система с линейно входящими управлениями (26). 1.2.3. Детерминированная линейная непрерывная управляемая система (27). 1.2.4. Стохастическая управляемая система, описываемая уравнением в форме Ито (28). 1.2.5. Стохастическая управляемая система, описываемая уравнением в форме Ланжевена (28). 1.2.6. Стохастическая управляемая система, описываемая уравнением в форме Ланжевена с аддитивный белым шумом (29). 1.2.7. Линейная стохастическая управляемая система в форме Ланжевена (29). 1.2.8. Уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК-уравнение) для безусловной плотности вероятности в пространстве состояний непрерывной стохастической системы (29). 1.2.9. Уравнение Стратоновича для апостериорной плотности вероятности в пространство состояний наблюдаемой стохастической системы (30). 1.2.10. Детерминированная управляемая нелинейная система с дискретным временем (31). 1.2.11. Стохастическая нелинейная управляемая система с дискретным временем (32). 1.2.12. Детерминированная линейная управляемая система с дискретным временем (32). 1.2.13. Стохастическая линейная управляемая система с дискретным временем (33).

§ 1.3. Структурные представления систем, описываемых в пространстве состояний

1.3.1. Скалярные структурные схемы непрерывных систем (33). 1.3.2. Векторные структурные схемы непрерывных систем (35). 1.3.3. Векторные структурные схемы непрерывных систем, описываемых линейными уравнениями (35). 1.3.4. Векторные структурные схемы систем с дискретным временем (36).

§ 1.4 Другие формы описания динамических процессов. Преобразования к пространству состояний

1.4.1. Линейные непрерывные стационарные системы, заданные рациональными передаточными функциями (38). 1.4.2. Линейная стационарная система с известной импульсной переходной функцией (40). 1.4.3. Линейная стационарная система с известной частотной характеристикой (41). 1.4.4. Система, заданная оператором Гаммерштейна (42). 1.4.5. Описание в пространстве состояний на основе физических законов (42). 1.4.6. Расширение пространства состояний. Формирующие фильтры (42),

## Глава 2. Наблюдаемость, идентифицируемость, управляемость, адаптируемость

§ 2.1. Наблюдаемость

2.1.1. Виды общей наблюдаемости в пространстве состояний (45). 2.1.2. Локальное условие, благоприятствующее полной наблюдаемости для полнокомпонентного мгновенного измерения (48). 2.1.3. Локальное условие полной наблюдаемости при вычислении (намерении) производных по времени (49). 2.1.4. Локальное условие неполной наблюдаемости (50). 2.1.5. Структурная интерпретации наблюдаемости (50). 2.1.6. Условие наблюдаемости линейной стационарной системы (51). 2.1.7. Условие наблюдаемости линейной нестационарной системы (52). 2.1.8. Условие наблюдаемости линейной нестационарной системы, выраженное через матрицу Коши (53). 2.1.9. Локальное условие наблюдаемости нелинейного процесса с дискретным временем при  $n$  последовательных измерениях (53). 2.1.10. Условие наблюдаемости линейной стационарной системы с дискретным временем (54). 2.1.11. Условие наблюдаемости линейной нестационарной системы с дискретным временем (54). 2.1.12. Условие наблюдаемости процесса с

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

дискретным временем при  $q < n$  последовательных намерениях (55).

## § 2.2. Идентифицируемость

2.2.1. Локальное условие совместной наблюдаемости и идентифицируемости при вычислении (намерении) производных  $z$  по времени (55). 2.2.2. Локальное условие параметрической идентифицируемости при измерении  $x$  и  $z$  (56). 2.2.3. Локальное условие параметрической идентифицируемости при измерении  $x$  и  $x'$  (57). 2.2.4. Условие параметрической идентифицируемости при линейно входящих параметрах и измерении  $x$  и  $z$  (57). 2.2.5. Условие совместной наблюдаемости и идентифицируемости линейной стационарной системы (58). 2.2.6. Условие параметрической идентифицируемости линейной стационарной системы при измерении  $x$  и  $z$  (59). 2.2.7. Локальное условие совместной наблюдаемости и параметрической идентифицируемости дискретного по времени процесса при измерении последовательности (60). 2.2.8. Локальное условие параметрической идентифицируемости дискретного по времени процесса при измерении (61). 2.2.9. Локальное условие идентифицируемости линейно входящих параметров дискретного по времени процесса при измерении. 2.2.10. Условие полной идентифицируемости линейной стационарной системы с дискретным временем при измерении (61).

## § 2.3. Управляемость

2.3.1. Управляемость линейных стационарных систем (СС). 2.3.2. Управляемость линейных стационарных систем с дискретным временем (72). 2.3.3. Управляемость линейных нестационарных систем (74). 2.3.4. Управляемость линейных нестационарных систем с дискретным временем (75). 2.3.5. Принцип двойственности в теории управляемости и наблюдаемости (75). 2.3.6. Управляемость нелинейных систем. 2.3.7. Управляемость нелинейных систем с дискретным временем (77).

## § 2.4. Адаптируемость

2.4.1. Постановки задач адаптивного управления: в беспойсковых адаптивных системах управления. Определения и классификации видов адаптируемости (78). 2.4.2. Критерии адаптируемости основного контура (87).

## **Глава 3. Устойчивость процессов в пространстве состояний. Методы теории абсолютной устойчивости**

### § 3.1. Понятия устойчивости в пространстве состояний

3.1.1. Устойчивость в целом (93). 3.1.2. Устойчивость невозмущенного движения или процесса (93). 3.1.3. Устойчивость невозмущенного движения по Ляпунову (94). 3.1.4. Асимптотическая устойчивость невозмущенного движения по Ляпунову (95). 3.1.5. Устойчивость линейных стационарных систем (95). 3.1.6. Устойчивость невозмущенного движения системы с дискретным временем (96).

### § 3.2. Критерии устойчивости движения «в большом»

3.2.1. Достаточное условие устойчивости состояния равновесия стационарной системы с областью притяжения  $V_m$  (96). 3.2.2. Достаточное условие устойчивости в целом состояния равновесия стационарной системы (98). 3.2.3. Общие и частные случаи построения функций Ляпунова для нелинейных систем (98). 3.2.4. Некоторые условия стохастической устойчивости (101). 3.2.5. Некоторые структурные условия неустойчивости состояния нелинейных систем (103).

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

## § 3.3. Критерии устойчивости движения «в малом»

3.3.1. Критерий устойчивости линейной стационарной системы (105). 3.3.2. Необходимое условие устойчивости (ЮС). 3.3.3. Области устойчивости и пространстве параметров (106). 3.3.4. Траектории корней. Модальное управление (106). 3.3.5. Функции Ляпунова для линейных систем (107).

## § 3.4. Статизм и астатизм систем в пространстве состояний

3.4.1. Ошибки, вызванные медленно меняющимися непрерывно действующими внешними воздействиями (107). 3.4.2. Астатизм (108). 3.4.3. Структурные условия астатизма для линейной стационарной системы (109). 3.4.4. Структурные условия астатизма первого порядка для нелинейной стационарной системы (112). 3.4.5. Структурные условия векторного астатизма первого порядка для нелинейной стационарной системы (113).

## § 3.5. Инвариантность в теории регулирования

3.5.1. Условия инвариантности для линейной стационарной системы в пространстве состояний (114). 3.5.2. Условия инвариантности для линейных нестационарных систем (116). 3.5.3. Инвариантность для нелинейных систем (117). 3.5.4. Приближение к инвариантности невозмущенного движения нелинейной системы путем увеличения мощности управления (117).

## § 3.6. Методы теории абсолютной устойчивости

3.6.1. Понятие абсолютной устойчивости (118). 3.6.2. Абсолютная неустойчивость (121). 3.6.3. Уравнения линейной и нелинейной частей системы (121). 3.6.4. Круговой критерий абсолютной устойчивости (122). 3.6.5. Круговой критерий абсолютной неустойчивости (127). 3.6.6. Абсолютная устойчивость систем со стационарной нелинейностью. Критерий Попова (130). 3.6.7. Критерий абсолютной неустойчивости систем со стационарной нелинейностью (132). 3.6.8. Критерии абсолютной устойчивости для систем с дифференцируемой нелинейностью (133). 3.6.9. Абсолютная неустойчивость систем с дифференцируемой нелинейностью (138). 3.6.10. Графические критерии абсолютной устойчивости для заданного класса систем с дифференцируемой нелинейностью (138). 3.6.11. Графический критерий абсолютной устойчивости для различных классов нелинейностей (140). 3.6.12. Критерии диссипативности (142). 3.6.13. Частотные критерии автоколебательности (144). 3.6.14. Примеры (146). 3.6.15. Связь с методом функций Ляпунова (149). 3.6.16. Краткий обзор литературы по теории абсолютной устойчивости (150).

## **Глава 4. Методы и алгоритмы оценивания динамических процессов**

### § 4.1. Классификация задач оценивания

4.1.1. Непрерывные процессы (152). 4.1.2. Дискретные процессы (156). 4.1.3. Оценивание полей (159).

### § 4.2. Некоторые общие положения прикладной теории оценивания непрерывных процессов

4.2.1. Условия, благоприятствующие точному оцениванию (162). 4.2.2. Распределение информации (165). 4.2.3. Критерии оптимизации оценивания (166).

### § 4.3. Алгоритмы оценивания непрерывных процессов

4.3.1. Общие выражения (173). 4.3.2. Субоптимальные в смысле оценивания алгоритмы второго порядка (177). 4.3.3. Субоптимальные алгоритмы, основанные на кусочно-полиномиальной аппроксимации нелинейных функций (184). 4.3.4. Обобщенный и

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

линейный непрерывные фильтры Калмана — Бьюси (186). 4.3.5. Фильтры, защищенные по отношению к отказам датчиков (191). 4.3.6. Другие непрерывные фильтры первого порядка (195). 4.3.7. Непрерывные алгоритмы оценивания детерминированных процессов при отсутствии шумов наблюдения (197). 4.3.8. Непрерывные алгоритмы оценивания с эмпирическими средними (200). 4.3.9. Непрерывные адаптивные и поисковые алгоритмы оценивания (202).

§ 4.4. Математическое описание дискретных процессов

4.4.1. Цепи Маркова (207). 4.4.2. Последовательности Маркова (209).

§ 4.5. Алгоритмы оценивания дискретных по времени процессов

4.5.1. Субоптимальные алгоритмы оценивания нелинейных процессов (212). 4.5.2. Оптимальный рекуррентный алгоритм оценивания линейных процессов (215).

§ 4.6. Непрерывные алгоритмы оценивания полей

4.6.1. Алгоритмы при векторном наблюдении (218). 4.6.2. Алгоритмы для случая скалярного наблюдения (221).

## **Глава 5. Методы и алгоритмы идентификации динамических систем**

§ 5.1. Общая классификация задач идентификации

5.1.1. Теоретико-множественная постановка задачи идентификации (224). 5.1.2. Идентификация непрерывных объектов в классе моделей с дискретным временем (227). 5.1.3. Задача непараметрической идентификации (228). 5.1.4. Задача параметрической идентификации (229). 5.1.5. Задача непараметрической идентификации в пространстве состояний (229). 5.1.6. Задача параметрической идентификации в пространстве состояний (231). 5.1.7. Связь задач идентификации с теорией планирования эксперимента (232).

§ 5.2. Классические методы непараметрической идентификации линейных динамических систем

5.2.1. Метод частотных характеристик (233). 5.2.2. Метод временных характеристик (235). 5.2.3. Метод корреляционных функций (237). 5.2.4. Расширение областей применимости классических методов идентификации (240).

§ 5.3. Прямые методы параметрической идентификации

5.3.1. Прямая идентификация статического объекта с линейно входящими параметрами (245). 5.3.2. Метод сумм произведений (24В). 5.3.3. Метод наименьших квадратов (246).

§ 5.4. Беспосредственные алгоритмы идентификация с адаптивной моделью

5.4.1. Общая структура алгоритма в пространствах сигналов (249). 5.4.2. Общая структура алгоритма в пространствах состояний (250). 5.4.3. Эвристические алгоритмы (252). 5.4.4. Алгоритмы с оптимальной настройкой модели (271).

§ 5.5. Поисковые алгоритмы идентификации с адаптивной моделью

5.5.1. Общая структура алгоритма (275). 5.5.2. Непрерывные градиентные алгоритмы с синхронным детектированием (276). 5.5.3. Цифровые градиентные алгоритмы с синхронным детектированием (281). 5.5.4. Цифровые алгоритмы с глобальным и комбинированным поиском (282).

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

§ 5.6. Алгоритмы идентификации, основанные на теории оценивания процессов

5.6.1. Идентификация непрерывных объектов, описываемых в пространстве состояний (283).

5.6.2. Идентификация процессов с дискретным временем, описываемых в пространстве состояний (293).

§ 5.7. Рекуррентные алгоритмы идентификации при коррелированных шумах

5.7.1. Динамический объект, описываемый оператором Гаммерштейна (296) 5.7.2.

Идентификация методом наименьших квадратов (208). 5.7.3. Идентификация по типу

стохастической аппроксимации (301). 5.7.4. Условия состоятельности оценок (305). 5.7.5.

Сложность рекуррентных алгоритмов идентификации (305).

§ 5.8. Оптимальные совместные оценивание и параметрическая идентификация в дискретных линейных системах

5.8.1. Постановка задачи (377). 5.8.2. Уравнение для апостериорной плотности (308). 5.8.3.

Совместимо оптимальные оценивание и идентификация по критерию максимума

апостериорной плотности (309). 5.8.4. Оптимальные адаптивные оценивание и идентификация (309).

## Глава 6. Критерии оптимизации управления

§ 6.1. Однокритериальная и многокритериальная оптимизации. Методология выбора минимизируемого функционала

6.1.1. Предварительный выбор (312). 6.1.2. Итерационная коррекция (317).

§ 6.2. Развернутые формы функционалов для оптимизации непрерывных детерминированных процессов

8.2.1. Традиционные (классические) формы детерминированных функционалов (319). 6.2.2.

Функционалы обобщенной работы (321).

§ 6.3. Развернутые формы функционалов для оптимизации детерминированных процессов с дискретным временем

6.3.1. Классические формы детерминированных функционалов (324). 6.3.2. Функционалы обобщенной работы (324).

§ 6.4. Функционалы для оптимизации управления стохастическими процессами

6.4.1. Безусловные и условные математические ожидания функционалов (326). 6.4.2.

Развернутые формы функционалов для оптимизации стохастических процессов с

непрерывным временем (327). 6.4.3. Развернутые формы функционалов для оптимизации стохастических процессов с дискретным временем (328).

## Глава 7. Некоторые общие методы теории оптимального управления

§ 7.1. Классическое вариационное исчисление и современные задачи оптимизации динамических систем

7.1.1. Постановка задачи (329). 7.1.2. Задача со свободным правым концом и заданным

временем переходного процесса (.430). 7.1.3. Задача с фиксированными значениями

некоторых переменных в заданный момент времени окончания переходного процесса (332).

7.1.4. Задача с фиксированными значениями некоторых переменных состояния и

неопределенный момент окончания переходного процесса (335). 7.1.5. Заключение (347).

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

## § 7.2. Принцип максимума

7.2.1. Постановка задачи (347). 7.2.2. Предварительные построения (350). 7.2.3. Задачи с заданным временем окончания переходного процесса (353). 7.2.4. Задачи с незадаанным временем окончания переходного процесса (354). 7.2.5. Связь принципа максимума с методами классического вариационного исчисления (356). 7.2.6. Линейные объекты (357). 7.2.7. Заключительные замечания (361).

## Глава 8. Алгоритмы оптимального управления

### § 8.1. Классификация алгоритмов оптимального автоматического управления

8.1.1. Классификация по объему необходимого информационного обеспечения и характеру решаемых задач (362). 8.1.2. Общая характеристика технологии алгоритмического обеспечения (365).

### § 8.2. Синтез законов управления непрерывными детерминированными процессами при классических формах функционалов

8.2.1. Варианты уравнений Беллмана (367). 8.2.2. Методы решения уравнения Беллмана (371). 8.2.3. Синтез законов оптимального управления детерминированными линейными объектами при квадратичном функционале (373).

### § 8.3. Синтез законов управления детерминированными процессами с дискретным временем при классических формах функционалов

8.3.1. Варианты дискретного уравнения Беллмана для частных форм функционала (385). 8.3.2. Синтез законов управления линейными системами (387).

### § 8.4. Синтез законов управления стохастическими процессами при функционалах классического типа

8.4.1. Приближенное разделение для стохастического нелинейного объекта с линейно входящим управлением (389). 8.4.2. Точное разделение для линейно-квадратичных задач оптимального управления марковскими процессами (392).

### § 8.5. Решение задачи минимизации критерия обобщенной работы в общем виде

8.5.1. Оптимальные управления непрерывными детерминированными процессами (393). 8.5.2. Оптимальные управления детерминированными процессами с дискретным временем (396). 8.5.3. Приближенное разделение при минимизации условного математического ожидания функционала обобщенной работы (398). 8.5.4. Стохастический принцип минимума обобщенной работы (399). 8.5.5. Стохастический принцип минимума обобщенной работы и уравнение ФПК (400).

### § 8.6. Синтез законов оптимального и субоптимального нелинейных управлений на стадии проектирования системы при функционалах обобщенной работы

8.6.1. Приведение задачи к линейно входящему управлению (401). 8.6.2. Решение задачи оптимизации при функционале обобщенной работы с квадратичной функцией затрат на управление (402). 8.6.3. Решение уравнения Ляпунова методом степенных рядов и соответствующие законы управления (407). 8.6.4. Решение уравнения Ляпунова операционным методом и соответствующие законы управления (411). 8.6.5. Решение уравнения Ляпунова методом характеристик и соответствующие законы управления (415).

### § 8.7. Синтез законов управления линейными процессами при функционале обобщенной

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

работы (метод АКОР)

8.7.1. Общий закон оптимального по критерию обобщенной работы управления линейным процессом, выраженный через решение уравнения Ляпунова (417). 8.7.2. Прямое решение уравнения Ляпунова для нестационарного случая (418). 8.7.3. Решение уравнения Ляпунова с использованием матрицы Коши (419). 8.7.4. Решение алгебраического уравнения Ляпунова для стационарного случая (419). 8.7.5. Иерархическая оптимизация линейных динамических систем с использованном ЛКОР по критерию обобщенной работы (420). 8.7.6. Оптимальные по критерию обобщенном работы дискретное по времени управление непрерывными динамическими процессами (424).

§ 8.8. Оптимальные управления, синтезируемые в процессе функционирования системы в реальном времени (совмещенный синтез)

8.8.1. Общее обоснование алгоритма с прогнозирующей моделью (426). 8.8.2. Структура алгоритма с прогнозирующей моделью. Варианты алгоритма (428). 8.8.3. Уравнения характеристик в задаче оптимального управления скоростью изменения входных величин (428). 8.8.4. Алгоритм с прогнозирующей моделью и численным дифференцированием (429). 8.8.5. Алгоритм с прогнозирующей моделью, модифицированный (430). 8.8.6. Алгоритм с прогнозирующей моделью и матрицей чувствительности (430). 8.8.7. Алгоритм с прогнозирующей моделью и синхронным детектированием (432). 8.8.8. Алгоритм с прогнозирующей моделью и аналитическим решением (434). 8.8.9. Вопросы численной реализации алгоритма в реальном масштабе времени (435).

§ 8.9. Алгоритмы модального управления

8.9.1. Модальное управление при полностью измеряемом векторе состояния (431). 8.9.2. Модальное управление при неполных измерениях (438). 8.9.3. Модальное управление при внешних возмущениях (442).

## Глава 9. Оптимизация динамических систем со случайной структурой

§ 9.1. Основные определения

§ 9.2. Уравнения систем со случайной структурой

§ 9.3. Оптимальная фильтрация процессов случайной структуры

9.3.1. Уравнения для апостериорной плотности вероятности (450). 9.3.2. Структура и алгоритмы фильтра (452). 9.3.3. Оптимальная линейная фильтрация (453). 9.3.4. Пример решения задачи фильтрации (455).

§ 9.4. Управление в системах со случайной структурой

9.4.1. Особенности задач оптимизации (457). 9.4.2. Оптимальное управление при условии точного знания структуры и вектора состояний (459). 9.4.3. Пример задачи оптимального управления при точных измерениях (461). 9.4.4. Оптимальное управление при неточных измерениях (463). 9.4.5. Пример задачи оптимального управления при неточных измерениях (465).

## Глава 10. Алгоритмы адаптивных систем автоматического управления

§ 10.1. Классификация адаптивных систем автоматического управления

§ 10.2. Адаптивные оптимальные САУ с полной моделью управляемых процессов

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

10.2.1. Система с обобщенным ФКБ и алгоритмом прогнозирующей модели (471). 10.2.2. Система с автономной идентификацией (типа ЛИТО) и алгоритмом прогнозирующей модели (473).

§ 10.3. Адаптивные субоптимальные САУ с упрощенными моделями управляемых процессов

10.3.1. Иерархические адаптивные субоптимальные САУ 10.3.2. Адаптивные субоптимальные САУ с феноменологическими моделями (479).

§ 10.4. Беспойсковые системы прямого адаптивного управления

10.4.1. Общая структура систем прямого адаптивного управления (480). 10.4.2. Системы с информацией о частотных, временных характеристиках и система с моделью (481).

§ 10.5. Беспойсковые адаптивные системы с неявной эталонной моделью

10.5.1. Основные структуры (493). 10.5.2. Алгоритмы оптимальной настройки линейных регуляторов адаптивной системы (494). 10.5.3. Алгоритмы оптимальной настройки комбинированной системы (495).

§ 10.6. Беспойсковые адаптивные системы с линейным оцениванием на основе эталонной модели

10.6.1. Алгоритмы системы с непрерывным временем (496). 10.6.2. Алгоритмы системы с дискретным временем (408)

## **Глава 11. Метод рекуррентных целевых неравенств в адаптивном управлении**

§ 11.1. Формальное описание адаптивной системы

§ 11.2. Описание метода рекуррентных целевых неравенств

§ 11.3. Основные конечно сходящиеся алгоритмы решения бесконечной системы рекуррентных неравенств

11.3.1. Алгоритмы «полоска» (506). 11.3.2. Конечно сходящиеся алгоритмы решения линейных рекуррентных неравенств (507). 11.3.3. Алгоритм эллипсоидов для решения линейных рекуррентных неравенств (508).

§ 11.4. Адаптивное субоптимальное управление начально-фазовым объектом

§ 11.5. Адаптивные системы с эталонной моделью

§ 11.6. Адаптивная стабилизация неминимального-фазового объекта и адаптивное модальное управление

§ 11.7. Адаптивное управление нелинейными статическими объектами

§ 11.8. Стохастические линейные задачи с минимизацией квадратичных функционалов

§ 11.9. Заключительные замечания

## **Глава 12. Системы экстремального регулирования**

§ 12.1. Общие понятия

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

12.1.1. Типы систем экстремального регулирования (528). 12.1.2. Система с запоминанием экстремума (529). 12.1.3. Одномерная система с управлением по градиенту (531). 12.1.4. Система с измерением производной по времени (531). 12.1.5. Система шагового типа (532). 12.1.6. Система со вспомогательной модуляцией (синхронным детектированием) (532).

§ 12.2. Влияние дрейфа на устойчивость

12.2.1. Влияние вертикального дрейфа (534). 12.2.2. Влияние горизонтального дрейфа (534).

§ 12.3. Переходные процессы и периодические движения

12.3.1. Точный метод (535). 12.3.2. Устойчивость систем экстремального регулирования (536). 12.3.4. Монотонная устойчивость систем экстремального регулирования (538).

§ 12.4 Улучшение качества работы

12.4.1. Методы уменьшения влияния инерционности объекта экстремального регулирования (540). 12.4.2. Уменьшение случайных помех (543). 12.4.3. Уменьшение влияния дрейфа (545).

## **Глава 13. Методы и алгоритмы оценивания в корреляционно - экстремальных системах**

§ 13.1. Классификация корреляционно-экстремальных систем

13.1.1. Области применения (551). 13.1.2. Классификация по информационным признакам (552).

§ 13.2. Методы и алгоритмы оценивания в корреляционно-экстремальных системах

13.2.1. Беспойсковые методы оценивания (556). 13.2.2. Поисковые методы оценивания (576). 13.2.3. Комбинированные методы оценивания (593).

## **Глава 14. Методы теории чувствительности**

§ 14.1. Модели чувствительности непрерывных и разрывных систем

14.1.1. Основные понятия (605). 14.1.2. Уравнения чувствительности непрерывных систем. 14.1.3. Уравнения чувствительности высших порядков 14.1.4. Модели чувствительности разрывных систем

§ 14.2. Чувствительность решений краевых задач

14.2.1. Краевые задачи, зависящие от параметра (612). 14.2.2. Условия существования функции чувствительности решения краевых задач (613). 14.2.3. Модель чувствительности решения краевой задачи (614). 14.2.4. Исследование чувствительности простейшей вариационной задачи (615).

14.3. Функции и коэффициенты чувствительности невременных характеристик и показателей оптимальности систем управления

14.3.1. Чувствительность передаточной функции и частотных характеристик (617). 14.3.2. Чувствительность нулей и полюсов передаточных функции (619).

§ 14.4. Инварианты чувствительности

14.4.1. Общие сведения (623). 14.4.2. Инварианты чувствительности временных характеристик и передаточных функций линейных систем (624). 14.4.3. Корневые инварианты чувствительности (626). 14.4.4. О примененных инвариантов чувствительности

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

(С27).

§ 14.5. Прикладные задачи теории чувствительности

14.5.1. Классификация прикладных задач теории чувствительности (628). 14.5.2. Оценка дополнительного движения (629). 14.5.3. Оценивание параметров (631). 14.5.4. О применении методов теории чувствительности в задачах оптимизации и адаптации (636).

## **Глава 15. Поисковые методы автоматизации проектирования**

§ 15.1. Постановка задачи автоматизации процесса проектирования САУ

§ 15.2. Структура поискового алгоритма оптимизации

15.2.1. Алгоритм случайного поиска с парными пробами

15.2.2. Алгоритм статистического градиента

§ 15.3. Алгоритм локального параметрического поиска

15.3.1. Алгоритм случайного спуска (641). 15.3.2. Случайный поиск с возвратом (641).

15.3.3. Релаксационный алгоритм случайного спуска (642). 15.3.4. Случайный поиск по наилучшей пробе (642). 15.3.5. Адаптивные параметрические алгоритмы случайного поиска (643).

§ 15.4. Учет ограничений в процессах случайного поиска

15.4.1. Ограничения типа неравенств (645). 15.4.2. Ограничения типа равенств (646). 15.4.3. Ограничения типа неравенств и равенств. 15.4.4. Дискретные ограничения (646). 15.4.5. Дискретные ограничения с неравенствами (647).

§ 15.5. Глобальный поиск

15.5.1. «Пабросовые» алгоритмы (647). 15.5.2. Сглаживающие алгоритмы (648).

§ 15.6. Оптимизация в обстановке случайных помех

15.6.1. Метод стохастической аппроксимации (651). 15.6.2. Сглаживание помех (651). 15.6.3. Стохастическое накопление (652). 15.6.4. Последовательное накопление (652). 15.6.5. Симплексный алгоритм поиска (653).

§ 15.7. Структурная оптимизация

15.7.1. Дискретизация структуры (655). 15.7.2. Эволюционная оптимизация структуры (656).

## **Глава 16. Автоматизация проектирования систем автоматического управления**

§ 16.1. Принципы автоматизации проектирования систем автоматического управления

16.1.1. Этапы и стадии проектирования (659). 16.1.2. Уровни автоматизации проектирования (661). 16.1.3. Компоненты обеспечения САПР (662). 16.1.4. Общие принципы построения САПР (663).

§ 16.2. Способы построения систем автоматизированного проектирования

16.2.1. Диалоговая система проектирования ДИСПАС (604). 16.2.2. САПР адаптивных систем СЛПРАС (665). 16.2.3. Система «Гамма-Ш» (666).

Приложение

Список основных обозначений

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

Список литературы

Список аббревиатур

Предметный указатель

[Скачать книгу](#) Под редакцией А. А. Красовского. [Справочник по теории автоматического управления](#). Москва, Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1987